Nouveau nom d'AIP-PRIMECA

Systems.Manufacturing.Academics.Resources.Technologies

17ème colloque national S-mart

(AIP-PRIMECA)

les 31 mars, 1 et 2 avril 2021



https://s-mart2021.sciencesconf.org/

S-mart Village – LAVAL VIRTUAL WORLD

France

Le Colloque National S-mart représente, depuis 30 ans, une occasion unique pour les jeunes chercheurs, doctorants ou post-doctorants, de mieux se connaître mais aussi de rencontrer leurs aînés, chercheurs expérimentés reconnus sur le plan international, en un lieu propice aux échanges en matière de recherche scientifique mais aussi de pédagogie innovante, dont on mesure aujourd'hui toute l'importance, dans le contexte particulier qui touche nos métiers depuis le printemps 2020.

Malgré la situation sanitaire, l'édition 2021 organisée en version digitale, a rencontré un vif succès et une participation massive en relevant le défi de préserver le caractère convivial des échanges.

Le pôle S-mart Nord-Pas-de-Calais a ainsi organisé la 17ème édition sur le thème fédérateur du jumeau numérique au service de l'industrie 4.0. Les articles acceptés présentés lors des conférences ont suscité un réel intérêt. Les conférences ont été organisées en sessions parallèles allant de la conception avec des approches innovantes pour la modélisation de la physique, en passant par les systèmes de production et technologies au service de l'industrie 4.0 en allant jusqu'à la fabrication additive tout en prenant en compte la réalité virtuelle ou augmentée, la place de l'humain et les défis sociétaux sans oublier les innovations pédagogiques.

Un grand merci de tous les acteurs de ce colloque qui ont grandement contribué à la réussite de cette 17ème édition : le comité d'organisation, le comité scientifique, les membres des différents jurys, les auteurs et conférenciers ainsi que les partenaires institutionnels et industriels qui ont participé activement à l'animation.

Daniel COUTELLIER,
Dominique DENEUX,
Jean-Dominique GUERIN,
Annick MANY.

Table des matières

Editorial **1**

Session 1-A : Technologies au service de l'industrie 4.0 **4**
Une nouvelle méthode de formulation de problèmes en conception inventive 4
Interopérabilité " plug and play " dirigée par les modèles : Apprentissage des modèles de transformation 9
Intégration horizontale au service du PLM : un état de l'art 15
ROS : une solution middleware adaptée pour l'industrie du futur ? 21
Système d'assemblage reconfigurable - Utilisation dans un cadre didactique 27

Session 1-B : Approches innovantes pour la modélisation de la physique **33**
Projet " Réacteur Numérique " : vers un Jumeau Numérique de Réacteur Nucléaire . 33
Influence des jeux et des désalignements sur un assemblage simple cisaillement 40
Vers un serrage intelligent dans les assemblages aéronautiques 46
Proposition d'une méthode de caractérisation des contraintes résiduelles dans les fils tréfilés de faible diamètre 52
Instrumentation d'un procédé de forgeage : comparaison de différentes technologies de capteurs 56
Design Optimization of Bistable NES 64

Session 1-C : Nouveaux enjeux et défis sociétaux **70**
Ecodesign & medicine products: the pharmaceutical sector complexity 70
Using Value Analysis and Systems Engineering for complex projects 77
Sustainable Value forms. Insights from a Sustainable Business Model serving a poor context 83
Vers des tables en flux physiques de l'économie française 89
La customization de masse, est-elle une approche de production durable ? 97

Session 2-A : Réalité virtuelle et réalité augmentée **103**
Réalité augmentée en enseignement : l'outil ou la science ? 103
Formation à la réalité virtuelle pour l'industrie 4.0 109
Détection d'Intention dans un Environnement de Conception en Réalité Virtuelle . . . 115
Co-manipulation robotique transparente pour l'assistance à l'examen échographique . . 122
Simulateur d'infrastructure portuaire - Un outil de développement pour l'automatisation des platesformes de gestion de conteneurs 128

Session 2-B : Pilotage du système de production **133**
Retour d'expérience sur la réalisation du jumeau numérique d'une Cellule Flexible avec Emulate3D 133
Le jumeau numérique dans le pilotage de performance 140
Intégration de fonctions " MES " à l'architecture de pilotage d'une cellule de production flexible 146

Couplage de jumeau numérique et réseau de neurones pour la détection et l'analyse des micro-pannes dans un système de production 152
Intégration du jumeau numérique dans le cycle de vie d'un projet industriel 158

Session 2-C : L'humain dans la boucle **164**
Analyse exploratoire sur l'intérêt de l'informatique culturelle pour la conception d'IHM en ingénierie 164
Une approche générique du jumeau numérique pilotée par les usages 171
Conception et évaluation d'un jumeau numérique pour l'évaluation de la motrice fine de patients atteints de troubles neuromusculaires. Application à l'échelle d'évluation de la MFM 177
Identification des situations dangereuses au sein de l'approche WSHM 183
Analyse des aspects santé-sécurité lors du démantèlement / de-manufacturing 189

Session 3-A : Innovations pédagogiques **197**
Tumble it : Développement et mis en œuvre d'une étude de cas explicitant le Principe Fondamental de la Statique dans le cadre d'une phase d'Apprentissage Par Problèmes en Licence 1 197
Ingénierie pédagogique d'un module international - Retour d'expérience d'un projet européen confronté à la crise COVID-19 204
Conception et Réalisation d'une Maquette de Palan 211
Etude de logiciels CAO en mode SAAS dans le domaine pédagogique de l'enseignement supérieur : Analyse comparative des logiciels Fusion 360 et Onshape 218

Session 3-B : Fabrication additive **225**
Influence des paramètres de conception sur la densité relative de cellules à base de surfaces minimales triplement périodiques (TPMS) pour la fabrication additive 225
Conception et caractérisation d'un absorbeur d'énergie obtenu par fabrication additive 232
Analyse des données issues du monitoring in-situ du procédé de fabrication additive LPBF 238
Les éléments importants pour fabriquer des pièces massives par technologie WAAM . . 244

Liste des auteurs **250**

Liste des participants **253**

Session 1-A : Technologies au service de l'industrie 4.0

Une nouvelle méthode de formulation de problèmes en conception inventive

Masih Hanifi[1, 2], Hicham Chibane[2], Remy Houssin[1], Denis Cavallucci[2]

[1] Strasbourg Université, 4 Rue Blaise Pascal, 67081 Strasbourg, France
[2] INSA of Strasbourg, 24 Boulevard de la Victoire, 67000 Strasbourg, France

Résumé*—*L'analyse initiale est une phase importante de la conception inventive, elle est utilisée pour formuler les problèmes à traiter en amont du processus. Généralement, la problématique initiale telle qu'elle est formulée par l'industriel, est liée à plusieurs autres sous-problèmes, et le challenge reste à déterminer le plus pertinent à traiter pour résoudre cette problématique. Parmi les outils utilisés dans la phase d'analyse initial, le graphe de problèmes permet de représenter l'ensemble des connaissances liées au projet sous forme d'un modèle graphique. Cependant, ce dernier, tel qu'il est développé aujourd'hui, présente des limites en terme de temps de mise en œuvre en raison du traitement de l'ensemble des sous-problèmes. Le but de cet article est d'introduire une nouvelle méthode pour converger rapidement vers le problème à traiter et contribuer à l'agilité du processus. Un exemple d'application est traité pour illustrer cette nouvelle méthode.

Mots-clés*— *Conception inventive, Problème complexe, Graphe de problème, Analyse de contradiction, Analyse des causes.

I. INTRODUCTION

La formulation pertinente d'un problème lors de la conception inventive est importante pour garantir la réussite d'un projet. Parmi les méthodes les plus utilisées, on retrouve le graphe de problèmes et l'analyse des contradictions racines plus (ACR+). Ces dernières permettent d'analyser la problématique initiale sous forme de contradiction. Ces dernières sont des problèmes inventifs au sens de la théorie TRIZ et résultant du conflit entre des caractéristiques recherchées au sein d'une gestion du cycle de vie des produits (GCVP) [1]. Notre travail permet d'améliorer cette première phase de la GCVP. Dans les processus de conception inventive basés sur TRIZ, les concepteurs analysent la situation initiale et pour la résoudre, ils doivent formuler les problèmes sous forme de contradictions. Cependant, les méthodes actuelles, appliquées lors de la phase d'analyse initiale, n'ont pas l'agilité nécessaire pour répondre aux exigences du marché actuel. L'objectif de ce papier est de proposer une nouvelle méthode de construction d'un graphe de problème qui soit à la fois pertinente et agile [2]. Notre choix s'est porté sur la méthode Lean pour réduire la durée du processus d'analyse et de formulation de la conception inventive [3]. Généralement, la méthode Lean fournit des outils et des principes permettant d'éliminer les activités sans valeur ajoutée, et cela, dans le cadre d'un processus visant à atteindre l'excellence.

Afin d'introduire ce nouvel outil pour l'analyse initiale, nous avons intégré certaines fonctionnalités du graphe de problèmes, de l'analyse des contradictions racines plus ACR(+) ainsi que certains principes de la méthode Lean. L'article est organisé en cinq sections, la section 2 présente un état d'art des méthodes existantes sur la formulation des problèmes et l'analyse de la situation initiale en conception inventive. La section 3, présente le déroulement et les étapes de la nouvelle méthode proposée nommée "Graphe de problèmes inverse" alors qu'une conclusion et des perspectives sont présentées en section 4.

II. L'ETAT DE L'ART

L'analyse initiale en conception inventive est une phase de collecte de connaissances, repose sur l'analyse de plusieurs ressources, à savoir, des brevets et des documents internes à l'entreprise, du savoir-faire des expert ainsi que des données existantes relatives au sujet étudié [4] [5] [6] [7]. Il existe plusieurs méthodes pour formuler un problème lors de la conception d'un produit ou d'un processus innovant, des méthodes basées sur la recherche de causes, et d'autres sur la recherche d'effets.

Le premier groupe est lié aux méthodes et techniques qui sont utilisées pour identifier les causes qui créent les problèmes dans un projet d'innovation. Certaines méthodes dans ce groupe ne permettent pas de formuler de contradictions telles que : Ishikawa, les 5 Pourquoi et l'Analyse des chaînes causes-effets [8]. Ces méthodes permettent de classer les causes explorées dans plusieurs catégories, ce qui permet d'identifier les domaines dans lesquels des informations devraient être recueillies pour une étude plus approfondie [9][10] [11]. [12][13] [14] [15]. D'autres méthodes sont basées sur la formulation de contradictions, on trouve par exemple: l'analyse des contradictions racines plus (ACR+), l'analyse de la chaîne de cause à effet plus" [11] [16] [17] [18]. Les méthodes basées sur la formulation de contradictions sont les plus adaptés pour le traitement des problèmes inventifs et des problèmes complexes. Cet ensemble de méthodes est limité par l'importance du nombre de problèmes à traiter, ce qui alourdit considérablement le temps du traitement et d'analyse lors de l'activité de conception.

Le deuxième groupe de méthodes est basé sur la recherche des effets des problèmes initiaux. Dans ce groupe, nous trouvons le Réseau de problèmes (RP), et le graphe de problèmes qui est une version améliorée du RP. Ces méthodes permettent de décomposer un problème global en un ensemble de sous-problèmes, plus faciles à résoudre [19] [20] [21]. Étant donné que la définition initiale du problème est souvent trop générale, le réseau de sous problèmes reste vaste et trop complexe, ceux qui implique un temps considérable pour

assurer le bon déroulement du processus de conception [22] [23] [24].

Toutes ces méthodes ont cependant une limite, elles n'optimisent pas l'usage des chaînes de causes et d'effets créées lors de l'étape de solution. Ajoutons à cela le temps que les concepteurs consacrent inutilement à la collecte des informations au début du projet sans savoir à l'avance si ces dernières seront utiles à la caractérisation de la solution finale ou non. Notre méthode propose de ne pas retenir tous les sous-problèmes à résoudre afin d'augmenter l'agilité du processus et réduire ainsi considérablement le temps nécessaire de la conduite d'un projet. Dans la section suivante, nous présentons cette méthode.

III. METHODE PROPOSEE : GRAPHE DE PROBLEMES INVERSE

La méthode proposée se base sur le Graphe de Problèmes Inverse (GPI), dans cette section la définition et le processus de ce dernier sont illustrées.

A. Définition du Graphe de Problèmes Inverse (GPI) :

La méthode du Graphe de Problèmes Inverse considère 5 notions importantes : Les problèmes, Les solutions partielles, les paramètres, les niveaux, et les itérations, comme montré sur la Fig 3.

Problème : un problème décrit un obstacle qui empêche la réalisation de ce qui doit être fait. Dans notre méthode, nous comptons 5 types de problèmes :

- Problème Initial : il définit la problématique globale du projet et il est placé dans le premier niveau du graphique.
- Problème Nuisible : Nuisance pour le système.
- Problème Source de Solution Partielle : Le caractère nuisible associé au problème conduit à une solution partielle.
- Problème Nuisible-Utile : Combinaison de nocivité et d'utilité pour le système (convertibilité en solution partielle).
- Problème en lien avec les limites de capacité (hors domaine ou technologie, budgétaire, etc.)

Solution partielle : Une phrase qui expose les connaissances du concepteur ou présente dans un brevet déposé par l'entreprise ou sa concurrence et leur expérience. Paramètres : les paramètres existants dans la structure du GPI sont divisés en deux groupes :

- Paramètres d'évaluation : ce sont les paramètres qui donnent au concepteur la capacité d'évaluer ses choix de conception.
- Paramètres d'action : leur nature réside dans la capacité de modification de l'état du système.

Niveau : Précise l'emplacement du problème et de la solution partielle dans le GPI, à partir problème initial.

Itération : Numéro d'entrée au GPI, afin de choisir une contradiction. Cette notion a été ajoutée à la structure de la méthode proposée. Elle définit le principe dans Lean selon lequel nous devrions créer un flux d'informations.

B. Processus du Graphe de Problèmes Inverse

Dans cette section, nous présentons les étapes de la méthode proposée à travers une étude de cas sur la conception d'un système de stockage d'aliments. Pour des raisons de confidentialité, certaines parties de cette étude ne sont pas détaillées.

Étape 1 : Définir l'objectif du projet : Un système de stockage de nourriture a été conçu pour conserver des légumes et des fruits, mais ce système n'a pas la capacité d'une conservation prolongée des aliments sans un apport d'énergie extérieure. La problématique de l'étude est liée à la courte durée de vie des fruits et légumes. L'objectif est donc d'augmenter la durée de vie de ces aliments comme le montre la Fig. 1.

Étape 2 : Rédiger le problème initial : rédiger le problème initial en considérant l'objectif du projet, Fig. 1.

Étape 3 : Lister l'ensemble des problèmes liés au problème initial : afin de déterminer l'ensemble des problèmes et des solutions partielles, il faut poser la question "qu'est-ce qui, au niveau sélectionné, cause le problème initial ?, Fig. 5.

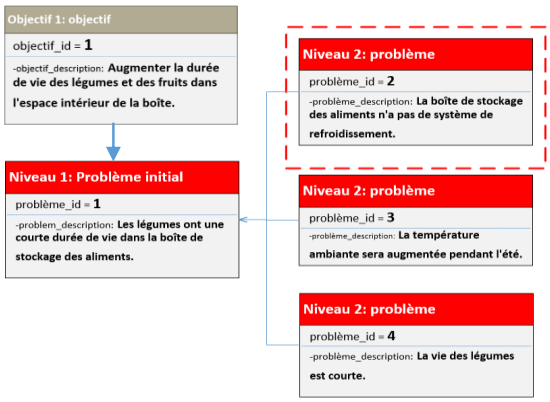


Figure 1. SELECTION DU PROBLEME LE PLUS IMPORTANT DANS L'EXEMPLE

Étape 4: Déterminer le type de problème : pour chaque problème listé lors de l'étape 3, une classification lui est attribuée, Nuisible-Utile ou Nuisible.

Un problème Nuisible-Utile doit être converti en une solution partielle, Fig. 2. Pour ce type de problèmes, il faut déterminer la « Source de Solution Partielle » en posant la question «Quel problème de niveau suivant dans le graphe cause cette solution partielle?» "Cette solution partielle engendre quels problèmes pour le niveau suivant dans le graphe?", Fig. 3.

Le problème nuisible nécessite de poser cette question: «Quel problème de niveau suivant du graphe cause ce problème?».



Figure 2. CONVERSION DU PROBLEME EN SOLUTION PARTIELLE DANS L'EXEMPLE

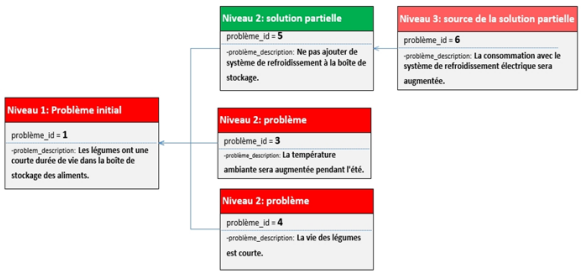


Figure 3. GRAPHE DE PROBLEMES INVERSE DE L'EXEMPLE LORS DE LA PREMIERE ITERATION

Étape 5 : Extraire la contradiction : Cette étape consiste à extraire les contradictions à résoudre du system. Dans chaque itération, une seule contradiction peut être traitée. Le cadre pointé montre la contradiction extraite dans cet exemple d'application Fig 3.

Étape 6 : Attribuer des paramètres appropriés aux contradictions : pour chaque problème et solution partielle de la contradiction, une association avec des paramètres d'action et d'évaluations est appliquées. Cette première itération est illustrée Fig. 4.

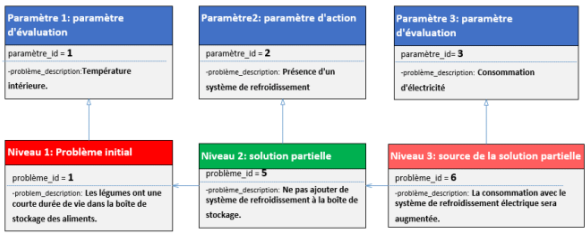


Figure 4. ATTRIBUTION DES PARAMETRES DU CAS D'ETUDE

Pour des raisons de confidentialité nous ne pouvons pas aller plus dans notre présentation de la solution à ce problème.

IV. CONCLUSION

Dans le cadre de cette étude, nous avons analysé une large part de la littérature quant aux méthodes existantes pour la formulation des problèmes en conception inventive. De nombreux chercheur convergent vers le constat que ces méthodes sont chronophages notamment lors de la collecte d'informations. Une large part de ces actions de modélisation de la problématique est inutiles pour la suite de l'analyse, ce qui cause un problème de productivité du processus d'innovation voire d'abandon prématuré d'une étude par démotivation. Pour optimiser le temps d'analyse des problèmes, nous avons utilisé certaines caractéristiques d'autres méthodes étudiées comme la méthode Lean et la méthode ACR(+). Le cas présenté nous permet d'émettre l'hypothèse que cette nouvelle approche nommée "Graphe de Problèmes Inverse" augmente l'agilité du processus de conception inventive.

Des études complémentaires sont nécessaires pour approfondir la méthode proposée et la rendre ainsi plus robuste tout comme conforter l'hypothèse émise dans le paragraphe précédent. Une autre perspective de notre travail consiste à intégrer cette méthode dans un processus pour relier la contradiction extraite à la phase de résolution en utilisant la méthode TRIZ. Nous travaillons aussi au développement d'un script pour contribuer à l'automatisation de notre méthode via un processus d'apprentissage supervisé.

V. REFERENCES

[1] I. M. Ilevbare, D. Probert, et R. Phaal, « 1.A review of TRIZ, and its benefits and challenges in practice », Technovation, vol. 33, no 2‑3, p. 30‑37, févr. 2013, doi: 10.1016/j.technovation.2012.11.003.

[2] M. Hanifi, H. Chibane, R. Houssin, et D. Cavallucci, « Improving Inventive Design Methodology's Agility », in New Opportunities for Innovation Breakthroughs for Developing Countries and Emerging Economies, vol. 572, R. Benmoussa, R. De Guio, S. Dubois, et S. Koziołek, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2019, p. 216‑227.

[3] H. Chen et R. Taylor, « Exploring the impact of lean management on innovation capability », in PICMET '09 - 2009 Portland International Conference on Management of Engineering & Technology, Portland, OR, USA, août 2009, p. 826‑834, doi: 10.1109/PICMET.2009.5262042.

[4] D. Cavallucci et I. Strasbourg, « From TRIZ to Inventive Design Method (IDM): towards a formalization of Inventive Practices in R&D Departments », p. 2, 2012.

[5] T. Chinkatham et D. Cavallucci, « On Solution Concept Evaluation/Selection in Inventive Design », Procedia Eng., vol. 131, p. 1073‑1083, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.425.

[6] C. Zanni-Merk, D. Cavallucci, et F. Rousselot, « Use of formal ontologies as a foundation for inventive design studies », Comput. Ind., vol. 62, no 3, p. 323‑336, avr. 2011, doi: 10.1016/j.compind.2010.09.007.

[7] D. Cavallucci, « Designing the Inventive Way in the Innovation Era », in An Anthology of Theories and *Models of* Design, A. Chakrabarti et L. T. M. Blessing, Éd. London: Springer London, 2014, p. 237‑262.

[8] M. Koripadu et K. V. Subbaiah, « 2.Problem Solving Management Using Six Sigma Tools & Techniques », vol. 3, no 2, p. 3, 2014.

[9] K. C. Wong, K. Z. Woo, et K. H. Woo, « Ishikawa Diagram », in Quality Improvement in Behavioral Health, W. O'Donohue et A. Maragakis, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2016, p. 119‑132.

[10] « Application-Of-Fishbone-Diagram-To-Determine-The-Risk-Of-An-Event-With-Multiple-Causes.pdf ». .

[11] C. Dobrusskin, « On the Identification of Contradictions Using Cause Effect Chain Analysis », Procedia CIRP, vol. 39, p. 221‑ 224, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.01.192.

[12] D. Gîfu, M. Teodorescu, et D. Ionescu, « *(5Whys) Design of a Stable System by Lean Manufacturing », Int. Lett. Soc. Humanist. Sci., vol. 28, p. 61‑ 69, mai 2014, doi: 10.18052/www.scipress.com/ILSHS.28.61.

[13] M.-G. Lee, L. Chechurin, et V. Lenyashin, « Introduction to cause-effect chain analysis plus with an application in solving manufacturing problems », Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 99, no 9‑ 12, p. 2159‑ 2169, déc. 2018, doi: 10.1007/s00170-018-2217-1.

[14] O. Y. Abramov, « *TRIZ-BASED CAUSE AND EFFECT CHAINS ANALYSIS VS ROOT CAUSE ANALYSIS », p. 8.

[15] B. Zlotin et A. Zusman, « TRIZ Software for Creativity and Innovation Support », 2013, doi: 10.1007/978-1-4614-3858-8.

[16] Valeri Souchkov, « Application of Root Conflict Analysis (RCA+) to formulate inventive problems in the maritime industry », 51 Sci. J. Marit. Univ. Szczec., vol. 123, no 51, 2017, doi: 10.17402/225.

[17] V. V. Souchkov, « 1.A Guide to Root Conflict Analysis (RCA+) », p. 26.

[18] V. Souchkov et R. Hoeboer, « TRIZ IN BUSINESS: APPLICATION OF RCA+ TO IDENTIFY AND SOLVE CONFLICTS RELATED TO BUSINESS PROBLEMS », p. 8.

[19] L. Fiorineschi, F. S. Frillici, et P. Rissone, « 3.A Comparison of Classical TRIZ and OTSM-TRIZ in Dealing with Complex Problems », Procedia Eng., vol. 131, p. 86‑ 94, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.350.

[20] N. Becattini, G. Cascini, et F. Rotini, « 3.OTSM-TRIZ Network of Problems for Evaluating the Design Skills of Engineering Students », Procedia Eng., vol. 131, p. 689‑ 700, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.356.

[21] N. Becattini, G. Cascini, et F. Rotini, « 3.An OTSM-TRIZ Based Framework Towards the Computer-Aided Identification of Cognitive Processes in Design Protocols », in Design Computing and Cognition ’14, J. S. Gero et S. Hanna, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2015, p. 99‑ 117.

[22] D. Cavallucci, F. Rousselot, et C. Zanni, « 1.Initial situation analysis through problem graph », CIRP J. Manuf. Sci. Technol., vol. 2, no 4, p. 310‑ 317, janv. 2010, doi: 10.1016/j.cirpj.2010.07.004.

[23] A. Howladar et D. Cavallucci, « 1.Analysing complex engineering situations through problem graph », Procedia Eng., vol. 9, p. 18‑ 29, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.03.097.

[24] A. Souili, D. Cavallucci, F. Rousselot, et C. Zanni, « Starting from Patents to Find Inputs to the Problem Graph Model of IDM-TRIZ », Procedia Eng., vol. 131, p. 150‑ 161, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.365.

Interopérabilité « *plug and play* » dirigée par les modèles

Apprentissage des modèles de transformation

Quentin Brilhault
Arts et Métiers, LISPEN, HESAM Université
2 Cours des Arts et Métiers
Aix-en-Provence – France
quentin.brilhault@ensam.eu

Esma Yahia et Lionel Roucoules
Arts et Métiers, LISPEN, HESAM Université
2 Cours des Arts et Métiers
Aix-en-Provence – France
esma.yahia@ensam.eu
lionel.roucoules@ensam.eu

Résumé— L'arrivée des systèmes cyber-physiques et des objets connectés contribue à accroître la complexité technique permettant l'intégration et la collaboration des systèmes d'information. Cet environnement numérique hautement hétérogène, sujet à des évolutions perpétuelles, impose aux entreprises d'améliorer leurs capacités à s'adapter aux changements et à étendre rapidement et efficacement leur organisation numérique de manière flexible et agile. Dans un contexte industriel en pleine mutation, d'un point de vue économique, technique et organisationnel, assurer et maintenir la continuité numérique de l'information à tous niveaux de l'entreprise est un défi d'envergure. Pour répondre aux besoins d'agilité, de flexibilité et de réactivité imposés par l'Industrie du Futur, une approche « plug and play » qui s'affranchit des normes et des standards définis semble être la solution pour promouvoir une interopérabilité durable des systèmes. Cet article présente les prémices de notre approche, qui consiste à coupler les méthodes de l'Interopérabilité Dirigée par les Modèles avec les technologies du Machine Learning pour l'apprentissage automatique des transformations de modèles et ainsi garantir l'interopérabilité des modèles.

Mots-clés— Continuité Numérique, Interopérabilité « plug and play », Interopérabilité Dirigée par les Modèles, Apprentissage des modèles de transformation

I. INTRODUCTION ET PRINCIPES DE BASE

A. Continuité numérique : un besoin

Le monde est constamment en mouvement, les pratiques changent et les technologies ne cessent d'évoluer. A l'heure de l'industrie hyperconnectée, agile, flexible et évolutive, la continuité numérique entre les objets qui composent le Système d'Information d'Entreprise (SIE) constitue la pierre angulaire d'une industrie compétitive. Disposer de l'intégralité des données tout au long du cycle de vie d'un produit et garantir l'accès à des informations fiables et constamment réactualisées répondent aux exigences d'agilité, de réactivité et d'efficacité imposées par l'Industrie du Futur.

Le principe de continuité numérique de l'information transcende les silos traditionnels de la connaissance. Par essence, la continuité numérique nécessite de relier les données provenant de domaines d'activités différents et de sources d'information très diverses. Cependant, garantir l'exploitation des données issues d'un nombre élevé de systèmes d'information hétérogènes constitue un défi d'envergure depuis plusieurs années. Par exemple, les objets connectés de l'IoT (*Internet of Things*) sont par nature hétérogènes[1] [1]. Les systèmes d'information font également faces à des problématiques d'hétérogénéité des données[2] [2]. La multiplicité des technologies et des formats de données entrave la capacité d'interaction des systèmes en limitant la compréhension et l'interprétation des données partagées. D'autre part, dans un contexte industriel en pleine mutation, le nombre grandissant d'applications distribuées au sein d'une entreprise en raison de la fusion d'entreprises, des restructurations d'organisation, de la sous-traitance ou encore de la prolifération des capteurs, accroît la complexité d'intégrer efficacement ces nouvelles sources de données au SIE préexistant [3]. Viennent s'ajouter aux contraintes techniques, des contraintes organisationnelles imposées par un contexte économique qui pousse les entreprises à accroître leur réactivité, à raccourcir le cycle de leurs processus et proposer des services personnalisés à la demande. Néanmoins, une reconfiguration de la production à la demande, efficace, flexible et agile nécessite au préalable que les composants physiques et logiciels soient parfaitement intégrés au SIE.

De cette mutation profonde de l'industrie, à la fois technique et organisationnelle, découlent des efforts conséquents pour améliorer et accroître la capacité d'interopérabilité des systèmes qui composent le SIE [4]. L'interopérabilité entre les objets connectés, les machines et les systèmes d'information est une composante incontournable des Systèmes Cyber-Physiques (*Cyber Physical Systems* CPS). Les CPS se trouvent aux interstices entre le monde réel et un espace virtuel qui permet de superviser et de synchroniser les activités du monde réel [5].

[1] Les IoT emploient différents protocoles de communication (http, MQTT…) et différents formats de données (XML, JSON…).

[2] Conflits structurels, syntaxiques et sémantiques.

Assurer l'interopérabilité des systèmes hétérogènes est capital pour permettre la continuité numérique et garantir la disponibilité d'une information fiable et actualisée en temps réel à tous niveaux de l'organisation d'une entreprise.

Toutefois, la notion d'interopérabilité n'est pas nouvelle. « L'interopérabilité est la capacité que possède un produit ou un système, dont les interfaces sont intégralement connues, à fonctionner avec d'autre produits ou systèmes existants ou futurs et ce sans restriction d'accès ou de mise en œuvre ». De nombreuses approches tentent d'apporter une solution aux problèmes d'échanges de données entre systèmes hétérogènes. Cependant, ces approches imposent souvent une norme, un commun accord ou encore une technologie particulière pour promouvoir l'interopérabilité (ex : standards d'échange STEP…). Pour nous, l'industrie qui pourra être qualifiée « d'intelligente » sera composée d'une organisation numérique en mesure d'intégrer et d'interconnecter de manière dynamique, « *plug and play* », l'intégralité des systèmes (physiques et numériques) qui la composent.

B. Interopérabilité « plug and play » : des fonctions

Selon Stephen Hawking [6], « la théorie ultime ne fixera aucune limite à la complexité des systèmes que nous pourrons produire, et c'est de cette complexité que viendront les progrès dans le prochain millénaire » ; c'est pourquoi aujourd'hui nous devons composer avec cette complexité, sans vouloir la brider par des standards, des normes ou des technologies spécifiques. L'état d'interopérabilité sera atteint lorsque l'intégralité des systèmes qui composent le SIE, malgré leur hétérogénéité, seront capables d'échanger, de recevoir et d'utiliser les informations reçues.

Un système « *plug and play* » est une solution permettant de relier rapidement et automatiquement les systèmes (physiques et numériques) entre eux, de sorte à promouvoir leur interactivité (Figure 1). Les spécifications d'un tel système sont en parties dressées par Panetto et al. [7]. Dans leur article, ils présentent les exigences que doivent respecter la Nouvelle Génération de Système d'Information d'Entreprise (NG SIE), pour pallier aux contraintes liées à la complexification des systèmes et des processus, et ainsi répondre aux impératifs d'agilité, de flexibilité et d'évolutivité. Voici les fonctions étroitement liées aux propriétés de la NG SIE que nous avons adaptées pour caractériser notre système « *plug and play* » :

- *Fonction interfacer :* dans un environnement numérique qui mute sans cesse, l'ajout, le retrait ou encore la modification des systèmes sont autant de scénarios qui ne doivent pas compromettre le fonctionnement global. Cette fonction concerne l'habileté à connecter n'importe quel système, qu'il soit physique ou numérique, quelle que soit la technologie employée et la représentation syntaxique et sémantique de la donnée. Cette fonction permet d'afficher et de reconnaitre les interfaces (physique, protocole de communication, syntaxe et sémantique) d'un système vers un autre.

  Exemple : un capteur de température affiche sa connectique USB dans un format 8Bit pour diffuser la température. Un modeleur CAO affiche son modèle de données (complétement ou partiellement) via des API syntaxiques et sémantiques reconnues par les autres systèmes.

- *Fonction relier (« mapping »)* : dans un environnement numérique collaboratif, le partage de connaissances entre les systèmes est fondamental pour faciliter leurs interactions via les interfaces. La notion de mise en relation (i.e. *mapping*) consiste à créer des liens, des relations syntaxique et sémantique entre les données de plusieurs modèles. Une mise en relation entre les concepts de chaque modèle est nécessaire pour garantir la compréhension des messages échangés [8]. Cette mise en relation peut être « faible » (on sait qu'il existe un lien mais qui n'est pas formalisé) ou « fort » qui permettrait de propager les évolutions d'un modèle vers les autres.

  Exemple : la même information est représentée par des syntaxes et des concepts différents d'un modèle à l'autre. Le mappage $M_{1\to2}$ relie l'élément E_1 du modèle vert partagé à l'élément E_2 du modèle bleu partagé.

- *Fonction propager* : constater et propager l'impact du changement d'une donnée sur une autre. Ceci est l'essence même de la continuité numérique. Cette dernière notion fait directement écho à la propagation des changements inter modèles [9]. Les mécanismes de changement peuvent être « faible » (simple alerte) ou « forte » (évolution formelle des modèles) en adéquation avec le niveau de mise en relation.

  Exemple (changement inter modèles) : la modification de l'élément E_1 du modèle vert partagé entraîne le changement d'état de l'élément E_2 du modèle bleu partagé ($P_{1\to2}$).

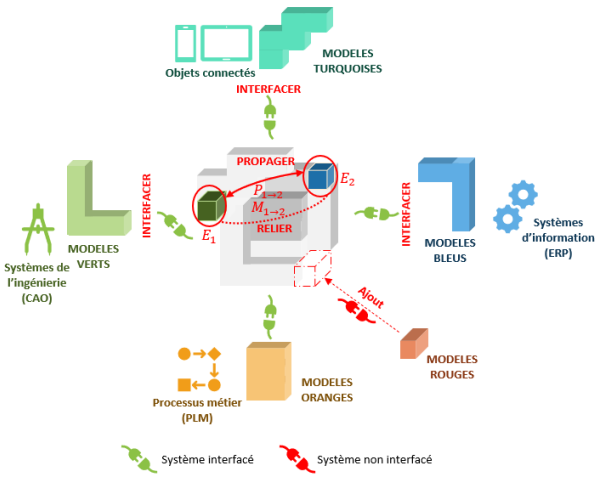


Figure 1 : ANALYSE FONCTIONNELLE DU SYSTEME « *PLUG AND PLAY* »

Pour résumer, notre fonction principale d'interopérabilité repose sur la capacité (1) d'interfacer les modèles de données les uns avec les autres ; (2) mettre en relations les données des différents modèles ; (3) propager les changements de données inter modèles.

Par exemple, le modèle rouge (Figure 1) représente un nouveau système à intégrer à notre fédération. (1) la syntaxe et la sémantique du modèle rouge sont reconnues ou apprises par le système ; (2) des liens de mise en relation (*mapping*) sont tissés entre les éléments du modèle rouge et les éléments des modèles connus par le système ; (3) une fois les données entre modèles reliées, la propagation des données peut avoir lieu, et par extension la continuité numérique sera assurée.

C. *Approche proposée et question de recherche*

Comme présenté dans la section précédente, notre défi consiste à rendre interopérables les systèmes qui, par défaut, ne sont pas compatibles. L'approche *Model Driven Architecture* (MDA) [10] constituera la base de nos travaux pour assurer l'interopérabilité des modèles [11] de données et permettre la continuité numérique entre les systèmes d'information hétérogènes [12], [13]. Nous n'aborderons pas dans ce papier la comparaison avec d'autres approches (ontologies…). Les techniques de transformation de modèle constituent la pierre angulaire de l'approche MDA. Elles permettent de transformer un modèle de données source dans un domaine de connaissances spécifiques en un modèle de données cible dans un domaine de connaissances particulier. Cela correspond bien aux fonctions présentées dans la Figure 1.

La Figure 2 présente la réalisation des fonctions de la Figure 1 sous le point de vue de l'Ingénierie Dirigée par les Modèles [14].

1) *Problématique*

Garantir l'interopérabilité entre les modèles de données est une tâche ardue. Une mise en relation entre les concepts de chaque modèle est nécessaire pour garantir la continuité numérique. Or, la prolifération des langages de modélisation complexifie grandement leurs capacités à s'interconnecter convenablement. De nombreux modèles de données existent et chacun d'eux possède une syntaxe de modélisation particulière. Des conflits syntaxiques entravent la transformation d'un modèle d'un domaine de connaissances en un autre. D'autre part, écrire les règles de transformation qui lient un modèle source à un modèle cible est très coûteux en temps et nécessite des compétences spécifiques à la fois dans les domaines modélisés et dans le langage de programmation des règles.

Ces règles de transformation descriptives, « *ad-hoc* » ne répondent pas aux besoins d'agilité et de flexibilité énoncés par l'Industrie du Futur puisqu'elles entraînent une perte de réactivité conséquente lors de leurs écritures. De plus, des efforts considérables sont demandés pour décrire et maintenir les modèles de transformation en état de fonctionner dans un environnement industriel hautement hétérogène, qui ne cesse de croître et de se complexifier en fonction des avancées technologiques.

De nombreuses barrières technologiques inhibent la capacité des entreprises à s'adapter, à intégrer et à étendre efficacement et rapidement leur organisation numérique. Il est crucial de s'interroger sur les méthodes qui permettront d'aboutir à une interopérabilité à la demande, *plug and play*, pour assurer la continuité numérique de l'information à travers l'ensemble des postes de travail d'une entreprise et minimiser les temps de réaction liés à l'intégration de nouvelles sources d'information.

2) *Question de recherche*

Une approche automatique, permettant de générer de manière autonome les règles de transformation entre les modèles, permettrait alors de répondre aux exigences d'agilité, de flexibilité et d'évolutivité de l'Industrie du Futur. Nos travaux s'inspirent donc des briques mathématiques dressées par Nilsson et al. [15] qui visent l'apprentissage automatique du mappage entre les concepts des modèles de données, à l'aide des techniques du *machine learning*. Peut-on utiliser des techniques d'apprentissage pour augmenter l'efficience de création des transformations de modèles ?

II. ETAT DE L'ART

A. *Des modèles de transformation descriptifs*

Suivant les principes dictés par le paradigme de modélisation, un modèle est une représentation abstraite de la réalité. Le métamodèle est, quant à lui, le langage qui décrit comment un objet du monde réel est modélisé. Par conséquent, le modèle est dit conforme à son métamodèle.

La transformation des modèles est l'élément central de l'approche MDA (Figure 2). Elle permet de transformer un modèle source et sa syntaxe en un modèle cible dans une toute autre syntaxe.

Exemple : *Les règles de transformation décrivent comment un élément du modèle bleu est transformé en un élément du modèle vert. De cette façon,* la (*Figure 3*) *montre que l'élément A du modèle bleu est transformé en deux éléments B et C dans le modèle vert.*

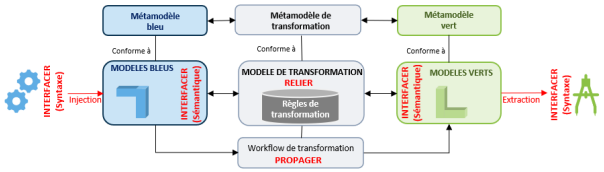


Figure 2 : ARCHITECTURE DIRIGEE PAR LES MODELES



Figure 3 : MAPPAGE ENTRE LES ELEMENTS

Cependant, comme présenté en I.C, la mise en relation des éléments des modèles est une activité qui nécessite une heuristique métier pour lier syntaxiquement et sémantiquement les données. Depuis plusieurs années, différentes approches ont vu le jour et ont pour objectif l'automatisation des modèles de transformation. Une revue

bibliographique ciblée sur l'apprentissage de ces transformations est présentée en II.B.

B. Apprentissage des modèles de transformation

Ecrire la fonction de transformation qui permet, à partir d'un modèle source, d'aboutir à un modèle cible est une activité qui nécessite à la fois des connaissances spécifiques dans les langages de modélisation (domaine du problème) et la connaissance du langage de transformation (domaine de la solution). L'automatisation de ces transformations de modèle reste à ce jour l'un des principaux obstacles qui empêche d'aboutir à l'interopérabilité *plug and play* souhaitée entre les modèles de données.

Initiée par Varró [16], la génération de *modèles de transformation par l'exemple* (*Model Transformation by Example* MTBE) constitue la première approche semi-automatique permettant de déduire, à partir d'un corpus d'exemples (modèles sources et modèles cibles associés), les règles de transformation. Pour cela, un alignement entre les métamodèles source et cible est construit manuellement par l'auteur. Ce mappage entre métamodèles permet de spécifier comment un élément du modèle source est transformé en un élément du modèle cible. Varró montre qu'il est possible de redéfinir automatiquement les règles de transformation après l'analyse des contextes des éléments des modèles sources et cibles. Les règles de transformation générées sont ensuite affinées de manière itérative, de sorte à se rapprocher au maximum du modèle cible souhaité, d'où la notion d'approche « semi-automatique » qui fait intervenir l'humain pour affiner les règles obtenues. L'approche [16] est par la suite implémentée en appliquant les principes de la *programmation logique inductive* [17] pour automatiser la génération de modèles de transformation par l'exemple [18].

Dolques et al. [19] proposent une approche par apprentissage automatique basée sur les méthodes du *machine learning*. Leur démarche suit les principes dictés par l'Analyse Relationnelle de Concepts (*Relational Concept Analysis* RCA) [20] qui permet la classification d'objets en fonction de leurs propriétés. RCA prend également en considération les objets décrits selon leurs relations avec d'autres objets. De ce fait, inférer les règles de transformation revient principalement à trouver les caractéristiques communes partagées par les éléments des modèles source et cible donnés à titre d'exemples. Pour initier leur démarche, un mappage est préalablement réalisé manuellement pour établir les liens de transformation entre les éléments des modèles source et cible. Leur approche est résumée en trois étapes ; (1) la classification des éléments des modèles source et cible ; (2) la classification des liens de transformation préétablis ; (3) l'interprétation des résultats en règles de transformation. *In fine*, la méthode RCA permet de hiérarchiser les règles de transformation inférées au sein d'un treillis pour faciliter leur accès. La démarche proposée par Saasa et al. [21] est dans la continuité des travaux présentés par [19]. Leur étude consiste à générer automatiquement des règles de transformation opérationnelles dans un langage de transformation exécutable par un moteur de règles.

Contrairement aux démarches [16], [18], [19], [21], l'approche initiée par Faunes et al. [22] ne repose pas sur des traces de transformation préalablement définies. Elle emploie des *algorithmes évolutionnaires* pour retrouver la fonction de transformation entre un modèle source et un modèle cible donnés en exemple. L'objectif de cette approche est de générer un programme de transformation déclaratif (exécutable) et réutilisable. A la différence de l'approche illustrée par Saada et al., les règles de transformation générées par Faunes et al. prennent en considération des conditions complexes, permettant de couvrir un plus large spectre de transformations. Suivant les principes établis par la *programmation génétique*, une population initiale de règles de transformation aléatoires évolue sur plusieurs générations par croisements et mutations (opérateurs génétiques), pour se rapprocher de la transformation souhaitée. L'évolution est guidée par une paire de modèles exemples (source et cible) qui donne une indication sur la façon dont la transformation doit se comporter.

Baki et Sahraoui [23] proposent une approche multi-étapes permettant d'apprendre des transformations complexes. La première étape consiste à analyser les liens de transformation (préalablement définis) qui associent les éléments des modèles source et cible donnés en exemple. Ces traces de transformation sont ensuite regroupées par catégories de sorte à réduire l'espace de recherche et à améliorer l'efficacité des algorithmes d'apprentissage. La seconde étape permet, à partir des catégories identifiées précédemment, d'appliquer des *algorithmes génétiques* afin d'associer chaque trace à une règle de transformation qui transforme le mieux les éléments du modèle source en éléments du modèle cible. Pour terminer, l'ensemble des règles sont fusionnées en un seul programme de transformation qui est ensuite affiné à l'aide d'un algorithme de recuit simulé pour améliorer les règles avec des conditions plus complexes.

Les travaux initiés par Burgueno et al.[24] sont ceux qui se rapprochent le plus de notre approche. Ils tirent profit des avancées dans le domaine du *machine learning* en appliquant les méthodes d'apprentissage supervisé, permettant la reconnaissance de patterns. Un algorithme de *machine learning* est capable, à partir d'un corpus de modèles sources et cibles donnés en entraînement, d'apprendre les liens de transformation. Une fois ces liens de transformation appris, l'algorithme est en mesure de prédire (dans notre cas de transformer) de manière autonome un modèle cible à partir du modèle source associé sans générer la moindre règle de transformation. Pour cela, Burgueno et al. emploient la méthode *LSTM* (*Long Short-Term Memory*) [25] une extension des réseaux de neurones, qui a pour propriété une mémoire à long terme. De cette façon, la mémoire à long terme de l'algorithme LSTM détient la capacité de se souvenir des mappages précédemment établis pour édifier des mappages plus complexes.

C. Discussion

Dans la plupart des travaux présentés en II.B, l'approche MTBE repose essentiellement sur les liens de transformation préétablis entre les éléments des modèles source et cible. Une heuristique métier est obligatoire pour définir un tel mappage. D'autre part, comme souligné par Burgueno et al. [24] la majeure partie des propositions visent 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, le manque d'automatisation est une lacune significative qui incombe au développement d'un système doté d'une interopérabilité dynamique, à la demande, *plug and play*.

Pour pallier ce manque d'automatisation, nous proposons une approche par apprentissage automatique des modèles de transformation. Notre approche consiste à inférer, grâce aux réseaux de neurones artificiels, les liens qui relient les concepts d'un modèle A aux concepts d'un modèle B pour générer automatiquement un modèle de transformation. *In fine*, nous voulons que la fonction de transformation apprise soit réutilisable et applicable de manière autonome et automatique, quels que soient les modèles à transformer.

Une variante prometteuse des réseaux de neurones artificiels (*Artificial Neural Network* ANN) appliquée aux graphes (*Graph Neural Network* GNN) [26] permet, à partir de la représentation vectorielle des nœuds et des arêtes qui composent le graphe [27], de raisonner et de découvrir de nouvelles connaissances [28]. Dans un graphe, chaque nœud est défini par ses propres caractéristiques et par les nœuds qui lui sont rattachés. Contrairement à l'ANN classique, l'objectif du GNN est d'apprendre et de caractériser vectoriellement les informations contenues dans chaque nœud en prenant également en considération les informations des nœuds de son voisinage.

Le GNN offre de nouvelles perspectives concernant la prédiction de liens entre les concepts des modèles, notamment grâce à l'une de ses extensions, le *Relational Graph Convolutional Networks* (R-GCN) [29] qui permet de prédire les liens manquants entre les nœuds. Des approches similaires appliquées aux graphes de données appelées *Entity Matching* permettent de déterminer si deux nœuds (entités) appartenant à deux graphes de données distincts représentent le même objet dans le monde réel [30]. Ramené au paradigme des transformations de modèle, cela revient à établir des relations entre les éléments de deux modèles syntaxiquement différents rattachés chacun à un domaine de connaissance particulier.

Les récentes avancées dans les domaines de l'intelligence artificielle (tout particulièrement concernant les techniques d'apprentissage machine) et des graphes de connaissances sont autant de pistes à explorer pour atteindre nos objectifs : assurer l'interopérabilité des modèles par l'apprentissage des modèles de transformation.

III. PROPOSITION

Nos travaux porteront pour commencer sur l'étude et la réalisation de la *fonction relier* de notre système *plug and play* (décrite en I.B). Notre objectif consiste à établir de manière automatique les relations (le « *mapping* ») syntaxiques et sémantiques entre les éléments qui composent les différents modèles.

Suivant les principes de l'approche MDA, la transformation des modèles permet, à partir d'un modèle source, d'aboutir à un modèle cible en reliant les concepts de ces deux modèles par des règles de transformation qui décrivent comment un élément du modèle source est converti en un élément du modèle cible. Depuis plusieurs années, de nombreuses approches visent à automatiser la création de ces relations qui lient les éléments entre eux. Notons l'approche [31] qui consiste à établir les relations de correspondance entre les ontologies en attribuant à chaque mot un vecteur. En II.C nous avons introduit les techniques d'apprentissage appliquées aux graphes de connaissances et les techniques de « *matching* » permettant de tisser des liens entre les éléments des graphes. Nous avons ensuite présenté les prémices de notre approche qui consiste, grâce aux récentes avancées dans le domaine du *machine learning*, à inférer automatiquement les relations qui lient les éléments d'un modèle source aux éléments d'un modèle cible. En d'autres termes, nous visons l'automatisation des modèles de transformation par l'apprentissage. Cependant, Burgueno et al. [24] soulignent toute la complexité liée à l'apprentissage des modèles de transformation qui nécessite un nombre important de modèles d'entrainement.

Pour parfaire cet apprentissage, nous allons utiliser, comme convenu par l'approche MTBE, un modèle source et son modèle cible associé parfaitement transformé. A titre d'exemple, nous utiliserons lors de nos travaux la transformation bien connue Class2Relational [32]. La Figure 4 illustre dans les grandes lignes les expérimentations que nous allons mener.

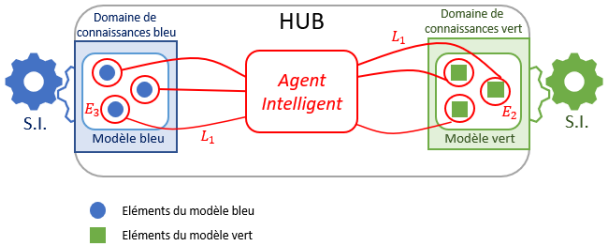


Figure 4 : APPROCHE PAR APPRENTISSAGE DES TRANSFORMATIONS DE MODELE

Prenons l'exemple ci-dessus, notre agent intelligent s'appuie sur les mécanismes des réseaux de neurones artificiels pour vectoriser les modèles bleu et vert. De cette façon, les éléments des modèles bleu et vert, ainsi que leurs associations, sont caractérisés par un vecteur. Une fois les représentations vectorielles établies, des relations sont créées entre les vecteurs du modèle bleu et les vecteurs du modèle vert. Des liens entre les métamodèles bleu et vert sont ensuite déduits à partir des relations inférées entre les modèles bleu et vert.

Ces relations décrivent la façon dont se comportent les éléments du modèle bleu dans le domaine de connaissance vert (et inversement pour le modèle vert dans le domaine de connaissance bleu). De cette façon, le lien L_1 décrit comment l'élément E_3 du modèle bleu et transformé en un élément E_2 dans le modèle vert (et vice-versa). Les règles de transformation sont ensuite dérivées à partir des liens de correspondance définis par l'agent intelligent.

Notre proposition sera enrichie progressivement au fil de nos futures expérimentations.

IV. CONCLUSION

Récapitulons, la continuité numérique est primordiale pour garantir l'accès à des informations fiables et perpétuellement

actualisées tout au long du cycle de vie du produit et ce, quel que soit le niveau de responsabilité endossée au sein l'organisation. Cependant, promouvoir la continuité numérique, nécessite de faire face à des contraintes techniques (liées à l'explosion du nombre d'objets connectés et à la mise en place des CPS), organisationnelles (liées à une demande accrue d'agilité et de flexibilité) et économiques (liées à un fort besoin de réactivité et de personnification des services).

Dans la partie I.B nous avons présenté les fonctions qui permettent d'accéder pleinement à la continuité numérique de l'information, à savoir les fonctions interfacer, relier et propager. Ces fonctions répondent aux besoins d'une interopérabilité à la demande, *plug and play* entre des systèmes hétérogènes conçus à l'origine pour fonctionner de manière isolée.

Pour répondre aux exigences d'agilité, de flexibilité et d'évolutivité de l'Industrie du Futur, nous proposons une approche basée sur les principes de l'interopérabilité dirigée par les modèles pour pallier les contraintes d'hétérogénéités des systèmes. Nous avons présenté en I.C les barrières technologiques qui nous empêchent d'aboutir à l'interopérabilité des modèles. Nous avons ensuite dressé dans cet article les prémices de notre approche qui se focalise dans un premier temps sur la *fonction relier*. Elle consiste à nouer automatiquement des relations syntaxiques et sémantiques entre les concepts des différents modèles grâce aux réseaux de neurones artificiels.

Nos futures expérimentations porteront sur l'apprentissage automatique des modèles de transformation pour garantir une interopérabilité *plug and play* entre les modèles et ainsi aboutir à la continuité numérique des systèmes.

V. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) et Thales Alenia Space pour le soutien et le financement porté à leurs travaux. Le CNES et Thales Alenia Space accueilleront les démonstrateurs qui découleront de leurs études. Il s'agit d'un cadre exceptionnel pour expérimenter et déployer les technologies de demain.

VI. References

[1] A. Venceslau, R. Andrade, V. Vidal, T. Nogueira, et V. Pequeno, « IoT Semantic Interoperability: A Systematic Mapping Study »:, in *Proceedings of the 21st International Conference on Enterprise Information Systems*, Heraklion, Crete, Greece, 2019, p. 535‑544, doi: 10.5220/0007732605350544.

[2] M. Bala, *Interopérabilité de systèmes hétérogènes : Problématiques et Solutions*, Editions Universitaires Européenes. 2013.

[3] W. He et L. D. Xu, « Integration of Distributed Enterprise Applications: A Survey », *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 10, n° 1, p. 35‑42, févr. 2014, doi: 10.1109/TII.2012.2189221.

[4] A. Zeid, S. Sundaram, M. Moghaddam, S. Kamarthi, et T. Marion, « Interoperability in Smart Manufacturing: Research Challenges », *Machines*, vol. 7, n° 2, p. 21, avr. 2019, doi: 10.3390/machines7020021.

[5] J. Lee, B. Bagheri, et H.-A. Kao, « A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems », *Manuf. Lett.*, vol. 3, p. 18‑23, janv. 2015, doi: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.

[6] S. Hawking, *Brèves réponses aux grandes questions*. Odile Jacob, 2018.

[7] H. Panetto, M. Zdravkovic, R. Jardim-Goncalves, D. Romero, J. Cecil, et I. Mezgár, « New perspectives for the future interoperable enterprise systems », *Comput. Ind.*, vol. 79, p. 47‑63, juin 2016, doi: 10.1016/j.compind.2015.08.001.

[8] S. Vinoski, « It's just a mapping problem », *IEEE Internet Comput.*, vol. 7, n° 3, p. 88‑90, mai 2003, doi: 10.1109/MIC.2003.1200306.

[9] A. Kusel *et al.*, « A Survey on Incremental Model Transformation Approaches », *MoDELS 2013 Workshop*, vol. 1090, p. 4‑13, 2013, doi: CEUR-WS.org.

[10] R. O. M. G. Soley, « Model Driven Architecture », *Object Manag. Group*, p. 12, 2000.

[11] G. Zacharewicz, N. Daclin, G. Doumeingts, et H. Haidar, « Model Driven Interoperability for System Engineering », p. 28, 2020.

[12] C. Agostinho, « Information Models and Transformation Principles Applied to Servitization of Manufacturing and Service Systems Design »:, in *Proceedings of the 2nd International Conference on Model-Driven Engineering and Software Development*, Lisbon, Portugal, 2014, p. 657‑665, doi: 10.5220/0004875206570665.

[13] P. Grace, B. Pickering, et M. Surridge, « Model-driven interoperability: engineering heterogeneous IoT systems », *Ann. Telecommun.*, p. 10, 2015.

[14] M. Iraqi-Houssaini, M. Kleiner, et L. Roucoules, « Model-Based (Mechanical) Product Design », in *Model Driven Engineering Languages and Systems*, vol. 6981, J. Whittle, T. Clark, et T. Kühne, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, p. 548‑562.

[15] J. Nilsson, F. Sandin, et J. Delsing, « Interoperability and machine-to-machine translation model with mappings to machine learning tasks », in *2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Helsinki, Finland, juill. 2019, p. 284‑289, doi: 10.1109/INDIN41052.2019.8972085.

[16] D. Varro, « Model Transformation By Example », *Model Driven Eng. Lang. Syst.*, p. 15, 2006.

[17] S. Muggleton et L. D. Raedt, « INDUCTIVE LOGIC PROGRAMMING: THEORY AND METHODS », *INDUCTIVE Log. Program.*, p. 51, 1994.

[18] Z. Balogh et D. Varró, « Model transformation by example using inductive logic programming », *Softw. Syst. Model.*, p. 18, 2009.

[19] 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.

[20] M. Huchard, M. R. Hacene, C. Roume, et P. Valtchev, « Relational concept discovery in structured datasets », *Ann. Math. Artif. Intell.*, vol. 49, n° 1‑4, p. 39‑76, août 2007, doi: 10.1007/s10472-007-9056-3.

[21] 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.

[22] 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.

[23] 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.

[24] L. Burgueno, J. Cabot, et S. Gerard, « An LSTM-Based Neural Network Architecture for Model Transformations », in *2019 ACM/IEEE 22nd International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS)*, Munich, Germany, sept. 2019, p. 294‑299, doi: 10.1109/MODELS.2019.00013.

[25] S. Hochreiter, Schmidhuber Jürgen, « Long Short Term Memory ». Neural Computation, 1997.

[26] J. Zhou *et al.*, « Graph Neural Networks: A Review of Methods and Applications », *ArXiv181208434 Cs Stat*, juill. 2019

[27] P. Cui, X. Wang, J. Pei, et W. Zhu, « A Survey on Network Embedding », *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol. 31, p. 833‑852, juin 2018, doi: 10.1109/TKDE.2018.2849727.

[28] X. Chen, S. Jia, et Y. Xiang, « A review: Knowledge reasoning over knowledge graph », *Expert Syst. Appl.*, vol. 141, p. 112948, mars 2020, doi: 10.1016/j.eswa.2019.112948.

[29] M. Schlichtkrull, T. N. Kipf, P. Bloem, R. van den Berg, I. Titov, et M. Welling, « Modeling Relational Data with Graph Convolutional Networks », *ArXiv170306103 Cs Stat*, oct. 2017

[30] M. Pershina, M. Yakout, et K. Chakrabarti, « Holistic entity matching across knowledge graphs », in *2015 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, Santa Clara, CA, USA, oct. 2015, p. 1585‑1590, doi: 10.1109/BigData.2015.7363924.

[31] P. Kolyvakis, A. Kalousis, et D. Kiritsis, « DeepAlignment: Unsupervised Ontology Matching with Refined Word Vectors », in *Proceedings of the 2018 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Volume 1 (Long Papers)*, New Orleans, Louisiana, 2018, p. 787‑798, doi: 10.18653/v1/N18-1072.

[32] (Inria) AltanMod Research Group, « Class to relational transformation example », *Class to relational transformation example*. https://www.eclipse.org/atl/atlTransformations/#Class2Relational.

Intégration horizontale au service du PLM : un état de l'art

THOMAS CADORET[1,2], CHRISTOPHE DANJOU[1], JULIEN LE DUIGOU[2]

[1] Département MAGI - Polytechnique Montréal
C.P. 6079, succ. Centre-ville, Montréal, QC H3C 3A7, Canada
thomas.cadoret@polymtl.ca, christophe.danjou@polymtl.ca

[2] Université de technologie de Compiègne, Roberval (Mechanics energy and electricity),
Centre de recherche Royallieu - CS 60 319 - 60 203 Compiègne Cedex, France
thomas.cadoret@utc.fr, julien.le-duigou@utc.fr

Résumé*— Depuis une décennie nous observons une transformation des moyens de production laissant penser une quatrième révolution industrielle : l'Industrie 4.0** [1]**. Cette évolution se démarque en encourageant la connectivité au sein des sites de production, ainsi qu'une volonté de transfert d'intelligence vers les systèmes de production avec une prise de décisions décentralisée. L'Industrie 4.0 fait écho à la volonté du client d'une grande personnalisation des produits dans des délais très courts. Dans ce contexte, il est primordial d'intégrer au mieux les différents acteurs de l'ensemble du cycle de vie du produit. Il est important de prendre en compte les informations de conception pour une fabrication possible, et les informations d'utilisation, les constantes du produit pour assurer une maintenance prédictive. Ces informations, que l'on trouve tout au long du cycle de vie, peuvent permettre une production plus intelligente. Pour cela, il s'agit d'assurer l'interopérabilité entre les différents acteurs présents dans ce cycle de vie, au sein de la Gestion du Cycle de Vie du Produit (Product Lifecycle Management : PLM). Nous allons voir les différents standards permettant un transfert de l'information entre ces différents acteurs, de la conception à la fabrication, de l'utilisation à la fabrication, ou encore un retour d'informations pour une conception optimisée. Nous verrons également en quoi les ontologies permettent une interopérabilité accrue, permettant une représentation du produit grâce à des données hétérogènes de provenances diverses.

***Mots-clés*— industrie 4.0, intégration horizontale, PLM, ontologie, interopérabilité**

I. INTRODUCTION

Le concept d'Industrie 4.0, vu comme la quatrième révolution industrielle, a été initialement proposé pour développer l'économie allemande en 2011 [1]. Tandis que la troisième révolution pouvait être définit comme l'automatisation et la robotisation des chaines de production, la quatrième, quant à elle, vise à rendre cette production de plus en plus agile et personnalisée, en s'appuyant sur le développement de la connectivité entre systèmes, et l'intégration du numérique au sein de ces systèmes. Des technologies comme les systèmes cyber-physiques sont utilisées afin d'encourager la prise de décision décentralisée, et des paradigmes comme l'IoT (Internet of Things) permettent la capitalisation de plus en plus de données provenant du produit, ainsi que de tous les acteurs impliqués de sa conception à son utilisation. On assiste à une émergence de grandes quantités de données hétérogènes, variantes au niveau du fond comme de la forme. L'industrie 4.0, par le développement de système de production intelligents, permet une capitalisation de la donnée produite lors des phases de fabrication, mais également une utilisation simplifiée de la donnée provenant des phases amont et avales du cycle de vie du produit.

Le cycle de vie caractérise l'ensemble des étapes par lesquelles passera le produit manufacturé, allant de la conception à l'utilisation et au recyclage. Le cycle de vie des produits comporte généralement sept étapes principales : étude de marché ; conception du produit ; fabrication du produit ; marketing ; utilisation du produit ; service après-vente ; et recyclage. Chaque étape et activité implique une connaissance tacite et explicite différente du produit [2]. Partant de ce principe, il va être nécessaire de maitriser l'échange d'informations entre ces différentes étapes, en encouragement le Product Lifecycle Management (PLM). Le PLM est une stratégie d'entreprise qui définit l'intégration de différents types d'activités, d'un point de vue technique, organisationnel et managérial [3]. [4] définit la gestion du cycle de vie des produits (PLM) comme suit : "un modèle axé sur le cycle de vie du produit, soutenu par les Technologies de l'Information et de la Communication, dans lequel les données relatives au produit sont partagées entre les acteurs, les processus et les organisations au cours des différentes phases du cycle de vie du produit afin d'atteindre les performances et la durabilité souhaitées pour le produit et les services connexes". Son but premier est d'améliorer la collaboration entre tous les acteurs impliqués tout au long du cycle de vie des produits. Il va s'agir de réduire le délai de mise sur le marché et le coût des produits tout en améliorant leurs qualités [5]. Le cycle de vie est, plus généralement, scindé en 3 parties : Le Beginning-of-Life (BOL), Middle-of-Life (MOL) et l'End-of-Life (EOL) [6]. Le BOL va concerner les premières étapes du cycle de vie jusqu'à la production. Les principales informations échangées seront alors des données de CAO, FAO, ainsi que toutes données destinées à la planification de la production. Le MOL, quant à lui, concerne l'usage du produit ainsi que la maintenance, et concerne également toutes les étapes intermédiaires comme le transport de ce produit. Enfin l'EOL, qui concerne lui le

recyclage, la réutilisation du produit ou des éléments le composant, des matériaux [6]. Il existe une grande hétérogénéité des données au niveau du cycle de vie produit. La question qui en résulte est : Comment assurer l'interopérabilité horizontale au travers du cycle de vie d'un produit ? Comment notamment assurer une interopérabilité sémantique de la conception à la fabrication, puis de la fabrication à l'utilisation, voire au recyclage du produit ? Et comment enrichir la donnée produit grâce aux informations ? Pour répondre à cette question, cet article propose au travers d'une revue de la littérature une analyse des solutions existantes.

Dans la section 2, nous abordons l'interopérabilité entre les systèmes au début de vie du produit. Dans la section 3, les différents standards de communication sont présentés comme une solution à l'intégration des systèmes intervenant au milieu et à la fin de vie du produit. Dans la section 4, les différentes ontologies dérivées des standards sont présentées, permettant l'intégration des systèmes d'information. La section 5 présente les ontologies comme solution pour l'échange d'informations logistiques pour le MOL et l'EOL. Enfin, la section 6 conclue en proposant d'élargir l'utilisation de ces ontologies afin d'associer intégration horizontale et intégration verticale, qui concerne la production et les informations provenant de la gestion des ressources, de la planification de production, ou encore du statut des machines de production.

II. L'INTEROPERABILITE ENTRE LES ACTEURS DU BOL

L'un des principaux enjeux d'une approche PLM efficace est la capacité à réaliser une interopérabilité totale entre tous les systèmes d'information couvrant le cycle de vie des produits [5]. Pour assurer une interopérabilité, trois niveaux d'interopérabilité doivent être satisfaits : Une interopérabilité technique, une interopérabilité sémantique, et une interopérabilité organisationnelle [5]. Afin d'obtenir une interopérabilité sémantique, le recours à l'utilisation de standards est souvent préconisé [7].

Le BOL d'un produit va comprendre des données concernant les demandes client, les spécifications de conception, les informations des fournisseurs, et les informations de production [8]. STEP, ou norme ISO 10303, standard d'échange de données, et STEP-NC, normalisé à travers la norme ISO 14649, un standard dérivant du STEP, permettent une intégration tout au long du BOL d'un produit de la chaine numérique d'automatisation CAO-CFAO-CN.

A. STEP (ISO 10303)

Le STandard d'Echange de données Produit (STEP) est un standard développé pour la description et l'échange de données produit sensé être interprétable par l'ensemble des systèmes informatiques ayant un rôle dans le PLC. Son but premier fut d'améliorer l'interopérabilité entre entreprises manufacturières afin d'augmenter la productivité. Le Standard STEP comporte plus d'une centaine de partie afin de décrire l'ensemble des types de produits, mais également chaque produit de chaque domaine (naval, électronique, …). Les protocoles d'application (AP) représentent la spécification des données applicables de STEP. Les protocoles d'application les plus utilisés sont par exemple AP242 (Données pour les processus de conception) et AP239 (Support du cycle de vie des produits). Ces protocoles d'application se concentrent principalement sur la gestion des données de produits et les informations géométriques.

Des propositions sont faites afin d'enrichir STEP. [9] proposent une solution pour relier les résultats obtenus lors de l'inspection d'une pièce avec les données générées dans les systèmes CAO/FAO/CNC respectant la norme STEP. [10] étudient la possibilité de création d'un méta-modèle pour l'intégration de EXPRESS (langage utilisé par STEP) et de l'UML.

B. STEP-NC (ISO 14649)

Le STEP-NC, pour STEP-Numerical Control, est également un standard d'échange de données. Ce standard est basé sur STEP, et va permettre une intégration complète pour toute la chaine numérique, concernant la CAO, la FAO, la fabrication (avec l'utilisation de CNC) [11]. L'utilisation de ce standard permet de renforcer l'interopérabilité des systèmes par sa capacité à couvrir les informations de conception et fabrication [12]. Puisque le programme STEP-NC ne contient pas d'informations sur la façon de déplacer les machines, des programmes identiques peuvent être utilisés sur toutes les machines supportant la saisie STEP-NC [13]. Un programme STEP-NC est organisé autour de séquences d'opérations qui s'appuient elles-mêmes sur les entités d'usinage.

Avec l'apparition de ce standard, des travaux ont été réalisés afin permettre une interopérabilité entre les phases de conception et de production. Par exemple, [14] explorent la planification des processus, et ainsi l'interaction entre les phases d'industrialisation et les phases de production (CAPP/CAM) basée sur STEP-NC et présentent un système prototype CAPP. Grace à la richesse d'information du STEP-NC, et sa capacité à être compréhensible par l'ensemble des acteurs du BOL, des travaux ont été menés afin d'optimiser les différentes phases du BOL en réutilisant la donnée de production. [15] ont proposés un système d'usinage basé sur STEP-NC consistant en une transmission d'informations en boucle fermée et une fonction d'auto-apprentissage. [16] Propose également l'utilisation d'une ontologie afin de tirer parti des systèmes d'informations présents dans le BOL du produit, dans le but de comparer les données issues de la conception et les données générées par la machine outils et optimiser la conception.

Les standards STEP et STEP-NC permettent une représentation standardisée et uniforme de l'information pour la fabrication du produit de la conception à la fabrication reposant sur un modèle unique. Les différentes stratégies d'usinage sont prises en compte dès la conception. Les programmes d'usinages peuvent aussi être transférés d'une machine à l'autre. Ainsi, [14] évoquent que l'utilisation du STEP-NC est un pas important vers la création d'un échange d'informations bidirectionnelle et rend possible une interopérabilité entre processus de fabrication et de planification. Bien que ces standards permettent d'assurer l'interopérabilité sémantique sur les phases du BOL et les applications métiers qui s'y rapportent, ils n'abordent pas les phases de MOL et EOL du produit, et ne sont que difficilement réutilisables par d'autres systèmes. La section suivante étudie les solutions pour l'échange de données et la

structuration de l'information depuis les phases du MOL et EOL.

III. ECHANGE DE LA DONNEE MOL, EOL

Au sein du MOL, la donnée va principalement concerner l'usage du produit, et la surveillance de son comportement intrinsèque, permettant par exemple une maintenance prédictive. Les données produit issues du EOL concernent les informations de démantèlement, du statut du produit (concernant la durée de vie des composants par exemple), ou bien les informations sur les éléments recyclables [8]. Les phases du MOL et EOL génèrent ainsi des données pertinentes pour améliorer la conception et la production des produits à posteriori.

A. IoT

L'Internet of Things (IoT, ou Internet des objets), est un paradigme apparut avec le développement d'internet et des technologies de systèmes embarqués. L'IoT permet non seulement de doter les systèmes et produits de données, mais permet aussi de connecter les systèmes et produits afin qu'ils puissent partager cette donnée avec les systèmes environnants. En permettant la coopération des technologies sans fil, l'IoT est un accélérateur de la quatrième révolution industrielle [17]. L'IoT fait donc référence à l'établissement de connexions intelligentes entre différentes personnes, machines, tâches et connaissances en utilisant internet et des capteurs [18]. Le concept de l'IoT fait généralement référence à l'établissement de connexions intelligentes entre différentes personnes, les machines, les tâches et les connaissances en utilisant internet et les capteurs [19][20].

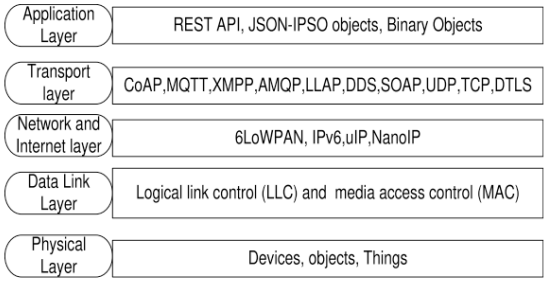


Figure 1 : Architecture de l'IIoT [17]

On appelle Industrial Internet of Things l'application de l'IoT au domaine industriel pour l'interconnexion des capteurs, des systèmes industriels. Des études ont été menées tant dans les universités que dans l'industrie sur les technologies IoT industrielles, telles que la connectivité des machines, les normes de communication, les architectures de services et les modèles commerciaux [21][22][23]. L'IIoT se compose de 5 couches (Figure 1). On s'intéresse à la couche transport car elle présente les standards pour favoriser la communication et la structuration des données entre les systèmes. De nombreux protocoles de communication existent (MQTT, CoAP, …), ainsi que de nombreuses technologies disponibles (Bluetooth, WiFi, ZigBee, 6LoWPAN, …), dont certains résumés dans la Figure 1. Depuis l'apparition de l'IIoT, de nombreux travaux tentent de corriger les faiblesses de ces protocoles. [24] proposent l'utilisation du protocole de communication LoRaWAN, un protocole permettant de lier par radio un grand nombre de capteurs sans fil dans les environnements industriels qui doivent être connectés via un réseau fiable et à faible latence, à bas débit. Ce protocole se verra ajouter une time-slotted communications pour devenir TS-LoRaWAN, développé par [24] pour améliorer sa fiabilité et son évolutivité. [17] proposent une solution de bout en bout pour la gestion inverse de la chaîne d'approvisionnement basée sur la coopération entre les différentes normes de communication de l'IoT, permettant la surveillance des stocks de déchets d'équipements électriques et électroniques dans le cloud grâce à des capteurs intégrés. [25], quant à eux, proposent un cadre, et différentes technologies, pour une intégration de l'information permettant une production flexible. Cette intégration passe par l'utilisation de protocoles de communication M2M pour une production collaborative, et par l'utilisation de technologies comme l'RFID pour l'identification et la traçabilité du produit.

B. Protocoles d'échange de données

Les informations sur les produits sont générées pendant toutes les phases du cycle de vie. Au stade de la conception, les informations peuvent être réparties entre plusieurs organisations et sont généralement de différents types. Dans le processus de fabrication, les pièces et les sous-ensembles peuvent être produits par différents fabricants. Pendant le transit du produit, il peut y avoir des données pertinentes recueillies pendant que le produit se trouve entre le fabricant et le client. Lorsque le produit est vendu à un client, la phase d'utilisation commence et le produit alterne entre des phases de travail et des phases de maintenance ou de réparation. Le produit atteint alors sa fin de vie utile et les informations recueillies sont nécessaires pour prendre des décisions telles que la réutilisation ou le recyclage d'un composant [6].
Toutes ces informations sont très hétérogènes, et bon nombre de standards et protocoles de communication existent afin d'échanger cette information. On peut noter certains, tels que MQTT, CoAP, XMPP [26]. L'un d'entre eux, OPC-UA semble s'imposer dans le milieu industriel (c'est notamment le seul protocole de communication à être recommandé par l'architecture RAMI 4.0, architecture synthétisant les orientations et standardisations nécessaires à l'Industrie 4.0), apportant à la fois un protocole de communication et une standardisation de la structuration de la donnée [27].

Différents standards permettent, tout au long du cycle de vie, un échange d'informations entre différents systèmes. Cependant, ces standards d'échange de données ne peuvent être que complémentaires aux modèles pouvant être définis pour structurer l'information produite en MOL et EOL. Un problème se pose lorsqu'il va s'agir d'exploiter ces différents standards afin de trouver des relations, créer des règles, et générer de la connaissance exploitable par l'ensemble des parties prenantes. L'ontologie est considérée comme une solution prometteuse pour organiser l'information et limiter la complexité dans des domaines comme le web sémantique [25]. Dans la suite, les ontologies développées à partir des standards du BOL vus précédemment sont abordées.

IV. Des Ontologies pour une integration des standards du BOL

Afin de transférer cette information entre les différents acteurs, puis entre les différentes étapes du cycle de vie, des standards existent afin non seulement de permettre une représentation commune de l'information, mais aussi une communication entre systèmes. Seulement, malgré le fait que des standards soit présents, il est nécessaire maintenant de les intégrer, afin d'assurer une réelle interopérabilité sémantique horizontale, du début à la fin de la vie du produit. Des solutions au cas par cas concernant les protocoles de communication sont proposées. [28] proposent, par exemple, une utilisation de OPC UA dès la phase de conception, permettant le pilotage de systèmes de production grâce des ordres envoyés et des skills programmés coté systèmes de production. [29] s'intéressent à l'interopérabilité entre OPC UA et les spécifications axés IoT de l'OCF. Ces solutions sont viables, mais ne couvrent que des domaines d'applications précis. Afin de permettre une représentation de l'information et des processus de manière globale, il est possible d'adapter certains standards, comme STEP et STEP-NC, afin de créer des ontologies. Une ontologie est définie comme la spécification formelle de conceptualisations partagées, contenant des concepts, des relations, des instances et des axiomes [30]. [31] proposent, par exemple, une ontologie produit afin de représenter l'ensemble des informations afin de faciliter l'interopérabilité de tous les logiciels d'application qui partagent des informations pendant le cycle de vie du produit. [32], encore, mettent en place PRONOIA2, une ontologie de produit et de processus pour rendre les informations d'assemblage accessibles et exploitables par les systèmes de gestion de l'information et les outils de conception afin de soutenir les activités des concepteurs de produits. [5] propose un état de l'art des modèles et ontologies d'inférence existants dans un contexte de PLM. Différence est faite entre des ontologies d'affaire (qui fournissent une description complète et détaillée du domaine concerné) et des ontologies de phases (qui décrivent l'ensemble du processus). Les ontologies sont alors décrites comme une possibilité d'intégration, et un apport d'intelligence à l'information.

Dans le début de ce papier a été présenté divers standards afin d'harmoniser l'échange d'informations du BOL, MOL et EOL du produit. Nous allons voir maintenant comment des ontologies peuvent être développées à partir des standards STEP et STEP-NC, afin de permettre une interopérabilité sémantique et une réutilisation de l'information, notamment celle générée par les systèmes de production eux-mêmes.

A. OntoSTEP

Le standard STEP se découpe en protocoles d'application (ou fascicules) couvrant un ensemble de domaines. La partie 21 de STEP définit la syntaxe pour représenter les données selon un schéma EXPRESS donné [33]. Seulement, l'utilisation de EXPRESS comme modèle de représentation et la partie 21 de STEP qui définit la syntaxe pour la représentation de la donnée selon un modèle EXPRESS n'est pas adéquat pour ce qui est de l'intégration des données STEP avec d'autres données produit ne respectant pas le standard STEP.

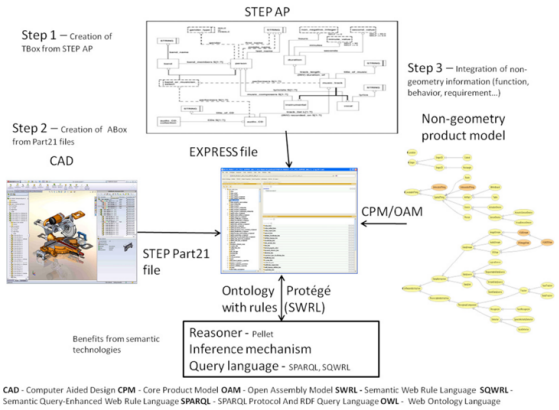


Figure 2 : Construire un modèle sémantique de produit [34]

C'est pourquoi OntoSTEP apporte une traduction du STEP sous forme d'ontologie grâce au langage OWL (Ontology Web Language), permettant de disposer d'une infrastructure d'information qui permet un échange d'informations bien défini entre les participants [34]. OntoSTEP est une étape vers le développement de modèles de produits enrichis sur le plan sémantique (Figure 2). Les modèles sémantiques, dans ce cas, supportent à la fois la représentation des concepts géométriques des produits et des concepts non géométriques, tels que la fonction, le comportement, la justification de la conception, etc. OntoSTEP permet, par exemple, une interopérabilité sémantique entre deux systèmes de CAO.

B. OntoSTEP-NC

Une ontologie basée sur les normes STEP permet une meilleure intégration, pour la conception, de données de provenance diverses, pas forcément sous format STEP, afin d'optimiser cette conception. Dans la première partie, nous avons vu STEP-NC permet les échanges de données entre les différentes solutions logiciels de la chaîne numérique [35]. Ici, l'utilisation d'une ontologie basée sur STEP-NC permet la mise en place d'une stratégie Close Loop Manufacturing, visant à structurer les informations de sorte à favoriser une connexion avec les systèmes d'information, pour exploiter la gestion des connaissances. Cette gestion permet ainsi un retour d'informations des machines-outils à commandes numériques jusqu'aux phases de conception et d'industrialisation, pour une optimisation de celles-ci.
[16], dans ses travaux de recherche, a proposé une telle ontologie, nommée OntoSTEP-NC. OntoSTEP-NC permet une interopérabilité entre systèmes d'information là où STEP-NC permet un échange d'informations au niveau applications métier. Cette ontologie basée sur le standard STEP-NC permet de retrouver les informations nécessaires à la fabrication inclues dans le programme d'usinage. Grace à Onto-STEP-NC, les différents systèmes d'informations du BOL sont intégrés.

Bien que ces ontologies basées sur les standards STEP et STEP-NC permettent l'interopérabilité sur les phases de conception, d'industrialisation et de fabrication, elles ne permettent pas de prendre en compte les données d'autres phases du cycle de vie tels que le transport ou encore

l'utilisation des produits. La section suivante présente les solutions pour l'intégration des connaissances pour les phases du MOL et EOL.

V. Des ontologies pour l'integration de la connaissance MOL/EOL

La donnée récupérable depuis la fabrication ne se limite pas à une donnée utile pour la conception. Grace à l'émergence de l'IoT notamment, il est possible de récupérer des informations lors des phases de MOL et EOL du produit. Concernant les systèmes de production, il est intéressant de récupérer les informations de production pour une maintenance prédictive en MOL du produit, puis comme une aide au démantèlement et à la réutilisation de certaines pièces lors du EOL du produit. La tendance actuelle est le déplacement d'une maintenance corrective vers une Condition-Based Maintenance, dépendant de l'état actuel de la machine. Il est essentiel de saisir les informations issues de la surveillance continue de la santé et d'analyser les données des produits et services au cours de leur cycle de vie [36]. Ainsi, la nouvelle forme de maintenance industrielle est fortement dépendante des capacités de collecte de données du produit et de la machine [37]. Les capteurs embarqués seront au cœur de ce changement, permettant une observation du cycle de vie.

[37] proposent une ontologie adaptée aux capteurs pour soutenir la recherche, le partage et la réutilisation des connaissances lors de la conception d'un service de maintenance. Grace au paradigme de l'IoT, et l'utilisation des Ontologies, il est donc possible de remonter les informations provenant du milieu et fin de vie du produit. [38] s'intéressent au développement de la fabrication additive, et conçoivent une ontologie pour représenter l'ensemble des connaissances extraites de l'ensemble des données générées dans la chaine de valeur de cette fabrication additive. [39], quant à eux, veulent utiliser une ontologie pour répertorier les retours utilisateurs, et ainsi prendre en compte cette connaissance dans la phase de conception. L'ontologie présenté par [40], appelé Semantic Sensor Ontology et développé par le W3C, peut décrire les capteurs en termes de capacités, de processus de mesure, d'observations et de déploiements. Concernant la fin de vie du produit, [41] présentent un système de désassemblage automatisé basé sur l'ontologie afin d'optimiser les opérations de désassemblage.

Face à ces multiples ontologies, il est nécessaire de se poser la question de la connexion entre ces différentes ontologies. [42] proposent par exemple une méthode de réconciliation sémantique utilisant trois approches (le contexte d'ajustement, l'intersection des ontologies et l'alignement sémantique) pour soutenir les relations d'information sémantique tout au long de la conception et de la fabrication du produit.

VI. Conclusion

Au travers cet article, nous avons mis en lumière les différentes étapes du cycle de vie du produit, ainsi que les principaux standards permettant un flux d'information entre les différents acteurs de ce PLC. Une interopérabilité horizontale morcelée entre les différentes étapes BOL, MOL et EOL est présentée. Les standards STEP, pour un échange de données et une communication entre l'ensemble des acteurs du BOL du produit, et STEP-NC, standard dérivé du STEP permettant un pilotage des machines-outils à commande numérique, furent présentés. Concernant les MOL et EOL du produit, davantage de standards existent selon la technologie choisie. Afin de permettre une utilisation plus large des données d'un bout à l'autre du PLC, la réalisation d'ontologies reposant sur ces standards est une solution retenue. D'autres solutions comme l'utilisation d'architectures de références pour la construction de l'information pourraient être le sujet d'une prochaine étude. Ici, l'accent est mis sur les ontologies dérivant directement de standards permettant une interopérabilité concernant la donnée produit.

Des ontologies ont été développées afin de répondre aux problèmes d'interopérabilité de ces standards. OntoSTEP fut développé afin de permettre d'intégrer à des données STEP des données de provenances diverses, hétérogènes, non géométriques. OntoSTEP-NC, quant à lui, fut imaginé pour une meilleure intégration des systèmes d'informations au sein du BOL du produit. Grace à cette ontologie, il est possible de prendre en compte les informations de fabrication lors de la conception. Concernant le milieu et la fin de vie du produit, des ontologies existent afin de représenter la donnée de plus en plus riche grâce à l'IoT.

Seulement, ces ontologies ne sont pas connectées les unes aux autres, ce qui pourrait servir aux systèmes de productions qui seraient en mesure de prendre en compte les informations provenant de part et d'autre du Product Lifecycle. Cela permettrait également un retour d'information des phases d'utilisation et de maintenance aux phases de conception, pour optimiser davantage la conception. Ces différents modèles montrent autant de tentatives de standardisation de la connaissance. Seulement, il est à l'heure actuelle encore difficile de parler d'interopérabilité complète horizontale de la donnée produit, de la conception à l'utilisation. Dans nos futurs travaux, il serait également intéressant de faire le lien avec une intégration plus verticale, concernant la phase de production, et allant de la gestion de ressources à la gestion des données capteurs, pour une production encore plus intelligente.

VII. References

[1] R. Drath and A. Horch, "Industrie 4.0: Hit or Hype? [Industry Forum]," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 8, no. 2, pp. 56–58, 2014.

[2] Y. J. Chen, Y. M. Chen, and H. C. Chu, "Development of a mechanism for ontology-based product lifecycle knowledge integration," *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 2 PART 2, pp. 2759–2779, 2009.

[3] M. Franke, K. A. Hribernik, K. D. Thoben, and C. Hans, "Improving maintenance activities by the usage of BOL data," in *Procedia CIRP*, 2013, vol. 11, pp. 62–67.

[4] S. Terzi, A. Bouras, D. Dutta, M. Garetti, and D. Kiritsis, "Product lifecycle management - From its history to its new role," *Int. J. Prod. Lifecycle Manag.*, vol. 4, no. 4, pp. 360–389, 2010.

[5] V. Fortineau, T. Paviot, and S. Lamouri, "Improving the interoperability of industrial information systems with description logic-based models-The state of the art," *Comput. Ind.*, vol. 64, no. 4, pp. 363–375, May 2013.

[6] D. Kiritsis, "Closed-loop PLM for intelligent products in the era of the Internet of things," *CAD Comput. Aided Des.*, vol.

43, no. 5, pp. 479–501, 2011.
[7] C. Danjou, J. Le Duigou, and B. Eynard, “Closed-loop manufacturing process based on STEP-NC,” *Int. J. Interact. Des. Manuf.*, vol. 11, no. 2, pp. 233–245, 2017.
[8] J. Li, F. Tao, Y. Cheng, and L. Zhao, “Big Data in product lifecycle management,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 81, no. 1–4, pp. 667–684, 2015.
[9] C. I. Riaño Jaimes and A. J. Alvares, “Integrated inspection system step-compliant for the exchange of dimensional metrology data,” *Procedia Manuf.*, vol. 38, no. 2019, pp. 1205–1212, 2019.
[10] F. L. Krause and U. Kaufmann, “Meta-modelling for interoperability in product design,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 56, no. 1, pp. 159–162, 2007.
[11] ISO, “ISO 14649-1:2003 - Industrial automation systems and integration — Physical device control — Data model for computerized numerical controllers — Part 1: Overview and fundamental principles,” 2003. https://www.iso.org/standard/34743.html.
[12] M. Hardwick *et al.*, “A roadmap for STEP-NC-enabled interoperable manufacturing,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 68, no. 5–8, pp. 1023–1037, 2013.
[13] X. W. Xu, L. Wang, and Y. Rong, “STEP-NC and function blocks for interoperable manufacturing,” *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 3, no. 3, pp. 297–307, 2006.
[14] R. Liu, A. Nassehi, R. Allen, and S. T. Newman, “Feature-based process planning for interoperable step-NC manufacture,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 12, no. PART 1, 2006.
[15] H. Po, F. Hongya, H. Zhenyu, and H. Dedong, “A closed-loop and self-learning STEP-NC machining system,” *IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics, AIM*, pp. 1598–1603, 2014.
[16] C. Danjou, “Ingénierie de la chaîne numérique d’industrialisation : proposition d’un modèle d’interopérabilité pour la conception-fabrication intégrées,” 2016. [Online]. Available: https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01376520.
[17] C. Garrido-Hidalgo, T. Olivares, F. J. Ramirez, and L. Roda-Sanchez, “An end-to-end Internet of Things solution for Reverse Supply Chain Management in Industry 4.0,” *Comput. Ind.*, vol. 112, p. 103127, 2019.
[18] J. Wang, M. K. Lim, C. Wang, and M. Tseng, “The evolution of the Internet of Things (IoT) over the past 20 years,” *Comput. Ind. Eng.*, p. 107174, 2021.
[19] L. M. Dang, M. J. Piran, D. Han, K. Min, and H. Moon, “A Survey on Internet of Things and Cloud Computing for Healthcare,” *Electronics*, vol. 8, no. 7, pp. 49–59, 2019.
[20] M. R. Tu, M. K. Lim, and M. F. Yang, “IoT-based production logistics and supply chain system - Part 1 Modeling IoT-based manufacturing IoT supply chain,” *Ind. Manag. Data Syst.*, vol. 118, no. 1, pp. 65–95, 2018.
[21] K. Xu, Y. Qu, and K. Yang, “A tutorial on the internet of things: From a heterogeneous network integration perspective,” *IEEE Netw.*, vol. 30, no. 2, pp. 102–108, 2016.
[22] H. Cai, L. Xu, B. Xu, C. Xie, S. Qin, and L. Jiang, “IOT-based Configurable Information Service Platform for Product Lifecycle Management,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. PP, no. 2, pp. 1–1, 2014.
[23] F. Ghavimi and H. H. Chen, “M2M communications in 3GPP LTE/LTE-A networks: Architectures, service requirements, challenges, and applications,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 525–549, 2015.
[24] D. Zorbas, K. Abdelfadeel, P. Kotzanikolaou, and D. Pesch, “TS-LoRa: Time-slotted LoRaWAN for the Industrial Internet of Things,” *Comput. Commun.*, vol. 153, no. January, pp. 1–10, 2020.
[25] Z. Wu, Z. Meng, and J. Gray, “IoT-Based Techniques for Online M2M-Interactive Itemized Data Registration and Offline Information Traceability in a Digital Manufacturing System,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 13, no. 5, pp. 2397–2405, 2017.
[26] A. Al-Fuqaha, A. Khreishah, M. Guizani, A. Rayes, and M. Mohammadi, “Toward better horizontal integration among IoT services,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 9, pp. 72–79, 2015.
[27] C. Liu, H. Vengayil, Y. Lu, and X. Xu, “A Cyber-Physical Machine Tools Platform using OPC UA and MTConnect,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 51, no. April, pp. 61–74, 2019.
[28] M. Volkmann, T. Legler, A. Wagner, and M. Ruskowski, “A CAD feature-based manufacturing approach with OPC UA skills,” *Procedia Manuf.*, vol. 51, pp. 416–423, 2020.
[29] S. Cavalieri, M. G. Salafia, and M. S. Scroppo, “Towards interoperability between OPC UA and OCF,” *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 15, no. May 2018, pp. 122–137, 2019.
[30] T. R. Gruber, “A translation approach to portable ontology specifications,” *Knowl. Acquis.*, vol. 5, no. 2, pp. 199–220, 1993.
[31] H. Panetto, M. Dassisti, and A. Tursi, “ONTO-PDM: Product-driven ONTOlogy for Product Data Management interoperability within manufacturing process environment,” *Adv. Eng. Informatics*, vol. 26, no. 2, pp. 334–348, 2012.
[32] E. Gruhier, F. Demoly, O. Dutartre, S. Abboudi, and S. Gomes, “A formal ontology-based spatiotemporal mereotopology for integrated product design and assembly sequence planning,” *Adv. Eng. Informatics*, vol. 29, no. 3, pp. 495–512, 2015.
[33] S. Krima, R. Barbau, X. Fiorentini, R. Sudarsan, and R. D. Sriram, “OntoSTEP : OWL-DL Ontology for STEP,” *NIST Natl. Inst. Stand. Technol.*, 2009.
[34] R. Barbau *et al.*, “OntoSTEP: Enriching product model data using ontologies,” *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 44, no. 6, pp. 575–590, 2012.
[35] X. W. Xu, “Realization of STEP-NC enabled machining,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 22, no. 2, pp. 144–153, 2006.
[36] R. Roy, R. Stark, K. Tracht, S. Takata, and M. Mori, “Continuous maintenance and the future – Foundations and technological challenges,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 65, no. 2, pp. 667–688, 2016.
[37] E. Maleki, F. Belkadi, M. Ritou, and A. Bernard, “A tailored ontology supporting sensor implementation for the maintenance of industrial machines,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 9, 2017.
[38] E. M. Sanfilippo, F. Belkadi, and A. Bernard, “Ontology-based knowledge representation for additive manufacturing,” *Comput. Ind.*, vol. 109, pp. 182–194, 2019.
[39] M. M. Ali, M. B. Doumbouya, T. Louge, R. Rai, and M. H. Karray, “Ontology-based approach to extract product’s design features from online customers’ reviews,” *Comput. Ind.*, vol. 116, Apr. 2020.
[40] M. Compton *et al.*, “The SSN ontology of the W3C semantic sensor network incubator group,” *J. Web Semant.*, vol. 17, pp. 25–32, 2012.
[41] M. Merdan, W. Lepuschitz, T. Meurer, and M. Vincze, “Towards ontology-based automated disassembly systems,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.*, pp. 1392–1397, 2010.
[42] A. L. Szejka, O. C. Junior, H. Panetto, A. Aubry, and E. F. R. Loures, “A semantic reconciliation view to support the interoperable information relationships in product design and manufacturing,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 15896–15903, 2017.

ROS : une solution middleware adaptée pour l'industrie du futur ?

Cyril BRIAND
LAAS-CNRS,
Université de Toulouse, UPS,
Toulouse, France
cyril.briand@laas.fr

Thierry GERMA
Magellium,
Université de Toulouse, UPS,
Toulouse, France
thierry.germa@gmail.com

Fabien MARCO
S-MART AIP-PRIMECA Occitanie,
Université de Toulouse, UPS,
Toulouse, France
fabien.marco@univ-tlse3.fr

Nathan MORET
S-MART AIP-PRIMECA Occitanie,
Université de Toulouse, UPS,
Toulouse, France
nathanp.moret@gmail.com

Olivier STASSE
LAAS-CNRS,
Université de Toulouse
Toulouse, France
ostasse@laas.fr

Michel TAÏX
LAAS-CNRS,
Université de Toulouse, UPS,
Toulouse, France
michel.taix@laas.fr

Résumé— *Depuis 6 ans, le pôle S-MART Occitanie a fait le choix d'utiliser le middleware Robot Operating System (ROS) pour intégrer les équipements de sa plateforme robotique et pour former les étudiants des diverses formations aux diverses facettes de la robotique. Cet article relate cette expérience et, au-delà, s'interroge sur le potentiel de ROS en tant que solution open-source pour l'accélération de la transition vers l'industrie du futur.*

Mots-clés— *Middleware, ROS, Jumeaux Numériques, Industrie du futur.*

I. INTRODUCTION

La robotique est considérée comme un pilier majeur de la 4ème révolution industrielle [1]. Les avancées récentes en robotique ouvrent en effet de nouvelles perspectives en rupture avec le modèle industriel traditionnel dans lequel des robots manipulateurs exécutent à haute cadence des tâches pré-programmées en environnement contrôlé. Même si ce modèle reste tout à fait pertinent aujourd'hui, les progrès récents dans la conception mécanique des robots, les technologies de perception, les algorithmes de traitement des données basés sur l'apprentissage, les algorithmes de planification de mouvements, etc. permettent de mettre en œuvre un nouveau modèle dans lequel les robots sont désormais capables de se mouvoir de manière autonome et sûre dans leur environnement de travail, en présence d'obstacles dynamiques, pour la réalisation de tâches diverses et complexes. Ces nouvelles facultés peuvent être exploitées pour développer des applications innovantes telles que l'assemblage robotisé de grandes structures [2], le contrôle visuel de leur conformité [3,4], la co-exécution de tâches par/avec un humain [5], la logistique basée sur l'utilisation de flottes de robots mobiles ou de drones [6,7], etc.

Innover repose en grande part sur la capacité à intégrer avec succès différentes briques technologiques et prototyper rapidement les applications en prenant en compte les diverses contraintes liées au respect des contraintes temporelles de l'application, au partage rapide de volume conséquent de données, à la sûreté de fonctionnement, à la qualité logicielle, etc. Les middlewares ont été conçus pour répondre à cette problématique d'intégration en permettant de s'abstraire des couches logicielles basses, rendant ainsi les applications plus claires, modulaires et maintenables [8].

Parmi les solutions middleware, l'usage de ROS (Robot Operating System) est de plus en plus répandu. ROS est le premier projet collaboratif open-source de robotique à grande échelle. Né en 2000 à l'Université de Stanford, puis porté à maturité par la startup Willow-Garage en 2007, ROS fournit aujourd'hui un ensemble de librairies, d'outils et de concepts informatiques permettant le développement de systèmes robotiques complexes. L'écosystème ROS comporte aujourd'hui des dizaines de milliers d'utilisateurs dans le monde et est soutenu par des acteurs industriels majeurs.

Cet article présente tout d'abord les principales caractéristiques de ROS. Les différents avantages et inconvénients de son utilisation sont ensuite discutés au travers un retour d'expérience de deux applications réalisées au sein du pôle S-MART Occitanie : la réalisation d'un jumeau numérique dédié à la contrôle/commande d'une cellule flexible de production, l'intégration de robots propriétaires dans l'environnement ROS. Une conclusion dresse un bilan et évoque les perspectives d'évolution.

II. LE MIDDLEWARE ROS EN ROBOTIQUE

A. Pourquoi un middleware ?

Un système robotique est un ensemble de systèmes mettant en jeu de nombreuses compétences relatives à l'électrotechnique, la mécanique, l'automatique, la vision, le son et l'informatique. Chacun de ces domaines étant en constante évolution, il est nécessaire de capitaliser l'expérience, de réutiliser les outils mis en place et de coordonner/synchroniser efficacement les différents sous-systèmes. Les middlewares permettent de répondre à cette problématique et de réduire les temps et les coûts de production en :

- facilitant la gestion de la complexité et de l'hétérogénéité des applications,
- simplifiant la conception logicielle,
- masquant la complexité de la communication de bas niveau et l'hétérogénéité des capteurs,
- favorisant la réutilisation de l'infrastructure logicielle qui capitalise des années d'efforts de recherche.

B. Le middleware ROS

ROS est un middleware fonctionnant exclusivement dans l'environnement Linux Ubuntu. Il s'appuie sur une *plomberie* efficace qui permet la communication entre des composants logiciels quelle que soit leur répartition au sein de l'architecture distribuée. Ces mécanismes de communication sont illustrés sur la figure 1. Les processus de ROS sont appelés *nœud*. Les nœuds communiquent entre eux avec des messages via des *topics*. Quand un nœud veut publier un message sur un topic, il avertit dans un premier temps le *master* puis, dans un second temps, le publie, il est alors appelé *publisher*. Lorsqu'un nœud veut consulter un message, il doit s'abonner au topic correspondant. Pour cela il avertit le master de sa volonté de souscrire à un topic et le master crée la connexion. Ce nœud est alors appelé *suscriber*. Le suscriber a accès au message du topic via une fonction *callback*, c'est-à-dire une fonction appelée à chaque fois qu'un message arrive. Un nœud peut être à la fois suscriber et publisher. ROS présente donc une structure de communication entre les processus de type publisher / suscriber permettant d'échanger des messages de type différent. Cette architecture lui confère une grande modularité et un caractère d'interopérabilité lui permettant d'interagir avec des systèmes robotiques différents.

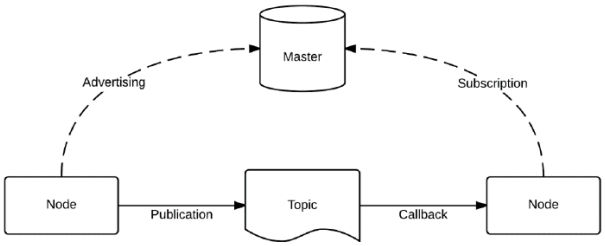


Figure 1. Schéma du protocole de communication de ROS

ROS dispose également d'une suite intégrée d'outils de développement permettant d'analyser, afficher et débugger une application répartie complexe :

- catkin : un système de gestion de paquets, de génération de code automatique et compilation .
- rqt_graph : une interface graphique permettant d'analyser le graphe d'applications et les transferts de données via les topics.
- rosbag : un programme permettant d'enregistrer et de rejouer des séquences topics (la fréquence, la durée et les topics à enregistrer pouvant être spécifiés).
- rqt : une interface de contrôle incrémentale qui se base sur le système de plugins de la bibliothèque de GUI Qt.

Une grande force de ROS réside dans le niveau d'abstraction du matériel utilisé. Cela permet de limiter fortement la portée des modifications en cas d'un changement de matériel. Cette abstraction permet de coupler son application à des librairies puissantes telles que :

- OpenCV pour le traitement du signal,
- OctoMap pour la représentation de l'environnement,
- SMACH pour la planification de tâches,
- MoveIt pour la planification de mouvement,
- ROS control pour le contrôle des boucles de commande,
- Rviz pour l'affichage des modèles de robots, des cartes de navigation.

ROS permet également, via des outils de simulation comme Gazebo (http://gazebosim.org - totalement intégré à ROS) ou CoppeliaSim (https://www.coppeliarobotics.com/), de valider une application de commande. Gazebo et CoppeliaSim sont tous deux des simulateurs 3D, cinématiques, dynamiques et multi-robots, permettant de simuler des robots articulés dans des environnements complexes, intérieurs ou extérieurs, réalistes. Il est ainsi possible de valider le comportement d'une application contrôlant un ou plusieurs robots en interaction au sein d'un processus d'assemblage ou de fabrication et, grâce à l'abstraction offerte par ROS, d'exécuter ensuite cette même commande sur le système physique réel, cela sans modifier aucune ligne de code.

III. RETOURS D'EXPERIENCE DU POLE S-MART OCCITANIE

Depuis 6 ans, le pôle S-MART Occitanie a fait le choix d'utiliser ROS pour les formations liées à la robotique mobile. L'idée d'utiliser ce middleware pour intégrer complètement les ressources de la plateforme de robotique industrielle a germé il y a 4 ans. Plusieurs projets étudiants et stages ont été réalisés pour valider le principe dont les chapitres suivants résument les résultats.

A. Présentation succincte de la plateforme robotique industrielle

La cellule flexible (cf. Fig. 2) est un démonstrateur d'une chaîne de production industrielle composée de quatre postes de travail robotisés ; chacun équipé d'un bras manipulateur et d'un système de vision. Ces postes de travail sont connectés entre eux par un système de transport. Il s'agit d'une ligne transitique Montrac commercialisée par la société Allemande Montratec. Elle est composée d'un circuit monorail sur lequel circulent des navettes. Ce système est commandé par des automates programmables industriels Schneider Modicon M340. La ligne permet de transporter des pièces manufacturées d'un poste de travail à l'autre pour leur faire subir différentes opérations industrielles.



Figure 2. Photo de la cellule flexible

Dans le cadre de ce travail, seulement deux postes robotisés sont considérés. Le premier comporte un bras manipulateur RX60L du constructeur Stäubli et un système de vision à deux caméras Cognex (cf. Fig. 3). L'autre est composé du même système de vision et d'un bras manipulateur KR6 R700 du constructeur Kuka (cf. Fig. 4). Aucun de ces robots n'est compatible nativement avec l'environnement ROS.



Figure 3. Bras robot RX60L et son contrôleur CS8

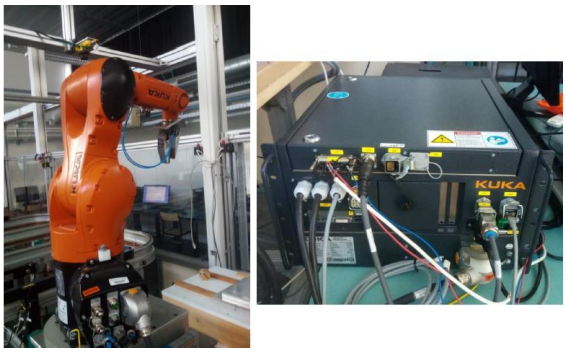


Figure 4. Bras robot Kuka KR6 R700 et son contrôleur KR C4 compact

B. *Intégration des robots Stäubli et Kuka dans l'environnement ROS*

Pour chacun des deux robots, l'objectif est de réaliser trois preuves de concept (POC) à complexité incrémentale pour démontrer l'intérêt de ROS pour commander des robots industriels en utilisant une grande part de leur potentiel. ROS permettrait ainsi de s'affranchir des environnements propriétaires des constructeurs. Ces POCs ont été choisies de façon à être représentatives de cas typiques industriels. Le POC n°1 est une tâche de pick and place classique, très fréquente dans l'industrie, consistant à prendre un objet à un endroit pour le déplacer à un autre endroit avec une certaine orientation. Cette tâche est facile à mettre en œuvre et permet d'utiliser différents types de mouvement du robot comme un mouvement linéaire, circulaire ou encore d'approche. De plus, cette tâche permet de saisir les objets véhiculés par les navettes de la cellule flexible. Le POC n°2 est une tâche de suivi de contour de forme. Le suivi de contour est classique dans l'industrie pour réaliser un dépôt de colle ou une soudure entre deux surfaces. Il s'agit de montrer la capacité de l'application ROS à suivre une trajectoire donnée à plus ou moins grande vitesse. Le POC n°3 est un évitement d'obstacle dont l'intérêt est de montrer la capacité de l'application à s'interfacer efficacement avec l'environnement ROS tel que le planificateur de trajectoire MoveIt [9].

Les deux baies des contrôleurs disposant de ports Ethernet et USB, une architecture logicielle basée sur la réalisation d'un programme écrit en langage propre faisant l'interface entre l'OS du contrôleur et la couche ROS a été retenue. Il s'agit ainsi de réaliser un *driver* ayant pour rôle de réceptionner, d'interpréter et de transférer les informations entre l'OS du contrôleur et la couche ROS. Ce principe est illustré sur la figure 5. Cette solution impose le développement d'un driver différent pour chaque contrôleur de robot mais possédant des interfaces (API) identiques avec la couche ROS. Il est donc intéressant de travailler avec deux contrôleurs pour vérifier la généricité de l'API proposée et de l'approche.

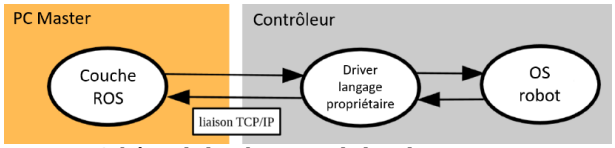


Figure 5. Schéma de l'architecture de la solution

Le driver Val3 est le driver dédié à l'utilisation du robot Stäubli dont le langage propriétaire est Val3. Il repose sur des applications composées de fonctions de bases propres à ce langage, de programmes qui sont une séquence d'instructions VAL3 à exécuter, de variables et de tâches. Une tâche est un programme en cours d'exécution qui peut fonctionner en parallèle d'autres tâches de manière synchrone ou asynchrone. Le driver Val3 est une application dont les tâches sont dédiées à la communication avec la couche ROS en utilisant un protocole de communication établi. Trois tâches ont été implémentées : *control*, *retour* et *erreur*. Ces tâches sont asynchrones et n'ont pas la même priorité. La tâche *control* réceptionne les messages envoyés par la couche ROS et les traite. La tâche *retour* lit les informations du robot réel et les renvoie à la couche ROS. Enfin, la tâche erreur traite les erreurs bloquantes mineures pour éviter une intervention de l'opérateur. La priorité maximale est accordée à la tâche *retour* car le retour de l'état du robot est primordial à la couche ROS pour pouvoir adapter son contrôle sur le robot. La tâche *control*, a une priorité haute (moindre que la tâche *retour*) afin de limiter les temps de latence.

Dans la tâche *control*, le driver ne traite qu'un message à la fois, c'est-à-dire que, à la réception d'un nouveau message, il le traduit, l'interprète et réceptionne le message suivant que lorsque les instructions ont été envoyées à l'OS du contrôleur. Le robot mettant un temps non négligeable à réaliser une action, en comparaison avec le temps de traitement d'un message, les instructions d'action sont accumulées dans une pile de consigne de l'OS. Cela permet au contrôleur d'exécuter les consignes au robot en tenant compte des consignes futures.

Les deux couches applicatives communiquent entre elles via des messages. La structure des messages est la suivante : `Id X donnée X … donnée X F`, où *Id* est un identifiant du message décrivant son contenu, *X* est le marqueur de fin de valeur, *F* est le marqueur de fin de message.

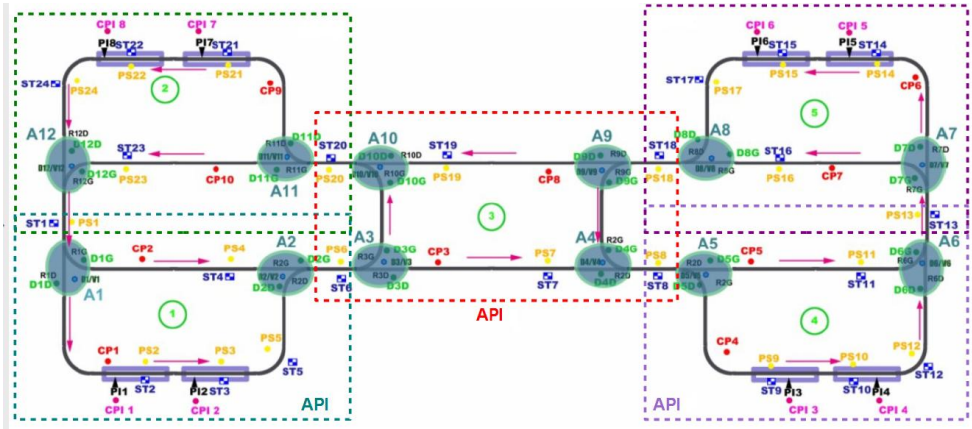


Figure 6. Capteurs et actionneurs

Les messages utilisés ont été déterminés par l'étude des informations que peut recevoir et communiquer le contrôleur du robot. Ils ont être regroupés en six familles différentes :

- Message de mouvement : contient la consigne pour les différents types de mouvement (point à point, linéaire et circulaire),
- Message de paramètres de mouvement : contient les paramètres de vitesse et de lissage,
- Message dédié à l'outil : contient la consigne de contrôle de l'outil ainsi que ces paramètres,
- Message de configuration du robot : contient la consigne de configuration et de la vitesse moniteur,
- Message d'état du robot : contient les informations de l'état du robot réel,
- Message stop : averti de la fermeture d'une application.

Les tables 1 et 2 décrivent les différents types de message par *Id* et les structures de ces messages.

	ID	Description
Mouvement	11	Coordonnée articulaire pour mouvement point à point
	121	Coordonnée cartésienne pour mouvement point à point
	122	Coordonnée cartésienne pour mouvement linéaire
	1231	Coordonnée cartésienne du point d'arrivée d'un mouvement circulaire
	1232	Coordonnée cartésienne du point intermédiaire d'un mouvement circulaire
Paramètres mouvement	2	Consigne de vitesse et de lissage du mouvement
Outil	31	Consigne des paramètres de l'outil
	32	Commande de l'action de l'outil
Configuration robot	41	Consigne de la configuration des articulations du robot
	42	Consigne de la vitesse moniteur du robot
Etat	5	Retour de l'état du robot
Stop	99	Consigne pour vider la pile de consigne du contrôleur

Tableau 1. Identifiants des différents messages

L'architecture de contrôle a également été implémentée pour le robot Kuka. Les drivers sont naturellement spécifiques à chacun des environnements du fait que les environnements VAL 3 (Stäubli) et KRL (Kuka) fonctionnent selon des logiques distinctes. Néanmoins, les mêmes structures de messages ont pu être implémentées dans les deux environnements. Les trois POCs ont ainsi pu être implémentées et validées sur chacun des robots. Les drivers pourraient certainement être enrichis pour mieux profiter de tout le potentiel des robots mais ils couvrent aujourd'hui une bonne part du besoin. Le chapitre suivant décrit comment ROS permet de faire le lien entre les robots et la cellule.

ID	Message
11	11 X j1 X j2 X j3 X j4 X j5 X j6 X F
121	121 X x X y X z X rx X ry X rz X F
122	122 X x X y X z X rx X ry X rz X F
1231	1231 X x X y X z X rx X ry X rz X F
1232	1232 X x X y X z X rx X ry X rz X F
2	2 X accel X vel X decel X tvel X rvel X blend X leave X reach X F
31	31 X x X y X z X rx X ry X rz X otime X ctime X F
32	32 X action X F
41	41 X shoulder X elbow X wrist X F
42	42 X speed X F
5	5 X isPowered X isCalibrated X workingMode X esStatus X speed X shoulder X elbow X wrist X isSettled X F
99	99 X F

Tableau 2. Structures des différents messages

C. *Développement d'un jumeau numérique de la cellule flexible de production*

La figure 6 décrit les capteurs et actionneurs du système Montratec. La ligne transitique est composée de sections et d'aiguillages sur lesquels circulent des navettes autonomes. Elle est commandée à l'aide des trois automates M340. Les aiguillages permettent de dériver les navettes vers les postes de travail robotisés. Les navettes activent à leur passage des capteurs de présence PS_i (i=1..24) disposés en amont des aiguillages A_i (i=1..12), CP_i (i=1..20) disposés en aval des aiguillages A_i (i=1..12) et CPI_i (i=1..8) situés devant les zones d'indexage. Les stops fonctionnent en logique inverse : si tous les stops sont activés, les navettes avancent sans s'arrêter. Chaque aiguillage A_i (i=1..12) comporte 4 actionneurs et 2

capteurs : les actionneurs pneumatiques *Rid*, *Rig* permettent de commander une rotation des aiguillages à droite ou à gauche, les actionneurs pneumatiques *Di*, *Vi* permettent de déverrouiller / verrouiller les aiguillages, enfin, les capteurs de *Did*, *Dig* indiquent le positionnement de l'aiguillage.

L'objectif est de commander la ligne dans l'environnement ROS en s'affranchissant de l'environnement de programmation Schneider. Il est possible d'utiliser l'outil de simulation CoppeliaSim (ex-VREP) pour créer un jumeau numérique de la ligne transitique et permettre aux étudiants de visualiser en temps réel le résultat de leurs programmes en simulation. Une fois le programme validé en simulation, il peut être directement testé sur le système physique réel (sans modification de code). La figure 7 décrit l'architecture de commande. Le jumeau numérique implémenté est représenté sur la figure 8. Le nœud *ROS-Commande* réalise l'interface entre le programme étudiant (nommé *ROS-Planificateur*) et, soit le jumeau numérique, soit le système réel. La liaison avec le système réel est assurée par le nœud *ROS-Communication* qui communique avec les automates avec un protocole Modbus TCP/IP grâce à la librairie libmodbus. Le nœud *ROS-Communication* lit et écrit dans une mémoire partagée pré-configurée dans chacun des automates. Les automates recopient périodiquement les valeurs des capteurs dans leur mémoire partagée, et actualisent les actionneurs en fonction des valeurs mises à jour dans cette même mémoire partagée.

Comme on peut le voir sur la figure 8, les robots implémentés dans le jumeau numérique ne sont pas différenciés. Ils sont pour l'instant assimilés à des procédés à événements discrets élémentaires, munis de capteurs / actionneurs, réalisant des opérations simples. Dans un premier temps, les robots réels ont été connectés aux automates par leurs modules d'entrée/sortie. Les programmes implantés au sein des robots sont déclenchés par mise-à-un d'un actionneur sur automate. Une fois la tâche réalisée, le robot l'acquitte auprès de l'automate par mise-à-un d'une de ses sorties.

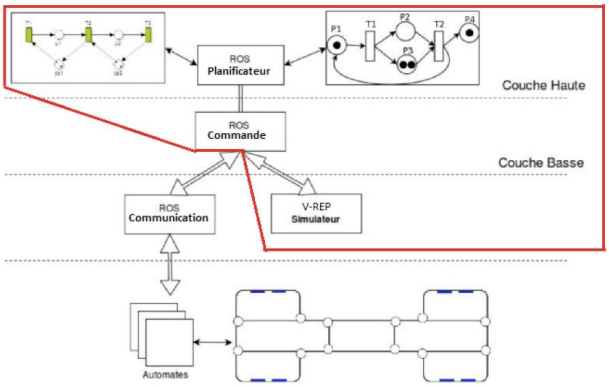


Figure 7. Architecture ROS

L'ambition à plus long terme est d'intégrer les deux travaux présentés dans cet article. Ainsi, la simulation CoppeliaSim de la cellule flexible pourrait être couplée à la simulation Gazebo de chacun des robots. Il sera ainsi possible de mixer les systèmes simulés et ceux réels afin de valider progressivement le bon fonctionnement. Il sera également possible, dans une logique de redimensionnement ou d'évolution du système, de tester virtuellement l'introduction de nouveaux matériels au sein du système réel.

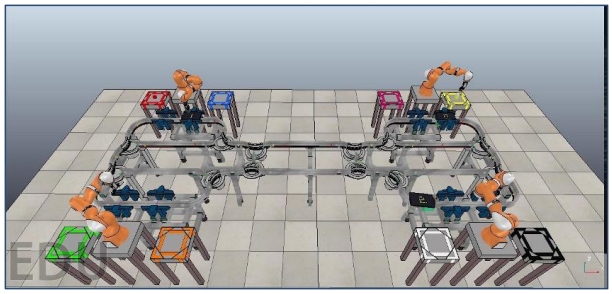


Figure 8. Un jumeau numérique de la cellule

D. Des avantages, mais aussi des limites

Les chapitres précédents ont démontré l'intérêt d'un middleware tel que ROS pour l'intégration de systèmes cyber-physiques. ROS capitalise l'expérience d'années d'ingénierie en robotique et offre une vaste collection d'applications robotiques : calcul de trajectoire, contrôle de robot par joystick, cartographie 3D, simulation, etc. Dans la cadre de l'industrie 4.0 où l'agilité est le maître-mot, disposer d'un outil offrant gratuitement des technologies aussi abouties peut être décisif dans bien des situations où il est nécessaire de prototyper très rapidement de nouvelles solutions. ROS ne nécessitant pas des ressources informatiques énormes, il peut également fonctionner sur des systèmes embarqués utilisant des microcontrôleurs (e.g., Raspberry Pi 3).

ROS a cependant les inconvénients de ses avantages : sa nature open-source. Développé par une communauté très active, mais aussi très hétérogène, il existe aujourd'hui plus de 2000 packages ROS et, malheureusement, tous ne sont pas au même niveau de maturité, ne sont pas maintenus, ni n'utilisent la même version de ROS. Il est donc souvent difficile d'identifier quels sont les packages les plus aboutis /prometteurs sans être spécialiste, voire engager une ingénierie relativement coûteuse pour les tester. De plus, ROS fonctionnant uniquement sur le système Linux Ubuntu, la quasi-totalité des packages sont incompatibles avec des OS classiques, notamment Windows, l'OS le plus répandu dans l'industrie. Enfin, les systèmes Linux et ROS évoluant tous les 3-4 ans en moyenne, il est nécessaire de mettre à jour les développements réalisés en interne afin d'éviter leur obsolescence, cela sans autre support que celui de la communauté. Là aussi des coûts d'ingénierie sont à prévoir.

Un autre aspect est le temps réel souvent indispensable pour la mise en œuvre de systèmes de contrôle-commande. Celui-ci n'est pas natif dans ROS. Il est nécessaire d'ajouter une couche telle que OROCOS (Open ROBot COntrol Software) qui permet de gérer les communications efficacement. Utilisé en concomitance avec le package *ROS control*, il est possible de mettre en œuvre des systèmes de contrôle de robot intégrant des contraintes temps réel et angulaires, en ayant une IHM offerte par défaut. Néanmoins, de solides bases en informatique et robotique sont utiles pour aborder ce genre de développement.

La prochaine version de ROS, nommée ROS 2 (https://design.ros2.org/), devrait permettre de pallier la plupart des faiblesses précédemment évoquées. Ainsi qu'illustré sur la figure 9, la majeure avancée de ROS 2 consiste en l'utilisation du standard DDS (Data Distribution Service) pour la gestion des communications bas niveau. DDS est un standard ouvert produit par l'OMG (Object Management Group : https://omg.org) conçu pour répondre aux besoins de l'IoT industriel, de l'industrie des communications, de la robotique. Le principal avantage pour les développeurs de ROS est de rester centrés sur les aspects métiers exclusivement, en s'affranchissant des aspects communications. En même temps que la définition des paradigmes de diffusion de l'information, DDS permet de spécifier les besoins de l'application. Cela peut permettre de configurer le réseau dont les éléments de commutation (switches) sont programmables. Ce type de réseau est appelé Software Defined Network (SDN) et est contrôlé par un élément central (le contrôleur SDN) qui diffuse dans le réseau les règles de commutation. Un des atouts majeurs de ROS 2 est sa disponibilité sur la plupart des plateformes (Windows, Linux, MacOS). L'obsolescence de ROS 1 au profit de ROS 2 est annoncée pour 2025. Toutefois, l'utilisation de ROS 2 pourrait s'avérer plus complexe que celle de ROS 1 du point de vue informatique.

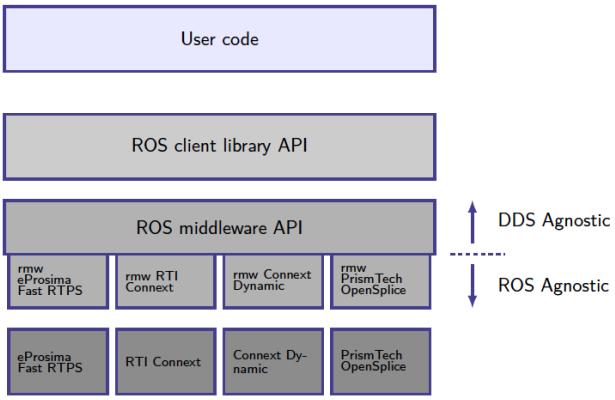


Figure 9. Architecture de ROS 2

IV. Conclusion

Les technologies robotiques évoluent de plus en plus rapidement et doivent être repensées sans cesse. Dans cette perspective, ROS offre une richesse sans précédent et apparaît être une option viable pour développer les systèmes cyber-physiques de demain et capitaliser les principales innovations industrielles et académiques. Les paquets ROS peuvent être propriétaires, les développeurs de tels paquets ayant alors à charge de mettre eux-mêmes en œuvre les actions de maintenance nécessaires à éviter l'obsolescence de leurs développements, cela pouvant être coûteux. De nombreux acteurs industriels de la robotique, rassemblés dans le consortium ROS Industrial (https://rosindustrial.org/), ont fait le choix de faire confiance à ROS pour supporter leurs développements logiciels (ABB, BOSH, PAL Robotics, YASKAWA, etc.). ROS est encore "jeune" mais ses défauts vont s'atténuer avec le temps, notamment avec l'avènement de ROS 2 en 2025.

Le pôle S-MART Occitanie a fait le choix de ROS pour l'avenir et développé, avec le support du projet européen ROSIn (https://www.rosin-project.eu/), une ROS Academy (https://www.aip-primeca-occitanie.fr/ros-in-occitanie/). L'ambition est de continuer à former les étudiants sur ROS mais aussi de contribuer à l'accélération de la diffusion de ROS au sein de l'industrie en développant des offres de formation tout-au-long-de-la-vie.

Remerciements

Ce travail a été partiellement financé par le projet ROSIn, développé dans le cadre du programme européen Horizon 2020, sous le no d'agrément 732287. Il n'aurait pas existé sans le soutien de nombreux étudiants, en projet ou stage, qui ont joué un rôle moteur dans le développement de ROS au sein du pôle SMART-Occitanie. Merci à Nathan, Ahmed, Abdoul, Thomas, l'équipe SALLAG (Steve, Anthony, Lucas, Lucie, Antonin, Guillaume), Jean-Baptiste, Claire, Enrique, Maxime, Aurélie, Céline, Bruno, Alexandra, … et tous les autres.

References

[1]. Industrie du futur : enjeux et perspectives pour la filière aéronautique. Rapport final / DGE, PIPAME, GIFAS .- in : DGE, 10/12/2018, 188p., (Etudes économiques) - En ligne sur le site de la DGE.

[2]. Sebastian Rendon Fernandez. Accuracy enhancement for robotic assembly of large–scale parts in the aerospace industry. Robotics. HESAM Université, 2020.

[3]. Fiorenzo Franceschini, Luca Mastrogiacomo, Barbara Pralio. An Unmanned Aerial Vehicle–based System for Large Scale Metrology Applications. International Journal of Production Research, Taylor & Francis, 2010, 48 (13), pp.3867–3888.

[4]. Zheng Wang. (DET2009) High accuracy mobile robot positioning using external Large Volume Metrology instruments. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Taylor & Francis, 2011.

[5]. Gennaro Raiola, Susana Sanchez Restrepo, Pauline Chevalier, Pedro Rodriguez–Ayerbe, Xavier Lamy, et al.. Co–manipulation with a Library of Virtual Guiding Fixtures. Autonomous Robots, Springer Verlag, 2017, pp.1–15.

[6]. Moritz Pöting, Stefan Schaudt, Uwe Clausen. A Comprehensive Case Study in Last-Mile Delivery Concepts for Parcel Robots. WSC 2019: 1779-1788.

[7]. Voker Grabé, Martin Riedel, Heinrich H Bülthoff, Paolo Robuffo Giordano, and Antonio Franchi. The TeleKyb Framework for a Modular and Extendible ROS-based Quadrotor Control. In European Conference on Mobile Robots, ECMR 2013, Barcelona, Catalonia, Spain, September 2013.

[8]. Stefan-Gabriel Chitic. Middleware and programming models for multi-robot systems. Theses, Université de Lyon, March 2018.

[9]. Michael Görner, Robert Haschke, Helge J. Ritter, Jianwei Zhang. MoveIt! Task Constructor for Task-Level Motion Planning. ICRA 2019: 190-196

Système d'assemblage reconfigurable

Utilisation dans un cadre didactique

Jean-Jacques Santin[1], Thierry Berger[1,2], Sondès Chaabane[1,2], Antoine Dequidt[1,2], Yves Sallez[1]
[1] Univ. Polytechnique Hauts-de-France, LAMIH, CNRS, UMR 8201, F-59313 Valenciennes, France
[2] INSA Hauts-de-France, F-59313 Valenciennes, France
Jean-Jacques.Santin@uphf.fr

Les industries manufacturières, en particulier les PME, font face aujourd'hui à de nouveaux défis qui nécessitent une profonde réorganisation des moyens de production. Les ateliers de fabrication reconfigurables, et plus spécifiquement les Systèmes d'Assemblage Reconfigurables, constituent une des réponses possibles d'adaptation à ces changements. Ces systèmes font appel à un certain nombre de technologies de l'industrie 4.0 sur lesquelles les élèves ingénieurs doivent être préparés et formés.

Après avoir posé le contexte précité, cet article expose la manière dont la formation aux technologies de l'industrie 4.0 est abordée au sein de l'INSA Hauts-de-France, à travers la description des moyens utilisés, notamment ceux qui ont été développés spécifiquement, leur organisation, et leur mise en œuvre dans le cadre d'une activité de type projet.

Mots-clés— Système de production reconfigurable, robotique, plateforme didactique, Industrie 4.0.

I. INTRODUCTION - MOTIVATION

Introduit par Koren [1-2], le concept de système de production reconfigurable peut être défini comme suit : « Les systèmes de production reconfigurables sont conçus dès le départ pour permettre un changement rapide de la structure, ainsi que des composants matériels et logiciels, afin d'ajuster rapidement la capacité de production et les fonctionnalités, au sein d'une famille de produits, en réponse à des problèmes imprévus liés aux évolutions du marché ou des exigences réglementaires ». Appliqué au domaine de l'assemblage, le concept précédent donne naissance au Système d'Assemblage Reconfigurable (SAR) [3-5]. Un SAR est constitué d'un ensemble de composants matériels (ex. des robots, des unités de convoyage) et logiciels pouvant être ajoutés ou supprimés pour s'adapter aux besoins de la production [3-6]. Une synthèse sur les SAR et leur conception peut être consultée dans [5, 6].

Le système Ifactory développé à l'Université de Windsor [3] est certainement l'un des prototypes les plus avancés de SAR. Ce système est composé de modules pouvant être déplacés et configurés facilement. Les différents modules sont équipés de dispositifs optiques permettant de reconnaître la topologie du système. Les produits sont transportés au sein de chaque module à l'aide d'un convoyeur à deux niveaux. D'autres travaux [7] proposent des sous-systèmes d'assemblage mobiles et modulaires afin de construire un SAR destiné aux chaînes d'assemblage finales d'un constructeur automobile. Ces modules d'assemblage mobiles permettent, si nécessaire, de supporter une collaboration Homme-Robot.

D'autres solutions, spécifiquement dédiées au domaine didactique, ont également été proposées par les sociétés Festo [8] et SMC [9]. Exploitant un ensemble de modules de base (ex. modules de convoyage, robotisés, de stockage...), ces solutions permettent, selon l'agencement des modules, d'aboutir à différentes configurations d'un SAR. Ces solutions sont appropriées si l'on souhaite bénéficier d'une plate-forme didactique rapidement opérationnelle. Cependant, chaque module est totalement dédié et s'avère peu évolutif, tant d'un point de vue physique qu'informationnel. Les calculateurs de contrôle, par exemple, sont prédéfinis, et toute évolution de son choix nécessite de revoir totalement l'architecture de contrôle globale. De plus, les modules robotisés proposés sont complétement cartérisés pour des raisons de sécurité. Cette solution, si elle s'avère efficace, nuit à l'accessibilité du poste par les opérateurs lors d'interventions, par exemple pour changer des outils ou réapprovisionner en composants. Souhaitant œuvrer au développement de postes robotisés plus facilement accessibles et donc plus « ouverts », ces solutions se sont révélées trop restrictives dans le cadre de nos travaux de recherche sur la sécurité des RAS.

Face à ce constat, l'approche proposée dans cet article vise à élaborer un SAR à partir d'Unités Élémentaires Configurables (UEC) adaptables, modulaires, et pouvant être agencées entre elles pour former des cellules d'assemblage.

Après avoir exposé nos motivations dans cette première partie, la deuxième est consacrée à une description des principes d'élaboration du SAR. La troisième partie est dédiée à la présentation de son utilisation dans un cadre didactique. Enfin, la dernière partie propose une conclusion et quelques perspectives.

II. PRESENTATION DU SAR DE L'INSA HAUTS-DE-FRANCE

A. Vue d'ensemble

Afin de former ses élèves aux concepts de l'Industrie 4.0, l'INSA Hauts-de-France a investi depuis 2017 dans le développement d'un SAR avec un triple objectif :

- déployer un ensemble de technologies clés de l'Industrie 4.0 (robotique collaborative, robotique mobile, réalité augmentée, IIoT (Industrial Internet of Things)…)

susceptibles de servir de support aux enseignements sur l'Industrie 4.0 ;
- pouvoir valider sur des équipements réels les concepts et méthodologies proposés par les collègues œuvrant dans le domaine des systèmes de production au LAMIH UMR CNRS 8201 ;
- servir de démonstrateur « Industrie 4.0 » à destination des PMEs de la région.

Le principe de constitution d'un SAR est illustré sur la figure 1. Trois types d'UEC (U_i) sont distinguées : robotisées, manuelles ou cobotiques. Les UEC sont déplacées par les opérateurs et physiquement reliées via des dispositifs mécaniques spécifiques pour former les différentes cellules d'assemblage du SAR. Ce positionnement des UEC correspond à une configuration « stationnaire » du SAR, c'est à dire valide jusqu'à ce qu'une nouvelle configuration advienne. Des moyens logistiques sont également utilisés pour assurer les flux matériels au sein des cellules (logistique intracellulaire) et entre les cellules (logistique intercellulaire) du SAR. La logistique intercellulaire est assurée par une flotte de robots mobiles industriels (RMI). Ce choix d'équipement est justifié par la nécessité de disposer d'un équipement pouvant s'adapter très rapidement et facilement aux différentes configurations du SAR.

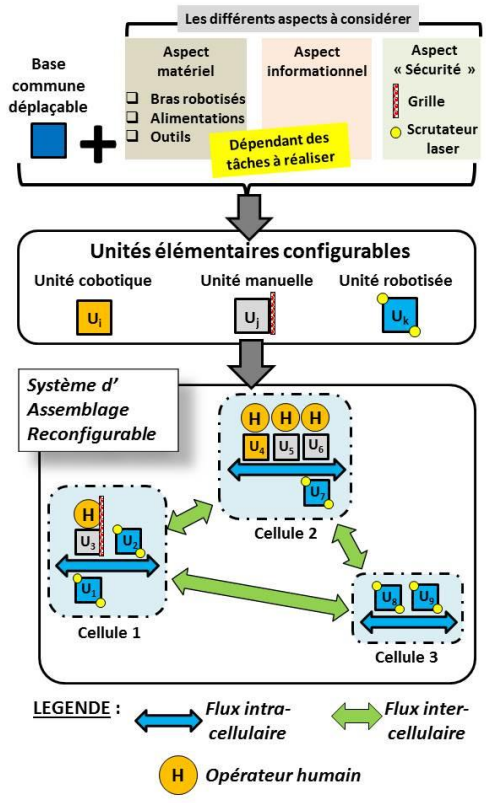


Figure 1. PRINCIPE DE CONSTITUTION DU SAR

Les UEC, toutes élaborées à partir d'une même structure de base, accueillent des équipements physiques et informationnels adaptés à certaines tâches (ex. robots, outils, etc.). Lors de la constitution de ces UEC, plusieurs aspects doivent être pris en compte : matériels, informationnels, sécuritaires, mais aussi ergonomiques (dans le cas d'une unité avec opérateur humain). Les paragraphes suivants détaillent ces différents aspects.

B. Présentation de l'aspect matériel des unités

La mécanique des UEC, développée en interne à l'INSA Hauts-de-France avec l'aide d'un fournisseur de biens d'équipement industriel, est constituée d'une partie commune et d'une partie spécifique. Les éléments décrits ci-dessous sont repérés par leur numéro sur l'illustration de la figure 2.

La partie commune est une ossature centrale pyramidale à base carrée rigide et stable (1). La forme carrée offre quatre orientations privilégiées. Elle dispose de quatre roulettes pivotantes (2) facilitant son déplacement manuel et de quatre pieds escamotables (3) qui assurent son immobilisation au sol et permettent d'en ajuster la hauteur et l'horizontalité. Cette pyramide est habillée et forme une armoire (4) destinée à recevoir des équipements électriques (armoire de commande, bloc d'alimentation, équipement réseau, etc.). Trois faces sont identiques, pourvues de repères d'accostage (5) pour les RMI, la quatrième laisse un espace suffisant pour les jambes d'un opérateur (6), en cas d'utilisation en unité manuelle ou cobotique. Aux quatre coins de la base, en partie basse, des emplacements (7) sont disponibles pour accueillir des scrutateurs laser. Deux scrutateurs laser de sécurité sont systématiquement installés sur des emplacements diamétralement opposés dans le cas d'une UEC robotisée.

La partie spécifique de l'UEC est sa table (8) qui sert d'interface mécanique avec l'équipement qui y est installé.

Une cellule est constituée d'une à plusieurs UEC mécaniquement solidarisées par l'intermédiaire de tablettes carrées d'une dimension identique à celle de la table d'une UEC. Les dispositions classiques en ligne, en L ou en U peuvent ainsi être obtenues. D'autres tablettes peuvent être ajoutées pour former, selon le besoin, un plan de travail (zone à valeur ajoutée), un plan de stockage (pour pièces, outils, etc.) ou une zone de circulation logistique intracellulaire.

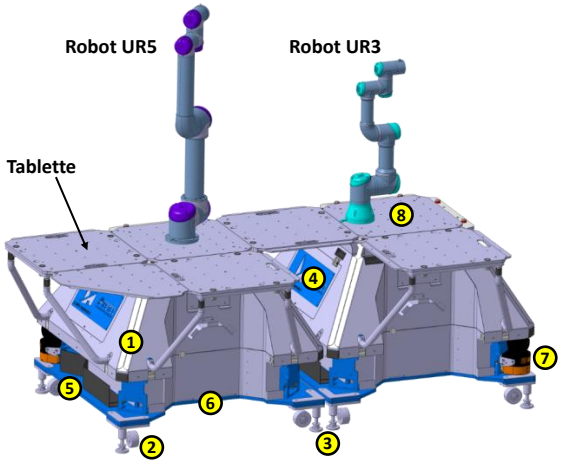


Figure 2. ASPECT MATERIEL D'UNE CELLULE AVEC DEUX UEC

C. *Présentation des aspects logistiques*

La variabilité des agencements des cellules et des unités dans les cellules, ainsi que la fréquence des reconfigurations, ont un impact important sur l'organisation et le choix des solutions logistiques. En effet, pour obtenir un fonctionnement probant du SAR, celles-ci doivent s'avérer tout aussi flexibles que la partie matérielle décrite précédemment, ce qui reste un défi à relever.

En ce qui concerne l'organisation de la logistique, les principales alternatives sont : l'approvisionnement de type « bord de ligne » des unités en pièces (disposées en vrac ou rangées), l'acheminement de kits contenant tout ou partie des pièces à assembler pour obtenir un produit final spécifique, ou le transfert d'un kit évolutif constitué non seulement des pièces à assembler, mais aussi du produit en cours d'assemblage, voire du produit final. Le choix d'une de ces solutions fait partie intégrante des variables d'optimisation du processus d'assemblage ; une combinaison de celles-ci n'étant pas à exclure. Le kitting évolutif a l'avantage de simplifier les flux logistiques, de tracer le produit pendant tout le processus d'assemblage, et permet, dans une certaine mesure, d'assembler des produits successifs différents. L'organisation étant posée, deux types de logistiques doivent être mises en œuvre : les logistiques intercellulaire et intracellulaire. Elles répondent à des besoins différents.

La logistique intercellulaire consiste à faire transiter le kit évolutif d'une cellule à une autre, mais aussi à alimenter certaines cellules en pièces détachées (approvisionnement « bord de ligne »). Les distances à parcourir peuvent aller jusqu'à plusieurs centaines de mètres, ce qui nécessite des vitesses de déplacement de l'ordre de 5 km/h ; les parcours sont d'autant plus variés que le nombre de cellules est important. La masse à transporter correspond à plusieurs kits. Les temps d'arrêt à chaque cellule doivent être minimisés. Aujourd'hui, les RMI constituent une solution adaptée au besoin de la logistique intercellulaire ; ils sont arrivés à maturité industrielle.

La logistique intracellulaire consiste à faire transiter le kit évolutif, d'une unité à une autre unité, au sein d'une même cellule. Les déplacements se font de station à station, sur des distances de quelques mètres, à une vitesse de l'ordre de 0,5 m/s, sur un parcours généralement invariable. Le kit est par ailleurs amené à stationner plusieurs dizaines de secondes sur chaque poste. Les solutions classiques de type convoyeur à bande ou à rouleaux sont généralement retenues, mais d'autres solutions plus flexibles émergent et font appel à de mini-AGV ou RMI (par exemple [10-11]).

Faire cohabiter les systèmes inter et intracellulaire afin d'assurer la continuité du flux logistique est une difficulté. La solution généralement retenue pour assurer la compatibilité des deux systèmes logistiques consiste à embarquer un convoyeur à bande ou à rouleaux sur un RMI (par exemple [12]). Il assure le transfert du bac de kiting entre RMI et cellule. Une synchronisation des dispositifs, et donc une communication entre eux, apparait comme un prérequis incontournable. La figure 3 donne un exemple d'agencement de 2 UEC robotisées et d'utilisation conjointe des logistiques intra et intercellulaires.

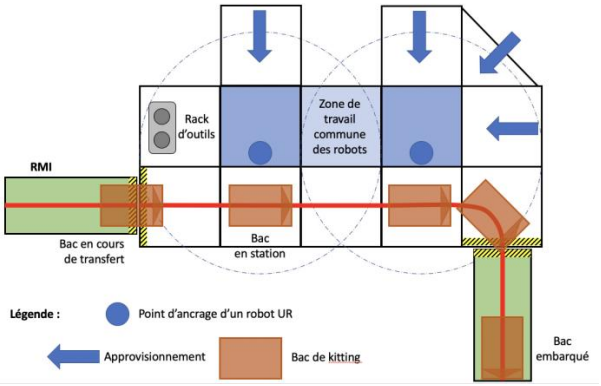


Figure 3. EXEMPLE D'AGENCEMENT D'UNE CELLULE AVEC SES MOYENS LOGISTIQUES INTRA ET INTER CELLULAIRES

D. *Présentation de l'aspect informationnel des unités*

Cet aspect informationnel est la clé de voute du SAR : la collaboration entre unités nécessite une communication efficiente ; sans cette dernière, le SAR est inopérant. La structure informationnelle doit être adaptée aux impératifs du SAR qui comprend des équipements déplaçables (UEC) et des équipements mobiles (RMI). Les communications entre les diverses unités sont assurées par une solution basée sur un réseau IP sécurisé reposant sur de l'Ethernet filaire et du Wi-Fi 2.4 et 5 GHz. Chaque unité comprend un calculateur spécifique (un Wago PFC200) prenant en charge les échanges entre unités. Ces échanges sont relatifs aux synchronisations (ex. RMI demandant à une UEC robotisée de réaliser une tâche d'assemblage). Outre les synchronisations, le réseau supporte, le cas échéant, les échanges de données relatifs à la sécurité entre UEC. Ces dernières sont issues des scrutateurs laser et des calculateurs de sécurité associés. Les échanges liés à la sécurité sont supportés en adoptant la méthode du « black channel » [13].

E. *Présentation de l'aspect « sécuritaire » des unités*

Dans le cadre d'un SAR, le caractère déplaçable et reconfigurable des UEC robotisées induit de nouvelles contraintes de sécurité vis-à-vis des opérateurs amenés à intervenir. La solution classique qui consiste à isoler les opérateurs des équipements robotisés à l'aide de barrières matérielles [8] s'avère peu flexible. Pour intégrer des unités robotisées « ouvertes » et faire coexister en toute sécurité unités robotisées, unités manuelles ou cobotiques, et robots mobiles, de nouvelles approches sont nécessaires [14-15]. Dans ce contexte, nous avons introduit le concept de bulle de sécurité « coopérative » [16-17]. L'objectif de cette nouvelle approche est de gérer de manière dynamique le problème de sécurité, sans se limiter à un nombre fini de configurations « certifiées ». Dans cette approche, chaque unité robotisée est apte à détecter l'intrusion d'un opérateur dans son espace de travail grâce à ses deux scrutateurs laser et au besoin d'en avertir les autres unités. Une méthodologie de déploiement de dispositifs de sécurité supplémentaires (scrutateurs laser ou barrières) est également présentée dans [16-17]. Le déploiement de scrutateurs laser supplémentaires est grandement facilité par les emplacements disponibles aux quatre coins de la partie basse des UEC, cf. figure 2, repère (7).

La partie suivante relate une utilisation didactique du SAR ainsi élaboré.

III. UTILISATION DIDACTIQUE

A l'heure actuelle, le SmartLab – nom donné au SAR de l'École – dispose de 3 UEC (2 UEC robotisées avec un UR5 et un UR3 et une UEC cobotique avec un ABB Yumi), d'une caméra Pickit 3D pour le dévraquage, de 3 RMI MiR100.

Dans le cadre de la spécialité Génie Industriel de l'INSA Hauts-de-France, un ensemble d'enseignements est dispensé pour préparer les élèves à l'Industrie 4.0. Un projet intitulé « Système de production reconfigurable » a été proposé pour la première fois en septembre 2020 à un groupe de 10 élèves. Les attendus du projet sont de se familiariser avec le concept de reconfiguration des moyens de production et de prendre en main les différents équipements du SAR.

A. Description du produit et du SAR implémenté

Le produit assemblé est un système électronique modulaire disposé dans un boitier, représentatif d'une production à la demande. La figure 4 présente ce produit constitué :

- d'un boitier contenant une carte électronique,
- d'une structure support construite en briques Lego,
- de trois modules électroniques Grove sur leur support,
- de trois câbles.

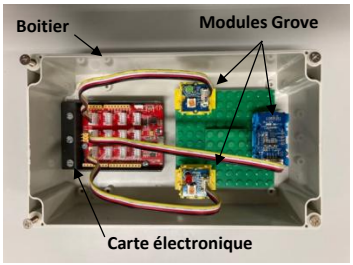


Figure 4. ELEMENTS CONSTITUTIFS DU PRODUIT

Comme illustré à la figure 5, trois cellules sont mises en œuvre. La cellule n°1 est en charge de la préparation d'un bac contenant le boitier et les câbles d'une part, et du déchargement du produit fini d'autre part. La cellule n°2 est constituée des deux UEC robotisées ; elle assure le montage de la structure support. La cellule n°3 est constituée de l'unique UEC cobotique ; les modules électroniques et les câbles y sont montés. Une flotte de trois RMI réalise le transfert des bacs entre les différentes cellules. Cette année, le flux intracellulaire n'a pas été mis en œuvre. Le tableau 1 résume les étapes successives de montage du produit.

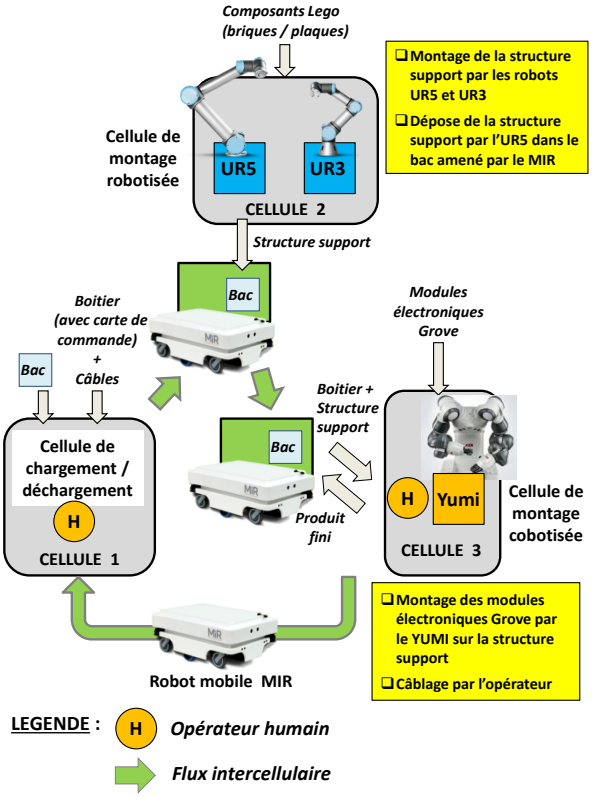


Figure 5. DESCRIPTION DU PROCESSUS DE MONTAGE

Etapes	Lieu / acteurs	Descriptif
1	Cellule 1	Préparation d'un bac contenant 1 boitier et 3 câbles
2	Robots mobiles	L'opérateur appelle un robot mobile "libre"
3	Cellule 1	L'opérateur dépose le bac sur le robot mobile
4	Robots mobiles	Le robot mobile se dirige vers la cellule 2
5	Cellule 2	UR3 et UR5 montent la structure support en Lego
6	Cellule 2 (UR5)	L'UR5 dépose la structure support dans le boitier
7	Robots mobiles	Le robot mobile se dirige vers la cellule 3
8	Cellule 3 (Opérateur)	L'opérateur décharge le boitier
9	Cellule 3 (Yumi)	Le robot Yumi monte les composants Grove
10	Cellule 3 (Opérateur)	L'opérateur réalise le cablage
11	Cellule 3 (Opérateur)	L'opérateur dépose le produit fini dans le bac
12	Robots mobiles	Le robot mobile se dirige vers la cellule 1
13	Cellule 1	L'opérateur décharge le produit fini

Tableau 1. ETAPES DU PROCESSUS DE MONTAGE

B. Déroulé du projet

Cet enseignement de 42 heures se déroule sur 12 séances. Après une première séance de présentation du projet, trois séances sont consacrées à une simulation du SAR via l'outil de simulation de flux Siman-Arena. Les élèves peuvent ainsi comprendre la problématique de gestion des flux correspondants au système étudié, modéliser les différents processus associés aux différentes configurations, et ainsi

appréhender la complexité du processus de reconfiguration. La simulation a pour objectif de comparer plusieurs configurations (cf. exemple à la figure 6) du SAR, en partant d'une configuration initiale imposée, afin de mettre en évidence les gains possibles. Les élèves ont d'abord modélisé le processus en partant de sa description : les ressources, les parcours des RMI, la gamme de fabrication du produit, etc. Ensuite, ils ont identifié différentes configurations, depuis la simple augmentation de la capacité des ressources (cf. figure 7) jusqu'à la définition de nouveaux flux et l'intégration de nouveaux produits. Au total, quatre configurations ont été simulées et comparées à l'aide de quatre indicateurs de performances : le nombre de pièces produites, le temps de séjour des produits dans le système, le taux d'occupation des robots, et le taux d'occupation des opérateurs. Les séances restantes sont consacrées à un travail en équipe visant à mettre en œuvre une production. La dernière séance fait l'objet d'une démonstration du fonctionnement du SAR et de présentations orales. L'équipe enseignante, encadrant les élèves, est constituée des cinq auteurs du présent article et compte des spécialistes de la simulation de flux, de la robotique collaborative, de l'IIoT et de la robotique mobile.

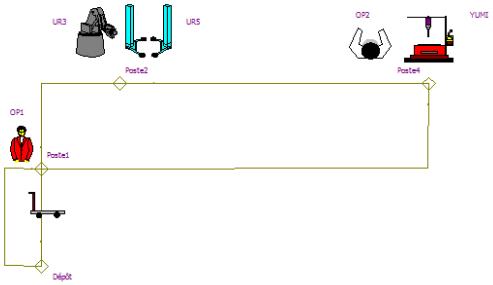


Figure 6. EXEMPLE DE CONFIGURATION (ANIMATION)

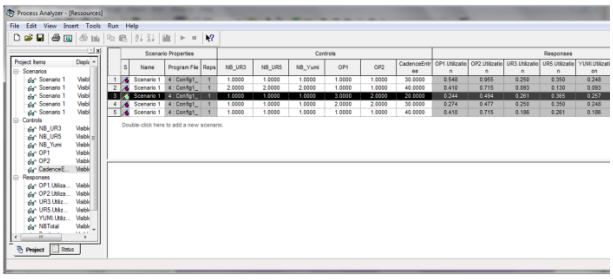


Figure 7. PLAN D'EXPERIENCES POUR SIMULER ET EVALUER DIFFERENTES CAPACITES DES RESSOURCES

Lors du travail en équipe sur le SAR, cinq binômes sont constitués. Les compétences attendues sont différentes selon les postes traités mais contribuent globalement à appréhender les différentes facettes de fonctionnement d'un SAR :

- Le premier binôme réalise l'étude de la cellule n°2 de montage (disposition des UEC robotisées, approvisionnement, agencement de la zone de montage, programmation des robots, étude sécuritaire de la cellule). Les compétences développées visent la maîtrise de la coopération entre robots industriels, des interactions entre robot industriel et robot mobile et des aspects sécuritaires inhérents à ces postes robotisés.
- Le second binôme mène l'étude de la cellule n°3 cobotisée (tâches et interactions Homme-cobot, approvisionnement, agencement de la zone de montage, étude ergonomique du poste de travail, programmation du cobot). Les compétences attendues portent principalement sur la maîtrise des différentes facettes (sécurité, ergonomie) d'une application en robotique collaborative.
- Le troisième s'intéresse au transfert des produits entre les cellules du RAS (gestion des interactions entre les RMI, les UEC et les opérateurs, programmation des RMI). Les compétences développées dans ce cadre portent principalement sur la maîtrise d'une application en robotique mobile avec application des concepts de pilotage par le produit.
- Le quatrième est en charge de la logistique interne à la cellule n°2. Les tâches réalisées visent plus particulièrement l'étude des possibles solutions de logistique interne (ex. convoyeurs à palettes, palettes autonomes).
- Enfin, le dernier binôme a pour mission de proposer une implantation de la cellule n°1 (chargement / déchargement) ainsi qu'un agencement du bac dans lequel le produit et certains constituants sont transportés. Il assure aussi la traçabilité des produits, le suivi de production et la remontée d'informations à des fins de maintenance. Les compétences attendues concernent principalement la maîtrise des flux informationnels associés aux produits et aux ressources au sein d'un RAS en utilisant les concepts et outils de l'IIoT.

Ces cinq binômes œuvrent conjointement sous la direction d'un chef de projet, chargé d'animer les échanges d'idées, de vérifier la cohérence des choix techniques et de coordonner l'avancement des différentes tâches. Il doit aussi veiller à la qualité des livrables produits à l'issue du projet (rapports, supports visuels) et assurer la coordination avec l'équipe enseignante. D'un point de vue opérationnel, il participe également à l'étude du flux intercellulaire qui nécessite d'appréhender le fonctionnement global du SAR.

A l'issue du projet, l'évaluation se fait au vu de plusieurs éléments :

- une démonstration globale de fonctionnement du SAR permettant d'évaluer la cohérence globale des choix effectués par les équipes et les efforts de coordination réalisés ;
- des évaluations (démonstrations ciblées, présentations PowerPoint, rapports), binôme par binôme, permettant d'évaluer les compétences acquises.

C. Premiers retours d'expérience

Outre les compétences techniques indispensables à la réalisation de chacune des tâches, les élèves ont dû se coordonner et interagir de façon à mener à bien le projet sous la direction du chef de projet, améliorant ainsi leurs compétences relationnelles et organisationnelles.

Bien accueilli, le projet a eu un effet très positif sur le développement des compétences des élèves. Les principales difficultés qu'ils ont rencontrées proviennent de l'expertise

nécessaire dans de nombreux domaines comme la robotique, la cobotique, l'informatique industrielle, la conception mécanique, la gestion industrielle, la gestion de projet, ce qui limite, en outre, ce type d'activité pédagogique à des apprenants en fin de cursus. Ces difficultés sont assez clivantes parmi les étudiants : certains sont découragés par les manques de compétences opérationnelles qu'ils doivent surmonter, alors que d'autres y voient la possibilité de mettre en pratique leurs savoir-faire dans un contexte concret et cohérent.

IV. Conclusion et perspectives

Cet article a présenté le SAR déployé à l'INSA Haut-de-France. Ce SAR sert pour l'enseignement, la recherche et de démonstrateur auprès d'industriels de la région. Une première expérience d'enseignement mêlant aspects technologiques et managériaux auprès d'un public d'élèves ingénieurs par apprentissage en dernière année de formation a été relatée.

De nombreux axes d'amélioration et de développement sont envisagés au niveau du SAR. Ils portent à la fois sur de nouveaux concepts et matériels comme des solutions flexibles d'approvisionnement en composants, la standardisation des protocoles de communication entre équipements hétérogènes, mais aussi la standardisation et la simplification de leur prise en main pour en faciliter leur utilisation, tant industrielle que pédagogique.

V. References

[1] Y. KOREN, U. HEISEL, F. JOVANE, T. MORIWAKI, G. PRITSCHOW, G. ULSOY, H. VAN BRUSSEL. "Reconfigurable manufacturing systems", CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 48, 1999, pp. 527-540.

[2] 1 Y. KOREN, M. SHPITALNI. "Design of reconfigurable manufacturing systems", Journal of manufacturing systems, Vol. 29, 2010, pp. 130-141.

[3] 2 H. ELMARAGHY, W. ELMARAGHY. "Smart Adaptable Assembly Systems", Procedia CIRP, Vol. 44, 2016, pp. 4-13.

[4] H-P. WIENDAHL, HA. ELMARAGHY, P. NYHUIS, MF. ZÄH, H-H-H. WIENDAHL, N. DUFFIE, M. BRIEKE. "Changeable manufacturing-classification, design and operation", CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 56, 2007, pp. 783-809.

[5] Z. BI, L. WANG, SY. LANG. "Current status of reconfigurable assembly systems", International Journal of Manufacturing Research, Vol. 2, 2007, pp. 303-328.

[6] G. HUETTEMANN, C. GAFFRY, RH. SCHMITT. "Adaptation of Reconfigurable Manufacturing Systems for Industrial Assembly-Review of Flexibility Paradigms, Concepts, and Outlook", Procedia CIRP, Vol. 52, 2016, pp. 112-117.

[7] J. WEBER, M. STÄBLER, J. BAUMGARTL, K. PAETZOLD. "Mobile Assembly Units as Enabler for Changeable Assembly Lines", Procedia CIRP, Vol. 44, 2016, pp. 383-388.

[8] Sté FESTO. "CP Factory – L'Usine Cyber-Physique mécatronique et l'automatisation", consulté le 02/02/2021 sur : https://www.festo-didactic.com/fr-fr/materiel-education/choix-par-technologie/usine-ecole,systemes-cim-fms/cp-factory/cp-factory-l-usine-cyber-physique-mecatronique-et-l-automatisation.htm

[9] Sté SMC® International Training. "SIF400 Smart Innovative Factory - The training system for Industry 4.0" Catalogue IT-SIF400-V2-1 (67 pages), consulté le 02/02/2021 sur : https://www.smctraining.com/fr/webpage/indexpage/1230

[10] Sté PROLYNK. "Miniaturized AGV for smart product transfer between process", consulté le 02/02/2021 sur : https://www.prolynk.eu/products

[11] Sté BECKHOFF. "Flying Motion: XPlanar ", catalogue DK3462-1118, consulté le 02/02/2021 sur : https://download.beckhoff.com/download/Document/catalog/Beckhoff_XPlanar_e.pdf

[12] Sté ROEQ. "Solutions de rouleau supérieur", consulté le 02/02/2021 sur : https://roeq.dk/fr/solutions/solutions-de-rouleau-superieur/

[13] IEC 61784-3. "Industrial communication networks – Profiles – Part 3: Functional safety fieldbuses – General rules and profile definitions", Edition 3.0, ISBN 978-2-8322-3238-5, 2016.

[14] C. H. KOO, M. VORDERER, S. JUNKER, S. SCHRÖCK, A. VERL. "Challenges and requirements for the safety compliant operation of reconfigurable manufacturing systems", Procedia CIRP, Vol. 72, 2018, pp. 1100–1105.

[15] T. KOCH. "Approach for an automated safety configuration for robot applications", Procedia CIRP, Vol. 84, 2019, pp. 896–901.

[16] Y. SALLEZ, T. BERGER, T. BONTE. "The concept of safety bubble for reconfigurable assembly systems", Manufacturing Letters, Vol. 24, 2020, pp. 77-81.

[17] T. BERGER, T. BONTE, W. DERIGENT, Y. SALLEZ. "Concept de bulle de sécurité «coopérative» dans le cadre d'un système d'assemblage reconfigurable", Actes du 16ème Colloque AIP-Primeca S.Mart, Les Karellis, France, avril 2019.

Session 1-B : Approches innovantes pour la modélisation de la physique

Projet « Réacteur Numérique » : vers un Jumeau Numérique de Réacteur Nucléaire

Benoit Levesque
EDF R&D – EDF Lab Saclay
benoit.levesque@edf.fr

David Gouyon
Université de Lorraine, CNRS, CRAN, F-54000 Nancy
david.gouyon@univ-lorraine.fr

Résumé*—Le projet « Réacteur Numérique » est un projet de recherche et développement de grande ampleur, dans lequel sont impliqués les acteurs majeurs de la filière nucléaire française. Son objectif est d'aboutir à un jumeau numérique de réacteur nucléaire. Ce clone digital permettra de s'immerger virtuellement dans le fonctionnement d'un réacteur, de réaliser des études de simulation ultra-réalistes, de former tous les opérateurs et de valoriser les codes de calcul et le savoir-faire de la filière nucléaire française auprès des exploitants nucléaires étrangers. Ce jumeau pourra à terme être utilisé tout au long du cycle de vie des centrales, de la conception jusqu'à la déconstruction, en passant par l'exploitation et la maintenance. L'originalité du projet est de reposer sur des modèles multi-physiques détaillés, facilitant ainsi la spécification et la validation des exigences de sûreté, les études de fonctionnement et les requalifications fonctionnelles à la suite d'une modification de l'installation. Il améliorera la conception des moyens de conduite des centrales, ainsi que la formation.

***Mots-clés*— Projet de recherche, Jumeau numérique, Réacteur nucléaire, Formation**

I. Presentation generale du projet Reacteur Numerique

Le projet Réacteur Numérique a pour but d'asseoir la compétitivité de la filière nucléaire française en construisant un « jumeau numérique » d'un réacteur nucléaire couvrant les phases de conception, d'exploitation et de déconstruction, en fonctionnement normal, incidentel ou accidentel. Au sein de la filière, l'objectif de ce jumeau numérique [1][2] est de rapprocher tous les acteurs de l'ingénierie (concepteurs, bureaux d'études, offreurs de solutions) et de l'exploitation pour simplifier les processus d'études et sécuriser les marges de sûreté en exploitation, tout en cultivant l'approche de la démonstration par la simulation. Pour l'export, il s'agit de préparer et de structurer une nouvelle offre de services basée sur la simulation numérique et le calcul intensif.

Le Projet Réacteur Numérique est un projet filière, soutenu par le GIFEN (Groupement des Industriels Français de l'Energie Nucléaire) et par le pôle de compétitivité Nuclear Valley. Le projet contribue directement à 4 actions stratégiques du Contrat Stratégique de la Filière[1].

Le projet Réacteur Numérique réunit 9 partenaires : EDF, CEA, Framatome, ESI Group, CORYS, ANEO, AXONE, BOOST et le CNRS (Centre de Recherche en Automatique de Nancy – CRAN). Il est financé par Bpifrance dans le cadre d'un Projet de recherche et développement Structurant Pour la Compétitivité (PSPC)[2].

Le projet Réacteur Numérique porte à la fois des ambitions industrielles, technologiques et économiques. Le coût du projet s'élève à 28,5 M€ avec une force de travail de 186 Equivalents Temps Plein. Le projet a débuté le 1er janvier 2020 pour une durée de 4 ans.

Au niveau industriel, l'ambition est d'améliorer la performance de la filière nucléaire (exploitant, architecte-ensemblier, bureaux d'études et équipementiers) par l'utilisation de services de simulation avancée. Il a également pour objectif d'identifier les conservatismes de conception pour retrouver des marges en exploitation et faciliter la justification de conformité de l'installation.

Au niveau technologique, le projet est structurant car il intègre de nombreux savoir-faire en matière de simulation. Son ambition est de développer deux produits innovants basés sur 3 plateformes technologiques, 23 briques logicielles et au moins 9 modèles physiques préexistants. Pour ce faire, les avancées techniques visées ont pour objectif :

- d'adapter et d'accélérer les couplages entre des codes de calculs multi-physiques multi-échelles existants au sein de la filière nucléaire française, en développant leur interopérabilité ;

- de rapprocher, de façon aisément qualifiable, les modélisations physiques issues des études d'expertise, celles issues des simulateurs de fonctionnement et la grande richesse

[1] https://www.conseil-national-industrie.gouv.fr/comites-strategiques-de-filiere/la-filiere-nucleaire (page visitée le 15/03/2021)

[2] https://www.bpifrance.fr/A-la-une/Appels-a-projets-concours/Projets-de-recherche-et-developpement-structurants-pour-la-competitivite-PSPC-22882 (page visitée le 15/03/2021)

de données d'exploitation avec près de 2100 années réacteurs d'exploitation sûre ;

- de bénéficier des progrès des technologies de visualisation avancée (dont réalité virtuelle, réalité mixte et augmentée), de la puissance des supercalculateurs, du traitement en ligne des données de résultats de calcul haute performance couplé au traitement des données d'exploitation.

Au niveau économique, le projet est structurant pour assoir la compétitivité de la filière dans le domaine numérique et pour bâtir de nouvelles offres à l'export par la vente de produits et de services aux exploitants, aux ingénieries et aux spécialistes simulation en mettant à disposition les moyens de simulation de la filière nucléaire française.

II. ANALYSE DES BESOINS ET IDENTIFICATION DES CAS D'USAGE

Une analyse des besoins de la filière au niveau national et international a permis d'identifier plusieurs phases de vies dans lesquelles le réacteur numérique aurait un intérêt : en ingénierie, en formation, en exploitation pour l'aide à la décision, et pour le démantèlement. Les deux produits innovants développés par le projet Réacteur Numérique, décrits dans les paragraphes suivants, sont :

- Une plate-forme SaaS (Software as a Service) de services de simulation avancée de la physique du réacteur basée sur le couplage de codes spécialisés couvrant toutes les phases de la vie d'un réacteur ;

- Un simulateur d'entraînement pour les exploitants nucléaires permettant de s'entraîner via un ordinateur banalisé sur un simulateur numérique représentatif de l'état physique du réacteur sur lequel il travaille, couplé aux données process, et à des visualisations avancées des phénomènes physiques complexes.

A. Vers un banc d'intégration utilisé en ingénierie

L'un des objectifs du projet est de définir et déployer une plateforme d'intégration commune pouvant accueillir, d'une part, les grands outils de calcul développés dans le cadre de l'activité de la filière nucléaire française et, d'autre part, les services support à la réalisation de tout type d'études (études de conception, études de dimensionnement, expertises diverses, …). Il s'agit d'une plate-forme de co-développement faisant intervenir plusieurs partenaires, spécialisés dans des domaines complémentaires. Elle permettra de réaliser des simulations « high-fidelity » multi-échelles multi-physiques (neutronique, thermo hydraulique, chimie, thermomécanique crayon) couplées sous forme de services web sécurisés en ligne.

Les différents codes de calculs (parmi lesquels figurent Cathare [1], Cocagne [4], Apollo3® [5], Neptune CFD [6], Alcyone [7], ...) qui permettent chacun des simulations dans un domaine de la physique spécifique (neutronique, thermo-hydraulique …) dépendent de bibliothèques différentes ou ayant des versions différentes. Ils reposent sur des mécanismes de configuration disparates. La gestion de telles hétérogénéités constitue une véritable difficulté technique, en particulier dans les environnements HPC (High Performance Computing [8]). Il s'agit donc d'élaborer une plateforme de couplages multi-physiques avec des interfaces, des modèles de données et des structures d'échanges standardisées. L'architecture du banc doit permettre une interopérabilité de l'ensemble des codes de la filière ainsi qu'une substitution aisée d'un code par un autre autorisant des remontées d'échelle (concept de Plug and Play). Leur exécution, massivement parallélisée, devra garantir des contraintes temps-réel. La supervision des calculs doit être définie ainsi que le mode de couplage des codes, via une bibliothèque d'algorithmes dédiés permettant d'adapter l'utilisation du banc d'intégration au scénario traité et aux contraintes matérielles associées.

Cette plate-forme permettra aux ingénieurs de mieux appréhender et de mieux comprendre certains phénomènes physiques existant lors de transitoires d'exploitation via le couplage de codes spécialisés. Elle permettra également de former les nouveaux ingénieurs dans le domaine nucléaire en couplant les études de fonctionnement normal ou incidentel à une visualisation avancée en leur permettant de mieux maîtriser les phénomènes physiques complexes en jeu (Figure 1).

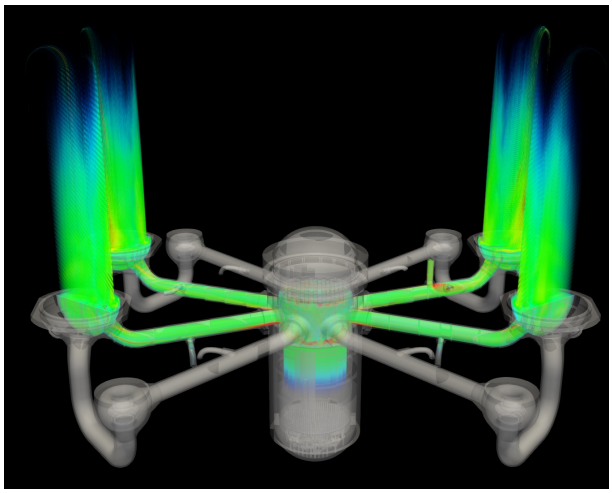


Figure 1. EXEMPLE DE REPRESENTATION DE SIMULATION DANS LE CADRE DES ETUDES

B. Vers un banc utilisé en exploitation pour l'entrainement

Actuellement, les simulateurs de centrale nucléaire (réplique de la salle de commande d'un réacteur) constituent la base pour aller vers un premier « jumeau numérique », représentant le fonctionnement d'un réacteur nucléaire à l'échelle d'un palier (c'est-à-dire d'un type de centrale). Cette plate-forme de simulation de fonctionnement du réacteur, basée actuellement sur des modélisations des principaux composants d'un réacteur nucléaire, est utilisée pour la formation des opérateurs au pilotage ou pour les études de fonctionnement normal ou accidentel.

L'innovation est ici d'enrichir le dispositif actuel de plate-forme de simulation par un simulateur d'entraînement, voire à terme d'aide à la conduite.

Ce simulateur d'entrainement est un « jumeau numérique » d'une installation représentatif de l'état physique d'un réacteur donné (et non du palier, c'est-à-dire du type de réacteur), et pouvant être couplé dynamiquement aux données réelles du site. Ce simulateur du réacteur utilisé pour l'entraînement des exploitants disposera de visualisations avancées pour faciliter la compréhension des phénomènes physiques complexes, simulera les différentes stratégies de conduite dans toute situation de fonctionnement à partir des données temps réel et sera accessible pour tout opérateur sur un poste banalisé. Comme pour les simulateurs actuels, le simulateur d'entraînement doit fonctionner en temps réel pour satisfaire aux usages.

Recalé dynamiquement à partir des données remontant du site, le Réacteur Numérique pourra apporter à terme aussi une aide à la conduite pour anticiper l'évolution d'un point de fonctionnement et surveiller le respect des marges de pilotage. Un tel outil accompagne la montée et le maintien en compétence d'une population d'exploitants qui a significativement rajeuni ces dernières années, en fournissant des services de formation étendus et une aide à l'exploitation (simulation accélérée d'une situation de fonctionnement).

Le simulateur d'entrainement ou d'exploitation permet ainsi de réaliser des simulations dynamiques, avec des modèles qualifiés (issus du banc d'intégration des études) et conformes à la tranche avec laquelle il est « apparié ».

En s'appuyant sur les modules de réduction de modèles (module défini dans le cadre du banc d'intégration utilisé en ingénierie) et de visualisation avancée, le but est de spécifier le simulateur d'entrainement à destination des opérateurs de conduite et des exploitants, ainsi que le banc d'intégration support à sa réalisation. Les activités du projet en ce sens sont la définition des fonctionnalités du simulateur d'entrainement, de l'architecture support au cadencement/co-exécution des modèles à distance, le développement du Banc d'Intégration pour l'Exploitation et de ses nombreuses passerelles, le processus support de conception et de paramétrage du Réacteur Numérique pour l'Exploitant.

C. Visualisation avancée et interactive des phénomènes physiques complexes

Couplé au simulateur d'entraînement (cf. § précédent), les travaux entrepris se focalisent sur les moyens de visualisation avancée (Figure 2) pour faciliter la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu lorsque l'opérateur effectue une action de pilotage en situation normale ou incidentelle. L'objectif est de permettre à toute personne de mieux « maîtriser ce qu'il ne voit pas » dans les domaines de la thermo-hydraulique, neutronique, mouvements d'eau …

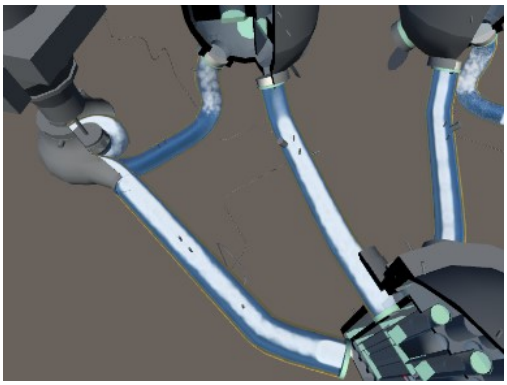


Figure 2. EXEMPLE DE VISUALISATION AVANCEE – ECOULEMENT DE FLUIDE DANS LE CIRCUIT PRIMAIRE D'UN REACTEUR NUCLEAIRE

Pour ce faire, le projet bénéficie des progrès dans le domaine du traitement interactif de grandes masses de données par les techniques de réalité virtuelle et de réalité augmentée pour pouvoir interagir en ligne avec le calcul et restituer ce qu'il se passe du point de vue de la simulation multi-physique et de la conduite des réacteurs.

III. VERROUS SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

Le projet Réacteur Numérique est un Projet de recherche et développement Structurant Pour la Compétitivité (PSPC) ayant pour objectif principal de réaliser des activités de Développement Expérimental. Pour la filière nucléaire française, le principal avantage de ce projet réside dans la mutualisation des efforts de développement et la mise en commun des outils (modèles numériques) et des plateformes pour accélérer les études. La mutualisation des efforts de développement permet de lever des verrous scientifiques et technologiques existant, permettant à terme l'industrialisation des innovations citées ci-dessus.

Pour chaque verrou scientifique et technologique, un état de l'art a été fait, ainsi qu'une définition des développements prévus dans le cadre du projet et les critères de réussite permettant de juger la levée de ce verrou.

Sur le plan scientifique, plusieurs avancées sont visées : simulations multi-échelles, multi-physiques couplées high fidelity, massivement parallélisées ; interopérabilité des modèles physiques au sein de la filière nucléaire ; réduction de modèles et intelligence artificielle ; moyens de calcul haute performance ; propagation d'incertitudes à travers les calculs couplés …

Sur le plan technologique, nous pouvons citer : étendre le périmètre de simulation actuellement disponible ; rendre la visualisation interactive en physique nucléaire ; fournir des solutions généralisables …

Ces verrous peuvent être liés au développement du banc d'études ou du banc d'exploitation ou de l'ensemble du projet.

A. *Verrous liés au banc d'étude*

1) Distribution des calculs paramétriques.

Il s'agit de pouvoir réaliser des calculs multi-physiques indépendants dans des environnements massivement parallèles et massivement distribués sans perte de données. Pour cela, il faut réduire la pression sur le système de fichiers en utilisant des données directement accessibles depuis les autres nœuds de calcul, faire varier le nombre de machines utilisées au cours de l'exécution, et intégrer des mécanismes de tolérance aux pannes. Cela implique également de mettre en place des protocoles de communication dynamiques qui soient compatibles avec des codes tolérants aux pannes et avec l'équilibrage dynamique dans les différents codes utilisés.

2) Qualification de codes couplés.

Jusqu'à présent pour qualifier des codes de calculs couplés, la pratique était de qualifier chacun des codes (aussi appelés Outil de Calcul Scientifique - OCS) mis en jeu et de vérifier le bon fonctionnement des interfaces. Le guide ASN 28 [9] de l'Autorité de Sûreté Nucléaire indique qu'il faut désormais qualifier le couplage des codes en considérant l'ensemble comme un OCS à part entière. La définition de standards d'interopérabilité permettra de simplifier la démarche de qualification.

3) Propagation des incertitudes lors de calculs couplés.

Une représentativité améliorée des modélisations conduisant à une meilleure connaissance du système, il devient alors possible de réduire les marges prises pour l'exploitation des réacteurs. Cette réduction des marges ne peut être acceptée que si elle est associée à une connaissance des incertitudes sur les grandeurs dimensionnantes. La connaissance de ces incertitudes est obtenue par une évaluation des incertitudes en entrée de calcul (incertitudes sur les valeurs et incertitudes de modèle) et de leur effet sur les résultats du calcul. Le banc d'intégration doit donc permettre le couplage avec les outils de caractérisation des incertitudes disponibles.

4) Remontée d'échelles.

En pratique, des remontées d'échelles sont souvent réalisées : elles permettent de passer d'une échelle « fine » à une échelle « grossière », en fonction des besoins, à des fins de validation de code ou de développement de modèles. On distingue différents types de remontée d'échelle : géométrique, de maillage et de modélisation. Il est donc nécessaire de maîtriser les liens complexes entre les différentes échelles de simulation pour être à même d'exploiter correctement une solution numérique.

B. *Verrous liés au banc d'exploitation*

1) Interactivité des modèles physiques et de la visualisation avancée.

En phase d'exploitation, les utilisateurs du réacteur numérique (opérateurs exploitants ou en formation) vont être amenés à prendre des décisions qui dépendent de leur perception de l'état courant du réacteur, pour mettre en place des actions de conduite. Pour cela, ils ont besoin de visualiser les phénomènes physiques en cours, selon une ergonomie qui leur soit adaptée. Il faut donc développer une méthodologie outillée pour disposer, d'une part, d'un jumeau numérique « interactif » à la main de l'opérateur, et, d'autre part, de vues des phénomènes satisfaisant des principes d'ergonomie et de facteurs humains adaptés aux exploitants.

2) Génération automatique des observateurs

L'un des objectifs du jumeau numérique est de permettre la détection de l'occurrence de sorties de plages de valeurs sur les variables caractérisant les phénomènes physiques. Les plages de fonctionnement sont définies à partir de la documentation d'exploitation et de la configuration courante de la tranche. Pour surveiller la sortie de ces plages de fonctionnement, il faut donc générer des observateurs (modélisables à l'aide de logiques temporelles [10]), et les utiliser en temps-réel de manière à générer des alarmes, ce qui impose des contraintes sur les temps de calcul.

3) Réduction de modèles et encapsulation dans les simulateurs de fonctionnement.

Les choix de modélisation pourront être adaptés en fonction du niveau de modélisation souhaité. Ces modèles pourront être dégradés (réduits) afin de satisfaire des temps de calculs compatibles avec les besoins des simulateurs (en lien avec le temps réel) tout en en maitrisant les biais associés. Dans le cadre de ce projet, les approches non intrusives de réduction de modèles seront considérées [11][12], les approches intrusives pouvant par ailleurs être prises en charge directement par les codes de calcul.

C. *Verrous communs aux études et à l'exploitation*

1) Visualisation pédagogique de phénomènes physiques complexes.

Que ce soit en phase d'ingénierie, pour le dimensionnement ou la vérification, ou en phase d'exploitation pour l'aide à la décision ou la formation, l'information relative à l'état courant de l'installation doit être transmise de manière qu'elle soit comprise, c'est-à-dire adaptée aux capacités cognitives et aux pratiques des utilisateurs. Pour cela, les visualisations devront faire appel à des métaphores représentant les phénomènes physiques en jeu. Ces métaphores ne seront pas les mêmes s'il s'agit d'un ingénieur avec un profil scientifique ou s'il s'agit d'un futur opérateur en cours de formation. L'un des verrous est donc de transformer ces métaphores d'un domaine d'utilisation à l'autre, tout en garantissant leur cohérence.

IV. Conclusion et Perspectives

A. *Actions en cours*

Le projet Réacteur Numérique a débuté le 1er janvier 2020, dans un contexte relativement difficile du fait de la pandémie de Covid-19, qui a empêché toute réunion physique des partenaires du projet depuis son lancement. Les travaux techniques sont cependant engagés par tous les partenaires du projet. Les précisions sur les spécifications des produits

innovants et la définition des feuilles de route pour lever les différents verrous technologiques et scientifiques ont fait l'objet des premiers échanges entre partenaires.

En parallèle, à l'image des « Business Aspects » mis en avant dans [2], un travail sur la (ou les) proposition(s) de valeur des produits et services développés dans le cadre du projet Réacteur Numérique a été initié entre les partenaires avec les futurs utilisateurs. L'objectif est de s'assurer que les développements réalisés répondent à leurs attentes.

B. Vers une utilisation du réacteur numérique …

Le Réacteur Numérique est un outil important pour l'amélioration continue de la sûreté. Il va permettre de disposer d'un clone digital intégrant toutes les particularités de chaque réacteur nucléaire. De plus, en organisant et en assemblant les briques de simulation, il va faciliter la mise à jour ou le remplacement des codes de calcul par d'autres, intégrant les dernières avancées de la physique par exemple. Ceci sera important pour les études de conception qui utilisent beaucoup la simulation pour faire la preuve de la sûreté des installations dans toutes les situations normales, incidentelles ou accidentelles. En y intégrant les données spécifiques de chaque installation, en facilitant le remplacement des briques logicielles, les études vont gagner en représentativité et en précision.

Le réacteur numérique va faire progresser les modèles de calcul en y intégrant de nouvelles données. Ces données réelles permettront de réduire les incertitudes de nos modèles, de renforcer la validation, de les rendre plus robustes et plus prédictifs.

En développant des plates-formes numériques, le projet va permettre d'offrir des services beaucoup plus souples aux clients de la filière nucléaire, français comme internationaux.

C. … en formation

Dans le cadre du projet Réacteur Numérique, l'expertise du Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN), qui est une unité mixte de recherche (UMR 7039) commune à l'Université de Lorraine (UL) et au CNRS, porte à la fois sur les approches d'Ingénierie Système Basée sur les Modèles, avec en particulier l'architecture système et la cosimulation, et à la fois sur la prise en compte dans les modèles de simulation d'un ensemble de caractéristiques complémentaires, historisées dans les outils de PLM, liées à la physique, aux dysfonctionnements, au vieillissement et la dégradation, ainsi qu'au contrôle-commande. L'innovation apportée par le projet Réacteur Numérique réside d'une part dans la définition d'un cadre de cosimulation reposant sur des briques existantes qui seront paramétrables en fonction des services requis par les utilisateurs de la plateforme. Elle réside, d'autre part, dans le couplage de modèles dysfonctionnels et de vieillissement du réacteur, avec son contrôle-commande.

D'un point de vue académique, plusieurs catégories d'utilisateurs et plusieurs cas d'utilisation du jumeau numérique sont envisagés. En premier lieu, du côté « recherche », le jumeau numérique est un contexte industriel d'étude dans lequel les travaux sur l'Ingénierie Système Basée sur les Modèles et sur la Sûreté de Fonctionnement pourront être menés. Il s'agit notamment de ceux en cours sur la capitalisation et la réutilisation du savoir-faire d'ingénierie (c'est-à-dire les actifs d'ingénierie) [13] et ceux portant sur la prise en compte des dégradations liées au vieillissement des matériels [14].

D'un point de vue de la « formation », l'idée est de transférer ces résultats, principalement au niveau master. Le réacteur numérique vient comme un cas d'étude sur lequel les étudiants des masters et des écoles d'ingénieurs de l'Université de Lorraine (notamment ceux du master en Ingénierie des Systèmes Complexes[3] et de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique[4]) pourront appliquer les approches de spécification de modèles de simulation.

Pour l'exploitant, le Réacteur Numérique permettra aux opérateurs de mieux s'entraîner aux gestes courants et de s'adapter aux évolutions de nos pratiques. En aidant les opérateurs à mieux se représenter ce qui se passe physiquement dans les pompes et les tuyaux, à visualiser précisément les échanges thermiques, le Réacteur Numérique améliorera la qualité d'exploitation.

D. … en dehors de la filière nucléaire française

Plusieurs briques logicielles développées dans le cadre projet Réacteur Numérique auront des retombées pour certains partenaires en dehors du domaine nucléaire.

L'utilisation du réacteur numérique pourra être portée à l'export du fait de la similarité des technologies employées dans les différents réacteurs au niveau mondial.

E. Conclusions

Le projet Réacteur Numérique contribue directement au Contrat Stratégique de la Filière Nucléaire. Il vise à garantir le maintien des compétences et l'expertise de la filière nucléaire française, et à structurer la démarche d'innovation grâce au numérique.

Il valorise, fait savoir et fait partager le meilleur de la simulation numérique dans le nucléaire. Chaque réacteur du parc nucléaire français disposera ainsi d'un clone numérique représentatif de son fonctionnement et qui évoluera au rythme de l'usine, sur tout son cycle de vie. Tout ce savoir-faire accumulé par la filière pourra être mis au service des autres exploitants. Enfin, ce projet accélère la différenciation avec la concurrence internationale par l'innovation et la fédération des principaux acteurs du domaine de la simulation numérique pour la physique des réacteurs.

[3] http://fst.univ-lorraine.fr/formations/master-ingenierie-des-systemes-complexes (page visitée le 15/03/2021)

[4] https://ensem.univ-lorraine.fr/ (page visitée le 15/03/2021)

V. REFERENCES

[1] Sharma, A., Kosasih, E., Zhang, J., Brintrup, A., & Calinescu, A., “Digital Twins: State of the Art Theory and Practice, Challenges, and Open Research Questions”. 2020. *arXiv preprint arXiv:2011.02833*

[2] Lim, K.Y.H., Zheng, P. & Chen, C. “A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives”. Journal of Intelligent Manufacturing 31, 2020, 1313–1337.

[3] Mauger, G., Tauveron, N., Bentivoglio, F., & Ruby, A., “On the dynamic modeling of Brayton cycle power conversion systems with the CATHARE-3 code”. Energy, 168, 2019, 1002-1016.

[4] Brosselard, C., Ansar Calloo, David Couyras, François Févotte, Matthieu Guillo, Coline Brosselard, Bertrand Bouriquet, Alexandre Dubois, Enrico Girardi, Fabrice Hoareau, Marie Fliscounakis, Hadrien Leroyer, Etienne Noblat, Yann Pora, Laurent Plagne, Angélique Ponçot, Nadine Schwartz, “COCAGNE: EDF new neutronic core code for ANDROMÈDE calculation chain, &C 2017", International Conference on Mathematics & Computational Methods Applied to Nuclear Science & Engineering, Jeju, Korea, April 16-20, 2017

[5] Faure, B., Archier, P., Vidal, J. F., Palau, J. M., & Buiron, L. “Neutronic calculation of an axially heterogeneous ASTRID fuel assembly with APOLLO3®: Analysis of biases and foreseen improvements”. Annals of Nuclear Energy, 115, 2018, 88-104.

[6] Guelfi, A., Bestion, D., Boucker, M., Boudier, P., Fillion, P., Grandotto, M., ... & Péturaud, P., “NEPTUNE: a new software platform for advanced nuclear thermal hydraulics”. Nuclear Science and Engineering, 156(3), 2007, 281-324.

[7] Marelle, V., Goldbronn, P., Bernaud, S., Castelier, É., Julien, J., Nkonga, K., ... & Ramière, I., “New developments in ALCYONE 2.0 fuel performance code”. Top Fuel 2016 – Light Water Reactor (LWR) Fuel Performance Meeting, 2016, Boise, United States.

[8] Shams, A., De Santis, D., Padee, A., Wasiuk, P., Jarosiewicz, T., Kwiatkowski, T., & Potempski, S., “High-Performance Computing for Nuclear Reactor Design and Safety Applications”. Nuclear Technology, 206(2), 2020, 283-295.

[9] ASN, "Guide N°28 : Qualification des outils de calcul scientifique utilisés dans la démonstration de sûreté nucléaire – 1re barrière", https://www.asn.fr/, version du 25/07/2017.

[10] Rapin N., “ARTiMon monitoring tool – The time domains”, RV-CuBES 2017, International Workshop Competitions, Usability, Benchmarks, Evaluation, and Standardisation for Runtime Verification Tools. Kalpa Publications in Computing, Volume 3, 2017, Pages 106–122

[11] da Silva, F. "Méthodologies de réduction de modèles multiphysiques pour la conception et la commande d’une chaîne de traction électrique". 2015. Thèse de doctorat. Université Paris-Saclay

[12] Besselink, B., Tabak, U., Lutowska, A., van de Wouw, N., Nijmeijer, H., Rixen, D. J., ... & Schilders, W. H. A. (2013). “A comparison of model reduction techniques from structural dynamics, numerical mathematics and systems and control”. Journal of Sound and Vibration, 332(19), 4403-4422.

[13] Wu, Q., Gouyon, D., Levrat, E., & Boudau, S., “Use of patterns for know-how reuse in a model-based systems engineering framework”. IEEE Systems Journal. 14(4), pp. 4765-4776, doi: 10.1109/JSYST.2020.2975116, 2020

[14] Boyer, G., Brinzei, N., Camerini, J., Ndiaye, M., Pétin, J-F., “Dynamic dependability assessment of industrial control systems using colored stochastic Petri nets”. 30th European Safety and Reliability Conference and 15th Probabilitic Safety Assessment and Management Conference, ESREL 2020 PSAM 15, Nov 2020, Venice, Italy

Influence des jeux et des désalignements sur un assemblage simple cisaillement

Assemblage Hole to Hole d'une structure aéronautique

Guillaume Pichon
AIRBUS Opérations S.A.S.
Institut Clément Ader, UMR CNRS 5312,
INSA/UPS/ISAE-SUPAERO/Mines Albi
Toulouse (France)
gpichon@insa-toulouse.fr

Eric Paroissien
Institut Clément Ader, UMR CNRS 5312,
INSA/UPS/ISAE-SUPAERO/Mines Albi
Toulouse (France)
eric.paroissien@isae-supaero.fr

Alain Daidié
Institut Clément Ader, UMR CNRS 5312,
INSA/UPS/ISAE-SUPAERO/Mines Albi
Toulouse (France)
alain.daidie@insa-toulouse.fr

Audrey Benaben
AIRBUS Opérations S.A.S.
Toulouse (France)
audrey.benaben@airbus.com

Résumé— Le but principal du travail présenté ici est d'étudier l'effet du jeu et des désalignements des trous des fixations sur le comportement jusqu'à rupture en statique des assemblages aéronautiques. A cet effet, une approche expérimentale est adoptée pour évaluer l'influence de ces paramètres. Dans l'approche expérimentale, des éprouvettes en titane assemblées en simple cisaillement avec deux boulons sertis sont testées sous chargement axial quasi-statique. Plusieurs configurations de désalignement sont établies, pour quantifier la résistance mécanique des assemblages. Les résultats montrent une diminution importante des performances dans la configuration avec des grands désalignements. Si le jeu des trous n'a pas d'influence significative, une réduction importante de la résistance est mesurée pour des grands désalignements.

Mots-clés — essai statique, hole-to-hole, désalignement, assemblage boulonné

I. INTRODUCTION

Bien que le secteur aéronautique ait été gravement touché par la crise sanitaire mondiale liée au COVID-19, les besoins en termes d'innovation sont toujours forts. La compétitivité a même été renforcée par l'intérêt grandissant des états et du grand public pour les challenges écologiques modernes.

Dans le cadre de ses activités de recherche, AIRBUS s'intéresse aux nouvelles méthodes d'assemblages des structures aéronautiques. En effet le procédé d'assemblage classique, bien que maitrisé et optimisé, présente plusieurs inconvénients majeurs le rendant moins compétitif. L'un de ces inconvénients est la lourdeur du processus d'assemblage final avec de nombreuses opérations telles que les différentes phases de repositionnement des grandes pièces structurales les unes en faces des autres.

Le besoin en outil de perçage dans le processus d'assemblage est un facteur important dans le calcul des coûts récurrents. Afin de fortement réduire ces coûts, **Bloem [1]** introduit un nouveau processus d'assemblage appelé *hole to hole.*

Le principe à la base de ce nouveau processus est de supprimer les opérations de perçage dans la phase d'assemblage final. Ainsi les pièces élémentaires sont percées individuellement en amont sur leur chaine de production. Dès lors la phase d'assemblage final consiste uniquement à la mise en position des pièces et à l'installation des fixations définitives. Bien que cette nouvelle méthodologie soit très intéressante d'un point de vue économique et vis-à-vis du temps gagné en phase d'assemblage, elle présente un risque majeur lors du regroupement des pièces. En effet, les trous des fixations peuvent être légèrement décalés de leurs positions nominales. Les positions relatives n'étant pas parfaitement respectées les fixations ne peuvent être correctement installées dans les alésages et l'assemblage n'est plus possible. Afin d'y remédier, la solution technique la plus appropriée est d'augmenter les diamètres des alésages. Ainsi une fois les pièces mises en position, l'installation des fixations est néanmoins possible malgré les potentiels désalignements.

La problématique essentielle de ce nouveau processus d'assemblage est alors le tolérancement des trous de perçage. Il existe plusieurs travaux de recherche à ce sujet, notamment les travaux de **Lecomte [2],** qui s'appuient sur une approche probabiliste couplée à un modèle analytique afin de prédire les niveaux de chargement d'un assemblage en prenant en compte les erreurs de positions des trous de fixations.

A l'heure de l'industrie 4.0 et du tout numérique, les approches assistées par ordinateur sur les sujets de

tolérancement sont également répandues dans la littérature. On trouve notamment les travaux de **Xu [3]**, de **Liu [4]** et de **Askri [5,6]**. Ces travaux présentent des approches probabilistes basées sur des calculs statistiques couplés à des modèles numériques éléments finis (EF) permettant d'obtenir une haute fidélité de la représentation des phénomènes physiques en jeu dans les assemblages.

Ces différents travaux mettent en avant les risques liés à l'incertitude de position relative des trous des fixations sur le niveau de chargement de chaque fixation au sein d'un assemblage. Or il est difficile de trouver dans la littérature des publications faisant référence à des campagnes expérimentales prenant en compte les paramètres d'assemblage que sont les jeux radiaux et les désalignements. On trouve néanmoins les travaux de **M.A. McCarthy [7]** sur l'effet des jeux radiaux sur les assemblages en matériaux composite. De plus, ils ne prennent pas en compte les potentiels désalignements liés à au processus d'assemblage *hole to hole*.

Afin d'appliquer ce processus d'assemblage, l'influence de du jeu et du désalignement sur les performances mécaniques doit être étudiée. Des essais physiques permettraient non seulement de quantifier les abattements mécaniques supposés mais également de comprendre les mécanismes physiques qui mènent à ces abattements. Tels sont donc les objectifs de la campagne expérimentale présentée dans cet article.

La structure étudiée en particulier dans cet article est le mât réacteur, les éprouvettes sont donc constituées de titane un matériau à la fois très résistant d'un point de vue mécanique mais également très adaptée aux larges variations thermiques de cette zone structurelle. Il s'agit en particulier du titane Ti-6Al-4V β, un métal développé pour l'aéronautique.

II. CAMPAGNE EXPERIMENTALE

A. Description des éprouvettes

La géométrie des éprouvettes utilisées dans cette campagne est présentée en Figure 1, les dimensions sont données par le Tableau 1. Le diamètre des fixations est de d=6,35mm, cette grandeur pilote le reste des dimensions. Les ratios de largeur, de distance au bord, de pas entre les boulons et d'épaisseur par rapport au diamètre des fixations sont *W/d=7, e/d=2, p/d=4, t/d=0,5 respectivement*

Les fixations choisies pour cette campagne d'essais sont des fixations serties en titane à têtes protubérantes, de la référence ABS0998-4 associés à des bagues ABS0999-4. Le choix de ces fixations est lié à la faible variation de la tension installée caractéristique de ce type de fixation. En effet, les fixations filetées sont généralement installées au couple mais les phénomènes de friction dans les filets et sous écrou sont générateurs d'une incertitude importante quant à la pré tension réellement installée

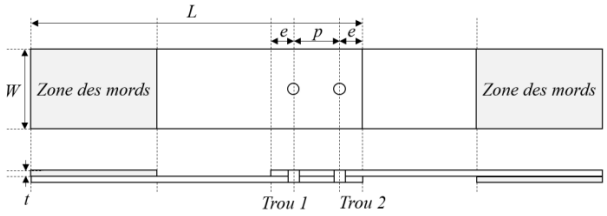


Figure 1. GEOMETRIE DES EPROUVETTES

Dimensions	L	*e*	*p*	*W*	*t*
Valeurs en mm	184,3	12,7	25,4	44,45	3,175

Tableau 1. DIMENSIONS DES EPROUVETTES

Les paramètres principaux de l'étude sont naturellement les diamètres et les désalignements des trous de fixations. Un total de sept configurations ont été établies pour cette campagne. Ces différentes configurations sont présentées à l'aide du Tableau 2. L'orientation ainsi que la valeur des désalignements sont illustrées en Figure 2. Le paramètre α permet d'identifier les positions des trous de fixation sur les plaques élémentaires, ainsi que les désalignements relatifs.

La configuration identifiée A0 représente la référence de cette campagne. En effet, le jeu radial est compris entre 8 et 34 centièmes permettant un assemblage à la main des fixations. Les configurations B5, C5 et F5 présentent différents types de désalignement dans le sens de chargement des éprouvettes tandis que les configurations D5 et E5 présentent des désalignements orthogonaux au sens de chargement. Les coupons métalliques sont usinés individuellement afin d'être représentatifs du processus d'assemblage testé. Lors de la phase d'assemblage les deux fixations sont introduites et maintenues en position avant d'être serties pour éviter les erreurs de montage. On fait la remarque ici que les têtes de fixation sont installées du même côté, celui du substrat bleu selon la Figure 2.

ID	Type	d fixation (mm)	Ø *perçage (mm)*	*α (mm)*
A0	A	6,325 ± 0,013	6,382 ± 0,01	0
A5	A		6,882 ± 0,01	0,5
B5	B			
C5	C			
D5	D			
E5	E			
F5	F			

Tableau 2. DIMENSIONS DES EPROUVETTES

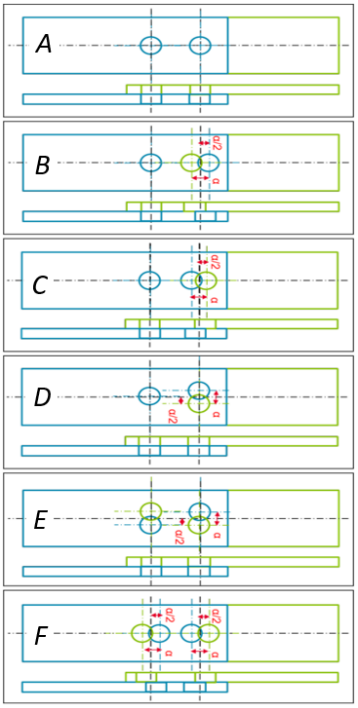


Figure 2. CONFIGURATIONS DES DESALIGNEMENTS

B. *Déscription des essais*

Lors des essais de cette campagne, les éprouvettes sont chargées en déplacement imposé (0.01 mm/s), jusqu'à rupture. La machine utilisée ici est une INSTRON 8501 (Figure 3) de capacité 100kN. Pour chaque configuration, trois éprouvettes sont testées. Au cours des montées en charge le déplacement imposé aux éprouvettes ainsi que l'effort déployé par le vérin de la machine de traction sont enregistrés avec une fréquence de 5Hz. Sur une des trois éprouvettes de chaque configuration un mouchti a préalablement été peint, ainsi un suivi par stéréo corrélation d'image est possible. Celui-ci permet d'obtenir les champs de déplacement et de déformation sur la surface extérieure des éprouvettes coté têtes de fixation, Figure 5.

III. RESULTATS

A. *Courbe effort déplacement*

Les premiers résultats observés sont les courbes effort déplacement, Figures 5 à 12. Celles-ci permettent d'analyser le comportement de l'assemblage lors des montées en charge. L'analyse menée ici est purement qualitative, puisque les efforts présentés ont été normés par la valeur maximale enregistrée lors des essais de référence (A0). L'analyse configuration par configuration des courbes montre 4 types de comportement, chacun décrit ici de manière chronologique.

La phase 1 est une phase de transfert d'effort par adhérence. Il s'agit d'une zone de montée en charge linéaire de l'éprouvette. L'effort est transmis par friction à l'interface des deux coupons métalliques grâce à la tension installée par les fixations. On remarque que cette phase est similaire pour chacune des configurations, les paramètres majeurs de cette étude n'ont donc aucun impact sur la raideur de l'éprouvette dans cette phase de chargement.

La phase 2 est une phase de glissement. Une fois l'effort d'adhérence limite vaincu la friction ne suffit plus à transmettre l'effort global. Un glissement est alors occasionné entre les deux coupons de l'éprouvette. On observe alors un palier d'effort et une variation important du déplacement. Si l'effort d'adhérence limite est tout à fait répétitif d'une configuration à l'autre, 12% de la valeur maximale normative, la valeur du déplacement est dépendant non seulement de la configuration mais également du montage l'éprouvette. On remarque ainsi des écarts de déplacement entre des éprouvettes de même configuration. Les paramètres que sont les jeux ainsi que les positions relatives des trous ont un impact direct sur la valeur du glissement. On remarque que les configurations A0, C5 et F5 présentent une phase de glissement avec un déplacement faible (0.1 à 0.2 mm). Il s'agit des configurations où au moins une des fixations est directement en contact avec l'alésage limitant ainsi la valeur du déplacement lors du glissement. Au contraire, les configurations A5, B5 et E5 présentent une phase de glissement avec un déplacement important lié au jeu radial et à la direction des désalignements.

La phase 3 est une phase de transfert d'effort par matage linéaire. Suite au glissement relatif des coupons, au minimum une des deux fixations de l'assemblage est en contact avec l'alésage. L'effort est alors transmis par matage du fut de fixation sur l'alésage des coupons. Cette phase de chargement est caractérisée par une raideur définie comme le rapport de l'effort sur le déplacement. On observe que les configurations A0, A5, D5 et E5 ont sensiblement les mêmes raideurs environ 0,64 mm^{-1}. En effet, les courbes effort déplacement de ces configurations sont parallèles dans ces zones. En revanche les configurations B5, C5 et F5 semblent présenter une raideur plus faible de l'ordre de 0,40mm^{-1}.

La phase 4 est une phase de transfert d'effort par matage non linéaire. Les courbes montrent une forte chute de raideur. Cette chute semble être liée à la plastification des fixations. En effet l'effort évolue faiblement par la suite tandis que le déplacement augmente fortement (1 à 1,5mm). La fin de cette phase se traduit par la rupture des fixations et donc la fin de l'essai. Dans le cas de la configuration F5, la rupture légèrement différente est expliquée ci-après.

Dans le cas des configurations B5 et C5, il est difficile de distinguer les phases 3 et 4 sur les courbes effort déplacement. En effet, on observe des chutes et des augmentations de la raideur de ces assemblages. Bien que la description phase par phase des montées en charge permet de comprendre les phénomènes observés dans la plupart des configurations certains phénomènes restent inexpliqués, notamment concernant les configurations B5, C5 et F5.

La différence de raideur dans la phase de matage linéaire viendrait donc des désalignements particuliers de ces configurations. Suite au glissement, une seule des deux fixations serait en contact avec les alésages des coupons métalliques et reprendrait alors tous les efforts de l'assemblage. Les résultats du suivi par corrélation d'images permettent de

confirmer cette théorie. La Figure 5 montre les déformations εxx (direction de chargement) au cours de la montée en charge. Les images choisies sont à iso-efforts (26kN). Sur la configuration A5, les déformations semblent réparties sur les deux fixations. En revanche, sur les configurations C5 et F5, les déformations ne sont visibles que sur la fixation du trou n°2 (fixation haute sur l'image). De même sur la configuration B5, les déformations sont également réparties autour d'une seule fixation, la fixation basse.

B. Mode de rupture

Au cours des 21 essais de montée en charge quasi statique, le même mode de rupture a été observé, il s'agit du cisaillement des fixations. L'analyse des profils de rupture montre des stries parallèles au sens de chargement, occasionnées lors de la rupture des fixations (Figure 4). Les plans de rupture se situent au niveau du plan médian des éprouvettes, soit la zone de cisaillement maximal de la fixation. On remarque que pour ce type d'assemblage, le jeu radial n'a pas d'impact sur le mode de rupture, de même que les désalignements.

Les ruptures des deux fixations sont simultanées pour l'intégralité des configurations testées à l'exception de la configuration F5 pour laquelle la fixation du trou n° 2 (Figure 1) casse dans en premier temps puis l'essai continu jusqu'à la rupture de la seconde fixation. Il s'agit du phénomène de déboutonnage décrit par **Guillot [8]**. Ces observations au cours des essais permettent de comprendre l'allure des courbes en Figure 11. La première chute d'effort est liée à la rupture de la première fixation tandis que la deuxième et dernière chute correspondent à la rupture de la seconde.

Une très faible ovalisation des alésages est visible montrant les zones fortement sollicitées par matage au cours des montées en charge.

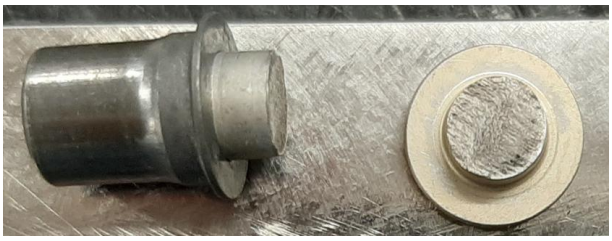


Figure 3. PHOTO D'UNE FIXATION CISAILLEE PENDANT UN ESSAI

C. Effort maximal transmis par l'assemblage

L'analyse des efforts machine permet d'observer l'indicateur de performance mécanique principal, c'est-à-dire l'effort maximal transmis par l'assemblage avant sa rupture. Les valeurs d'effort ont été normées par la valeur de l'effort maximal enregistré au cours des essais sur les éprouvettes de référence A0. L'effort maximal transmis par cette configuration est donc de 1. Le Tableau 3 présente ces résultats. On observe en particulier que les configurations avec des désalignements perpendiculaires au sens de chargement présentent également un effort maximal de 1 tout comme la configuration A5. Le jeu et ce type de désalignement ne semblent donc pas provoquer d'abattement de cette caractéristique mécanique. En revanche, les configurations B5 et C5 présente un abattement de l'ordre de 5% tandis que la configuration F5 présente un abattement de 36%. Il s'agit ici du pire cas de cette campagne expérimentale. Les désalignements de direction parallèle au sens de chargement ont donc un impact important sur l'effort maximal transmissible par l'assemblage

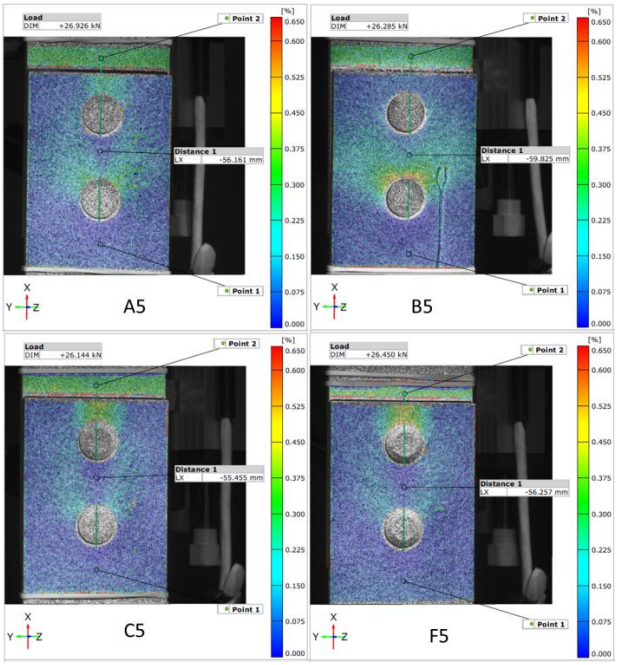


Figure 4. DEFORMATION EXX (SENS DE CHARGEMENT) DES CONFIGURATIONS A5, B5, C5 ET D5

Configuration	A0	A5	B5	C5	D5	E5	F5
Effort max normé à rupture	1	1	0,95	0,94	1	1	0,64

Tableau 3. EFFORTS MAX A RUPTURE NORMES

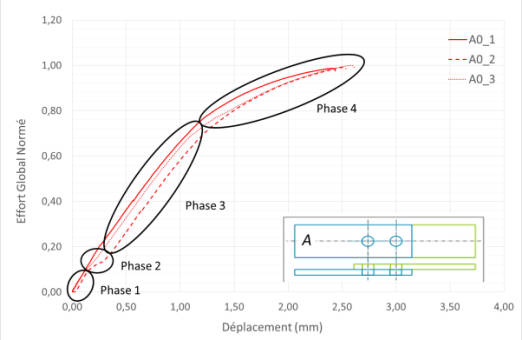


Figure 5. COURBE EFFORT DEPLACEMENT A0

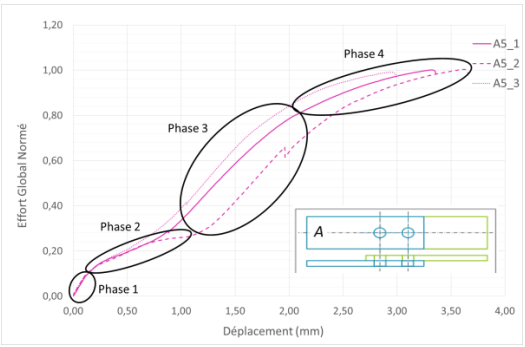


Figure 6. COURBE EFFORT DEPLACEMENT A5

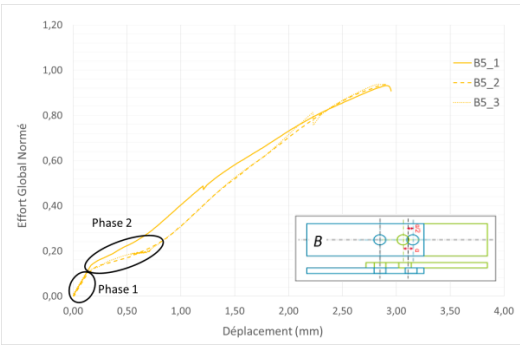


Figure 7. COURBE EFFORT DEPLACEMENT B5

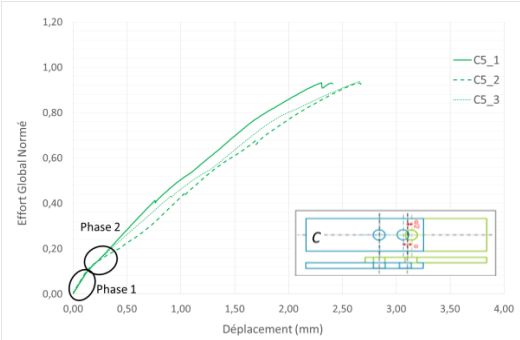


Figure 8. COURBE EFFORT DEPLACEMENT C5

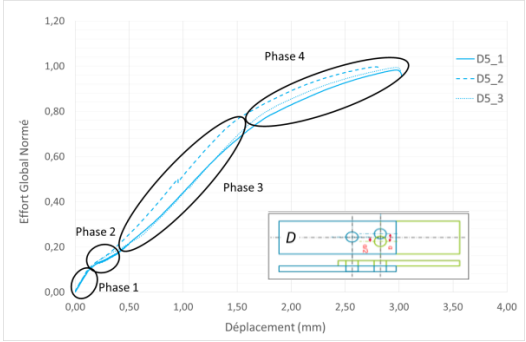


Figure 9. COURBE EFFORT DEPLACEMENT D5

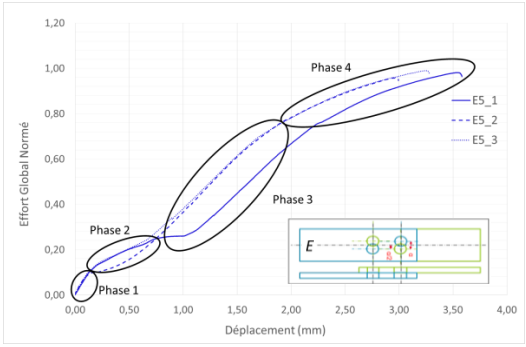


Figure 10. COURBE EFFORT DEPLACEMENT E5

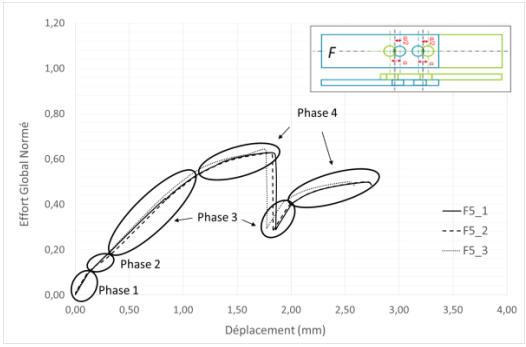


Figure 11. COURBE EFFORT DEPLACEMENT F5

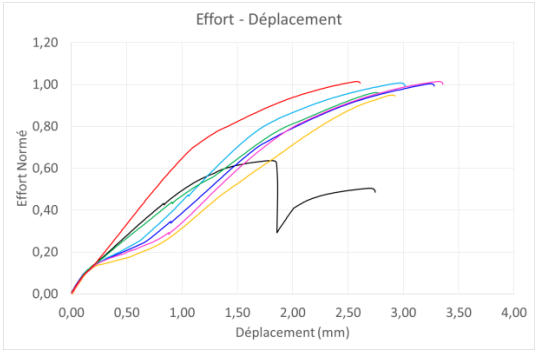


Figure 12. COURBE EFFORT DEPLACEMENT GLOBAL

IV. Conclusion et perspectives

Ce travail montre l'influence des jeux radiaux et des désalignements sur les performances mécaniques d'un assemblage boulonné sollicité en simple cisaillement.

Ni l'augmentation du jeu radial ni les désalignements perpendiculaires au sens de chargement n'ont un impact sur les performances de l'assemblage en termes d'effort maximum avant rupture. En revanche les désalignements parallèles au sens de chargement ont un impact majeur. En effet, le chargement de l'assemblage en est fortement affecté. Dans ces configurations la raideur de l'assemblage est plus faible ce qui occasionne un déplacement plus important lors de la montée en charge. De plus, les seuils de plastification sont atteints à des niveaux de chargement globaux plus faibles d'où les abattements de performance mécanique observés.

Si ce type de comportement a pu être observé pour des assemblages en titane dont le mode de rupture est le cisaillement de fixation. Il n'est pas possible d'affirmer que les mêmes comportements seront observables pour des assemblages ayant des modes de ruptures différents. Les matériaux des pièces assemblées ainsi que ceux des fixations sont donc des paramètres majeurs à investiguer pour l'application d'assemblage *hole to hole* .

La suite de ce projet de recherche sera donc de compléter la campagne expérimentale afin de comprendre l'impact des désalignements quel que soit l'assemblage aéronautique testé. Le développement d'un modèle numérique permettrait de tester beaucoup de configurations et ainsi réduire fortement les coûts des essais physiques.

L'impact des jeux et des sur la durée de vie des assemblages doit également être déterminé. En effet des essais de fatigue prenant en compte ces paramètres doivent également être menés dans la suite du projet.

V. Reconnaissances

Le travail présenté dans cet article fait partie intégrante d'un projet de recherche interne à AIRBUS OPERATIONS. Remerciements à l'Agence Nationale Recherche Technologie.

VI. References

[1] J. BLOEM. "Developments in Hole-to-Hole Assembly", SAE Transactions, Vol. 116, Section 1: JOURNAL OF AEROSPACE (2007), pp. 1087-1097.

[2] J. LECOMTE et al. "An analytical model for the prediction of load distribution in multi-bolt composite joints including hole-location errors", Composite structures, Vol 117, (2014), pp 354-361, https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.06.040.

[3] S. XU et al. "Geometric computation and optimization on tolerance dimensioning", Computer-Aided Design, Vol 46, (2014), pp129-137, https://doi.org/10.1016/j.cad.2013.08.025.

[4] F. LIU et al. "Probabilistic bolt load distribution analysis of composite single-lap multi-bolt joints considering random bolt-hole clearances and tightening torques", Composite Structures, Vol 194, (2018), pp 12-20, https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.03.100.

[5] R. ASKRI et al. " Effect of hole-location error on the strength of fastened multi-material joints", Procedia CIRP, Vol 43,(2016) , pp 292-296, https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.040.

[6] R. ASKRI et al. "Tolerance synthesis of fastened metal-composite joints based on probabilistic and worst-case approaches", Computer-Aided Design, Vol 100, (2018), pp39-51, https://doi.org/10.1016/j.cad.2018.02.008.

[7] M. A. MCCARTHY et al. "An Experimental Study of Bolt–Hole Clearance Effects in Single-lap, Multibolt Composite Joints", Journal of COMPOSITE MATERIALS, Vol. 39, No. 9,(2005), doi: 10.1177/0021998305048157

[8] J. GUILLOT. "Calcul des assemblages vissés – Assemblages de pièces de planes de faibles épaisseurs. Partie 1", Editions T.I., bm5565, https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/assemblages-et-fixations-mecaniques-42177210/calcul-des-assemblages-visses-bm5565/

Vers un serrage intelligent dans les assemblages aéronautiques

Charly FOISSAC
Université de Toulouse, Institut Clément Ader, UMR CNRS 5312, INSA/UPS/ISAE/Mines Albi
Toulouse – France
charly.foissac@insa-toulouse.fr

Alain DAIDIE
Université de Toulouse, Institut Clément Ader, UMR CNRS 5312, INSA/UPS/ISAE/Mines Albi
Toulouse – France
alain.daidie@insa-toulouse.fr

Stéphane SEGONDS
Université de Toulouse, Institut Clément Ader, UMR CNRS 5312, INSA/UPS/ISAE/Mines Albi
Toulouse – France
stephane.segonds@univ-tlse3.fr

Clément CHIROL
Airbus Operation S.A.S
Toulouse – France
clement.chirol@airbus.com

Résumé— Les perturbations exogènes, les tolérances des assemblages boulonnés et le nombre élevé de combinaisons et de configurations rendent difficile la maitrise de la précharge dans les assemblages boulonnés. La mesure directe de la précharge des assemblages n'étant pas possible en dehors d'essais de laboratoire, l'objectif du serrage intelligent serait de compenser les dispersions actuelles grâce à la détection des évènements au cours de la phase de serrage qui sont impactants sur la valeur finale de la précontrainte. En raison du grand nombre de paramètres possibles comme le revêtement ou le diamètre dans le choix d'un assemblage boulonné, cet article se concentre sur une liste précise des paramètres et les sources de dispersions majeures qu'ils induisent. Il montre tout d'abord que le couple de contact est un paramètre clé de pilotage de la précontrainte installée dans l'assemblage. Il est ensuite démontré que les dispersions sur les paramètres de l'assemblage perturbent l'évaluation du couple de serrage et qu'il convient donc de limiter ces dispersions, afin de réduire l'incertitude sur la précontrainte dans l'assemblage. Une méthode pour détecter ce couple de contact avec les données mesurables d'une visseuse est également présentée. Ainsi, le serrage intelligent pourra offrir un meilleur respect de la consigne de précharge et limiter les risques de sur ou sous-couple. De plus, il permettra aussi de mieux comprendre les phénomènes internes des assemblages boulonnés comme le transfert de charge aux interfaces des pièces serrées.

Mots-clés : Serrage, intelligent, dispersions, détection, contact.

I. INTRODUCTION

Importer une certaine force de compression entre la tête de vis et l'écrou, appelée précharge, au sein d'un assemblage boulonné permet d'assurer un niveau de performance avantageux à condition de maitriser l'intervalle dans lequel se situe la précontrainte. Les principaux avantages dans le domaine aéronautique que peut apporter une précharge contrôlée sont :

- Augmenter la durée de vie [1],
- Assurer une meilleure étanchéité [2],
- Assurer une protection contre la foudre [3],
- Ecarter le risque de dévissage spontané [4].

Cependant, il y un seuil maximum à ne pas dépasser au risque d'obtenir le résultat inverse escompté. Bien conscient de l'importance de la précharge dans les assemblages boulonnés structuraux, de nombreux industriels ont développé des méthodes internes et externes de mesure de la précharge d'une fixation. On retrouve des indicateurs de tension indirect comme des outils de mesure à ondes ultrasonores [5], des indicateurs de tension direct avec des inserts dans le fût de vis ou encore des indicateurs tiers comme des rondelles piézoélectriques sous tête de vis [6]. Cependant, la technicité et le coût de ces solutions technologiques ne permettent pas une utilisation à grande échelle.

Malheureusement, les méthodes actuelles qui résultent d'un compromis entre précision, facilité d'installation et durée d'utilisation, comme le serrage au couple, n'offrent pas une grande précision de la précharge. L'objectif du serrage intelligent est d'asservir la précharge grâce à l'analyse des paramètres de serrage (couple, angle, vitesse de serrage…). L'enjeu industriel est d'appliquer cette nouvelle technique de contrôle de serrage sans avoir à changer les moyens de serrage actuellement utilisés en production. Pour cela, la campagne expérimentale menée en amont et présentée dans cet article constitue une source fiable d'informations sur le comportement des boulons. Elle permet de recenser les paramètres qu'il est incontournable de mesurer pour assurer le pilotage adéquat de la phase de serrage.

II. LES SOURCES DE DISPERSION

Le serrage au couple conventionnel est connu pour être dispersif, de l'ordre de -/+ 30% [7] [8]. Ce constat pratique est assez éloigné de la précision qu'affichent les fournisseurs sur les performances d'outils de serrage au couple qui sont qualifiés en laboratoire et pour des conditions d'application de serrage très contrôlées. La variation de la précharge au sein de la fixation, après serrage, peut influer sur d'importantes caractéristiques d'un assemblage boulonné. De la diminution de la durée de vie à la rupture du boulon, la limite est parfois étroite. Les

dispersions listées dans le Tableau 1 représentent les sources prédominantes identifiées en production. Même si ces incertitudes sont intrinsèques à chaque type d'assemblage, ce n'est pas pour autant qu'elles sont maîtrisées ou connues. On distingue 3 types de dispersions : (i) celles liées à la fixation utilisée que l'on appellera internes, (ii) celles liées à l'environnement de serrage que l'on appellera externes et (iii) celles liées au procédé de serrage.

Dispersions		
Catégorie	***Source***	***Type***
Jeu d'assemblage	Interférence dans l'alésage	Externe
	Écart entre les pièces	Externe
Revêtement	Frottement	Interne
Géométrie	Tolérance de fabrication	Interne
	Ovalisation de l'écrou	Interne
Outillage	Vitesse de serrage	Technique
	Etalonnage défecteux	Technique

Tableau 1. LISTE DES PRINCIPALES DISPERSION DANS LE PROCESSUS DE SERRAGE

Les dispersions internes vont directement impacter le comportement du serrage. Elles interviennent dans la transformation du couple de serrage en effort de précharge. Par exemple, la tolérance sur le pas du filet de la vis peut induire des dispersions, si l'on serre à l'angle. De même, le frottement qui est lié au revêtement peut être une source de dispersion lorsque l'on serre au couple. Les dispersions externes impactent sur la réponse de la compression de l'ensemble des pièces serrées entre la tête de vis et l'écrou que nous allons appeler « interface ». Par exemple, un jeu axial entre les pièces de l'interface va modifier la raideur de l'assemblage à serrer. Les dispersions techniques liées aux outils de serrage sont considérées comme imprévisibles, même si le protocole de serrage est censé être connu et vérifié. De plus, les outils dans le contexte aéronautique sont associés à la fois à la consigne et à la mesure du serrage. Ainsi, un changement involontaire de la vitesse de serrage va impacter la consigne de serrage, de même qu'une déviation de l'étalonnage va impacter la mesure du couple ou de l'angle de serrage.

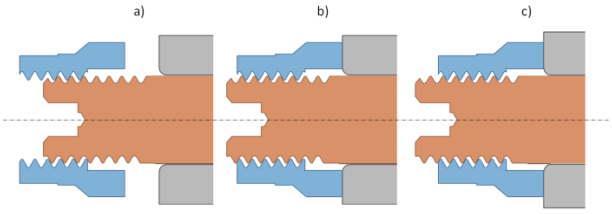


Figure 1. A) APPROCHE DE L'ECROU - B) CONTACT - C) SERRAGE

Le point important dans ces trois types de dispersions est l'instant où elles interviennent. Lors du processus de serrage (Figure 1), avec l'écrou (en bleu), la vis (en orange) et l'interface (en gris), on distingue trois phases inévitables. La phase d'approche de l'écrou, correspond à la totalité des surfaces des filets qui rentrent en contact avec ceux de la vis, avec l'apparition du couple résistant de freinage lié aux frottements dans les filets et la déformation de l'écrou. La phase de contact de l'écrou avec l'interface permet de combler tous les jeux fonctionnels avec l'apparition du couple de frottement sous écrou. Pour finir, la phase de serrage est effective lorsqu'il n'y a plus de jeu à l'interface, où le boulon et l'interface se déforment élastiquement et plastiquement. Les dispersions internes et techniques interviennent à partir du moment où l'écrou est en rotation sur la vis. Les dispersions externes apparaissent seulement lorsque l'écrou arrive en contact avec l'interface. L'enjeu scientifique de cet article concerne la question suivante : la détection du contact nous permettrait-t-elle de compenser certaines dispersions, avant même d'entamer la phase de serrage ?

III. LA DETECTION DU CONTACT

L'intérêt principal de la détection du premier contact est de pouvoir s'affranchir de certaines sources de dispersion présentes lors de la phase d'approche. Le premier objectif de cette étude est d'identifier lesquelles sont secondaires.

A. La détection en temps réel

Les courbes de la Figure 2 présentent l'évolution de l'angle et du couple de serrage en fonction de la précharge. Malgré une consigne fixée de serrage au couple ou à l'angle, l'allure de chaque début de courbes est vertical correspondant à la phase d'approche. C'est en partie à cause de cette zone d'approche incertaine que la dispersion de la précharge peut être importante. En effet, cette phase d'adaptation est différente pour chaque serrage et génère une grande partie des dispersions évoquées précédemment. Un des problèmes de cette détection est l'impossibilité d'avoir accès à la valeur de la précharge dans un contexte industriel, car elle est intimement liée à l'accostage de l'écrou sur l'interface. Pour contrecarrer cet obstacle, la stratégie est d'exploiter l'augmentation soudaine du couple de serrage par rapport à l'angle de serrage. Ces grandeurs sont accessibles sur n'importe quelle visseuse électronique, ce qui rend cette détection industrialisable.

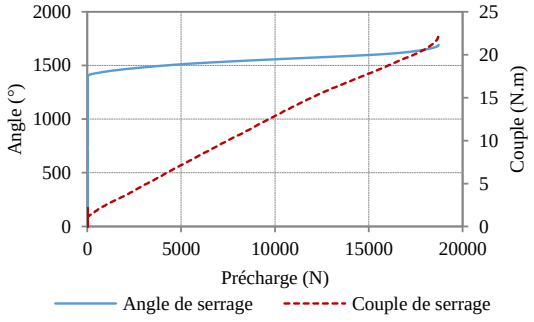


Figure 2. CONSIGNE DE SERRAGE LORS D'UN SERRAGE JUSQU'A RUPTURE

La méthode proposée consiste à calculer en temps réel la dérivée du couple selon l'angle jusqu'à atteindre un seuil limite caractérisant le « contact ». Ce seuil est établi grâce à une base de données expérimentale où la précharge est accessible. La Figure 3 présente les différentes étapes de détection. La courbe bleue correspond à la courbe source du serrage, cependant elle est bruitée à cause des moyens de mesure de l'angle et du couple

de serrage. Réaliser une dérivée numérique sur cette courbe empirerait le bruit de mesure, il est donc nécessaire d'utiliser un filtre passe bas. Le résultat de ce filtrage correspond à la courbe rouge et la dérivée numérique de la courbe source filtrée renvoie la courbe jaune. Avec le bon seuil de détection, la position du point noir sur la courbe source, démontre que la détection correspond bien au début de la phase de serrage et donc l'inflexion du couple par rapport à l'angle de serrage.

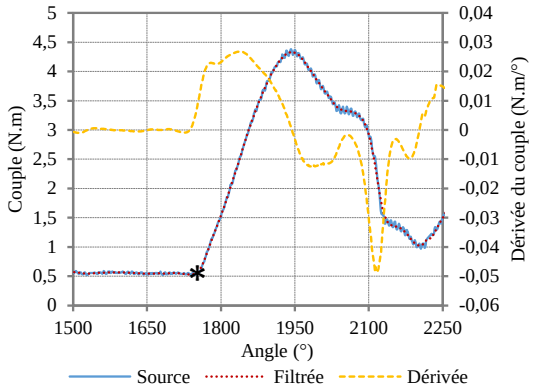


Figure 3. DETECTION DU CONTACT

Néanmoins, un zoom sur la zone d'inflexion du couple par rapport à l'angle de serrage (Figure 4) montre l'ambiguïté entre l'initiation du contact (dès que la courbe filtrée devient croissante) et la fin de la phase de contact (lorsque la courbe filtrée est quasi linéaire durant la phase de serrage). Ceci conduit à une large plage de détection d'environ 0.25 N.m. Cette potentielle variation est non négligeable par rapport à l'ordre de grandeur du couple de contact pour des petits diamètres de fixation (Figure 8).

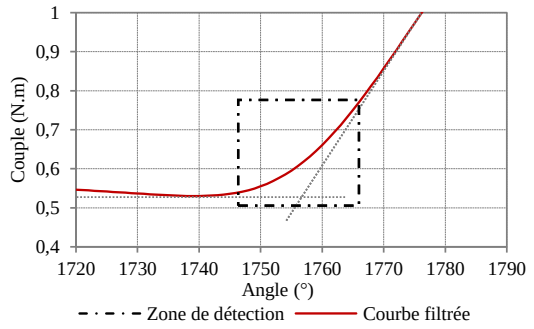


Figure 4. ZONE DE DETECTION

L'axe d'amélioration de cette détection serait d'établir des règles plus robustes et plus cohérentes avec la phase de serrage. De plus, les limites de cette méthode sont liées à la qualité de la dérivée numérique très sensible aux bruits de mesure, mais aussi à l'échantillonnage de points de mesure. Dans certaines conditions la détection du contact peut s'effectuer avant le réel contact, voire même pendant la phase d'accostage. Une confirmation numérique doit alors être mise en œuvre avant toutes conclusions hâtives car celles-ci pourraient être erronées.

B. Les dispersions détectables

Pour compléter l'étude de l'impact des dispersions internes et techniques sur l'évaluation du point de contact, les résultats de plusieurs campagnes expérimentales ont été analysés. Ces analyses permettront d'évaluer les paramètres influents sur le couple de contact.

Dispersions du Revêtement : Cette dispersion peut être importante si les revêtements changent, mais aussi, minime si le fournisseur ou le lot ne sont pas les mêmes. Pour quantifier l'impact sur le couple de contact, 20 essais pour chaque combinaison ont été réalisés avec deux vis de revêtement différents et deux écrous de revêtement différents. Les fixations étudiées sont toutes du même diamètre et proviennent du même fournisseur.

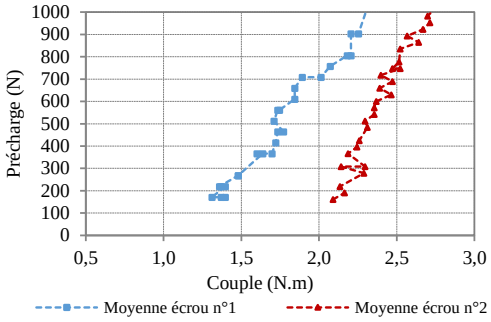


Figure 5. DISPERSION SUR LE REVETEMENT DE L'ECROU

Pour un premier lot d'essai, seul l'écrou est changé (Figure 5). Pour la deuxième campagne d'essai seule la vis est changée (Figure 6). Le contact dans cette campagne expérimentale est considéré atteint dès qu'un seuil de précharge est dépassé. Pour cette étude expérimentale ce seuil est fixé à 150N. Ce choix de valeur englobe les bruits de mesure et la résolution du capteur d'effort utilisé. Le couple de contact correspond à l'abscisse du premier point de la moyenne des courbes des essais de serrage.

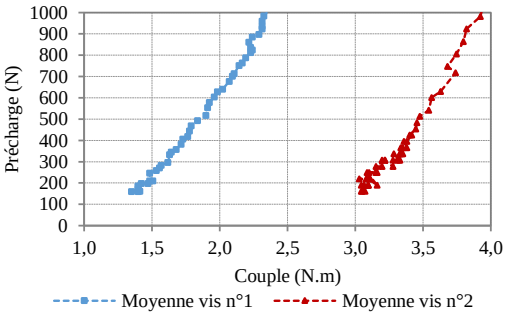


Figure 6. DISPERSION SUR LE REVETEMENT DE LA VIS

Les résultats montrent une grande influence du revêtement sur le couple de contact. Une augmentation de 44.8% (Figure 5) est constatée lorsque le revêtement de l'écrou est changé. De même, une forte augmentation de la dispersion évaluée à 110.3% (Figure 6) est relevée entre les deux types de revêtement de la vis.

Dispersion géométrique – Tolérance géométrique : Pour quantifier cette dispersion très générique, liée aux tolérances géométriques des standards de conception, 10 essais expérimentaux ont été réalisés par combinaison, avec 2 fournisseurs de fixations différents, intégrant les mêmes revêtements et le même diamètre. Les résultats (Figure 7) sont moins flagrants que les précédents, mais le constat reste identique. Une augmentation de 10,9% du couple de contact est observée. Au regard de ces résultats, il est possible d'envisager une classification des dispersions.

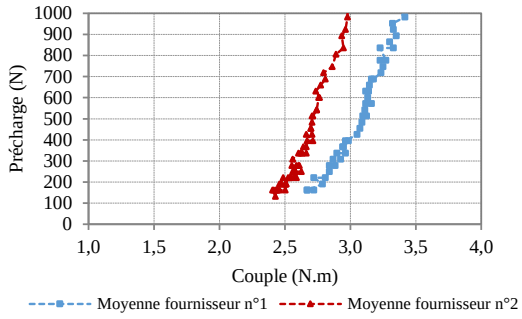


Figure 7. DISPERSION SUR LE TOLERANCEMENT GEOMETRIQUE

Dispersion géométrique – Ovalisation de l'écrou : Cette dispersion est la conséquence du procédé d'ovalisation des écrous existant sur les liaisons aéronautiques. L'objectif est de créer un couple de freinage permettant de diminuer les risques de dévissage spontané. Pour cela, l'écrou est déformé plastiquement en écrasant deux ou trois pans de sa partie hexagonale. Parfois, il est possible d'obtenir l'origine des déviations : (i) de la machine-outil, responsable de cette action entre les différents lots, (ii) entre les fournisseurs, en fonction de réglages différents, mais aussi (iii) une variation de l'impact de l'ovalisation, selon le diamètre de l'écrou.

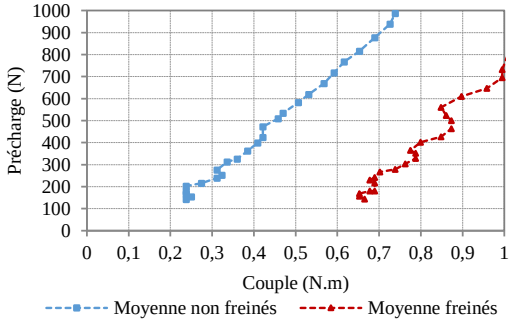


Figure 8. DISPERSION SUR L'OVALISATION DE L'ECROU

Pour observer l'impact de l'ovalisation une campagne expérimentale de 10 essais pour chaque combinaison a été réalisée. Un écrou ovalisé et un écrou non ovalisé ont été utilisés provenant d'un même fournisseur et associant des paramètres identiques (même revêtement et même diamètre nominal).

Les résultats (Figure 8) confirment l'impact de la dispersion de l'ovalisation de l'écrou sur le couple de contact avec une augmentation de 160,4% entre les écrous non ovalisés et les écrous ovalisés. En effet, l'obtention d'un couple de desserrage ne peut pas exister sans un couple résiduel de freinage de serrage.

Outillage – Vitesse de serrage : La vitesse de serrage est la seule dispersion technique que l'on peut indirectement observer. Pour déterminer son influence sur le couple de contact, une campagne expérimentale de 5 essais par combinaison a été réalisée avec 5 vitesses de serrage différentes et des vis et écrous identiques. L'enjeu lié au changement de la vitesse de serrage est l'introduction des phénomènes dynamiques dans le processus de serrage, comme l'inertie. De plus, les fortes vitesses de glissement dans les filets et sous l'écrou combinées à d'importantes pressions peuvent remettre en question les hypothèses de Coulomb et donc modifier le comportement lié au frottement, lors du serrage.

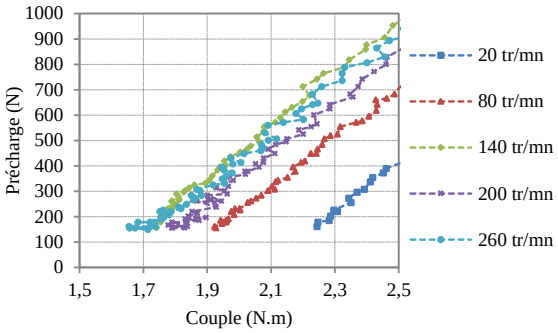


Figure 9. DISPERSION SUR LA VITESSE DE SERRAGE

Les résultats (Figure 9) confirment l'impact de la vitesse de serrage sur le couple de contact. Une augmentation de 32.4% est constatée entre une vitesse de serrage à 260 tr/mn et une vitesse de serrage à 20 tr/mn. D'autre part, plus la vitesse de serrage est augmentée plus elle va tendre vers un couple de contact limite.

À ce stade, le lien entre le couple de contact et toutes les dispersions présentées dans cette partie est irréfutable. Cependant, les travaux de Dols [9] concluent que pour détecter distinctement des phénomènes lors du serrage, dans son cas le jeu et les bavures à l'interface, il était parfois nécessaire d'avoir plusieurs paramètres d'acquisitions. Le couple de serrage seul n'est pas suffisant. Ce constat est confirmé dans ces travaux. L'accumulation de plusieurs phénomènes dans la phase d'approche de l'écrou influence la variation du couple de contact. Cependant, l'intérêt de la méthode proposée est d'être conscient de l'impact que peut avoir la dispersion, à l'échelle locale, et d'être capable de la gérer globalement. Plus précisément, la méthode de détection proposée ne peut pas quantifier précisément la dispersion de chaque source présentée dans le Tableau 1. Cependant, elle est capable de quantifier le cumul de plusieurs dispersions et donc de les compenser. Pour vérifier cette analyse, une étude de la dispersion de la précharge est réalisée entre un couple de serrage donné et un couple adaptatif prenant en compte le couple de contact.

IV. APPLICATION A UN OUTIL THEORIQUE

L'objectif dans cette partie est de montrer analytiquement les performances qu'un outil adaptatif pourrait apporter en termes de précision de la précharge dans un assemblage boulonné.

A. *Consigne théorique de serrage*

La formule la plus utilisé pour représenter le serrage au couple est la formule linéaire de Kellerman et Klein [10] voir éq (1). Cette formule ne prend pas en compte la longueur de la vis, les matériaux intervenant dans le boulon et les matériaux de l'interface. De ce fait, cette formule reste très généraliste, car comme démontré précédemment le comportement d'un d'assemblage boulonné, lors du serrage dépend de nombreux paramètres. Cependant, la phase de serrage étant relativement linéaire cela permettra d'obtenir de meilleurs résultats lors de l'ajout du couple de contact.

$$C = \left(\frac{p}{2\pi} + \frac{\mu_f . r_f}{\cos\beta} + \mu_e . r_e\right) P \quad (1)$$

p, β : Pas et angle des filets
μ_e, μ_f : Coefficient de frottement sous écrou et dans les filets
r_e, r_f : Rayon moyen sous écrou et des filets
C, P : Le couple de serrage et la précharge

Les courbes (Figure 10) serviront de socle à l'analyse faite dans cette partie. Sur 20 essais de serrage jusqu'à rupture avec des pièces identiques, seulement 3 sont représentés pour assurer une bonne lisibilité du graphique, ainsi que la consigne théorique suivant éq. (1).

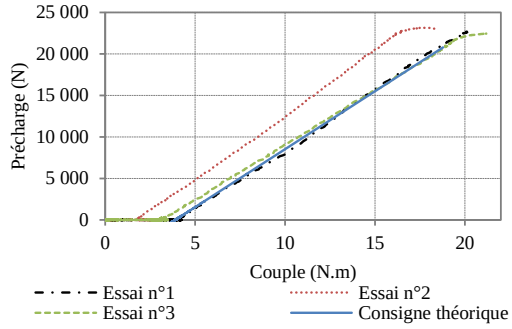


Figure 10. ESSAIS DE SERRAGE JUSQU'A RUPTURE

Même si ces 20 essais ont été réalisés avec des conditions identiques on distingue déjà une grande variation du couple de contact. La courbe analytique est issue de la formule de Kellerman et Klein avec les paramètres géométriques réels et les coefficients de frottements estimés de sorte à se rapprocher le plus possible de la raideur observée expérimentalement durant la phase de serrage. Les résultats du Tableau 2 rassemblent les valeurs de précharge à un couple donné, 10 N.m, en considérant la précharge théorique comme consigne de serrage. Deux cas sont présentés, le premier où la courbe théorique a une ordonnée à l'origine nulle, autrement dit, le moindre effort de couple sera transféré à la vis en précharge. Au vu du ratio entre la précharge expérimental et l'objectif de serrage analytique les résultats sont très mauvais, une précharge si basse peut remettre en question l'intégrité de l'assemblage boulonné. Inévitablement cela est dû à l'ovalisation de l'écrou qui apporte un couple de freinage avant même que l'effort de couple ne puisse être transformé en précharge. C'est pourquoi dans le deuxième cas un offset, C_f, a été rajouté éq. (2) égal à la moyenne des couples de contact des essais pour simuler un couple de freinage constant et connu. Les précharges expérimentales sont plus centrées par rapport à la consigne et les écarts sont inférieurs au premier cas. Ainsi, un serrage en prenant en compte un couple de contact est bien plus précis et moins dispersif par rapport à un serrage conventionnel au couple.

Données	*Précharge (N) sans couple de freinage*		*Précharge (N) avec couple de freinage*	
Essai n°1	7 927	56,70 %	7 927	79,89 %
Essai n°2	12 410	88,76 %	12 410	125,08 %
Essai n°3	9 128	65,29 %	9 128	92,00 %
Analytique	15 970	100,00%	9 922	100,00%

Tableau 2. VALEUR DE LA PRECHARGE A ISOCOUPLE

B. *Ajout de la détection dans la consigne de serrage*

Dans la quête du gain de précision, la maîtrise de la détection du contact est primordiale. A partir de l'équation éq. (2) et de la méthode de détection présenté précédemment, il est possible d'évaluer un offset de couple pour chaque processus de serrage. Ainsi, chaque serrage possèdera sa propre courbe théorique et donc sa propre consigne de serrage.

$$P = \frac{(C - C_f)}{\left(\frac{p}{2\pi} + \frac{\mu_f . r_f}{\cos\beta} + \mu_e . r_e\right)} \quad (2)$$

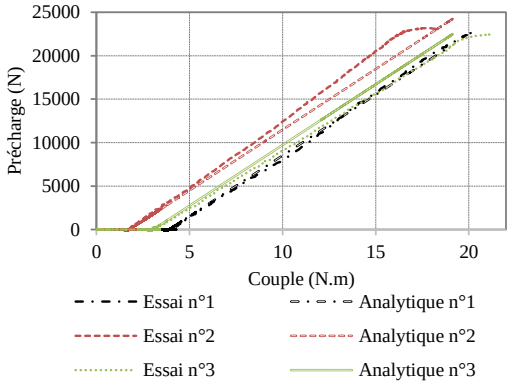


Figure 11. ESSAIS DE SERRAGE JUSQU'A RUPTURE

La Figure 11 fait apparaitre chacune des courbes théoriques pour chacun des essais. A ce stade, les coefficients directeurs des consignes sont égaux puisque les paramètres de l'équation éq. (2) sont liés à la géométrie et aux revêtements des 3 boulons identiques.

Qualitativement puis quantitativement grâce aux résultats du Tableau 3, l'augmentation de la précision en utilisant un offset adaptatif dans la formule de Kellerman et Klein est considérable.

Données	*Précharge expérimentale (N)*	*Précharge théorique (N)*	*Erreur (%)*
Essai n°1	7 927	8 534	7,66
Essai n°2	12 410	11 485	7,45
Essai n°3	9 128	9 695	6,21

Tableau 3. VALEUR DE LA PRECHARGE A ISOCOUPLE AVEC DETECTION DU COUPLE DE CONTACT

V. CONCLUSIONS

La détection du point de contact permet d'utiliser un évènement lors du processus de serrage commun à n'importe

quelle fixation. Cela permet d'appréhender au maximum la phase d'approche et de mieux contrôler la phase de serrage. Ainsi, la précision de la précharge de l'assemblage boulonné peut être grandement améliorée et donc accéder à un niveau de confiance élevé dans la valeur de serrage induite dans la liaison. Avec un contrôle en temps réel du couple et de l'angle de serrage, il est possible d'envisager une acquisition des déviances des paramètres couple-angle. L'analyse temporelle peut apporter une véritable plus-value sur le contrôle de la précharge, mais aussi dans les phases de maintenance, dans une démarche prospective. De plus, une adaptation des paramètres de la relation de Kellerman et Klein, à chaque étape du serrage, peut également être envisagée. Cette stratégie permettrait d'obtenir une raideur de serrage plus fidèle pour envisager une installation plus précise de la précharge visée.

VI. REFERENCES

[1] T. BENHADDOU. "Effect of axial preload on durability of aerospace fastened joints", International Journal of Mechanical Sciences, 2018.

[2] A. BOUZI-IKER. "Efficient assembly of bolted joints under external loads using numerical fem", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. N°142143, 2018, pp. 575-582.

[3] M. SEVOSTIANOV. "Contact of rough surfaces : A simple model for elasticity, conductivity and cross-property connections", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. N°56, 2008, pp. 1380-1400.

[4] V. RAFIK. "Dévissage d'un assemblage aéronautique sous sollicitations transverses", PhD thesis, 2019.

[5] X. SUN. "Bolt preload measurement based on the acoustoelastic effect using smart piezoelectric bolt", Smart Materials and Structures 28, 2019.

[6] Q. KONG. "Smart washer a piezoceramic-based transducer to monitor looseness of bolted connection" Smart Materials and Structures, Vol. N°26, 2017.

[7] VDI Richtlinien VDI 2230. Systematic calculation of highly stressed bolted joints. Part 1: Joints with one cylindrical bolt (2015), 1-182, ICS 21.060.10

[8] NF E25-030-2, Fasteners - Threaded connections with ISO metric thread - Part 2: Design rules for tensile loaded bolted joints - Complete procedure -, Afnor France (2014), 1-105, [Online].

[9] S. DOLS. "Développement d'une nouvelle méthode de serrage intelligente pour le contrôle des assemblages boulonnés", PhD thesis, 2016.

[10] R. KELLERMAN. "Untersuchungen über den einfluß der reibung auf vorspannung und anzugsmoment von schraubenverbindungen" Konstruction, SpringerVerlag, Vol. N°2, 1955.

Proposition d'une méthode de caractérisation des contraintes résiduelles dans les fils tréfilés de faible diamètre

Julien VAÏSSETTE, Catherine MABRU, Manuel PAREDES
Institut Clément Ader
3 Rue Caroline Aigle
Toulouse – France
vaissett@insa-toulouse.fr

Hervé ORCIERE
CGR International
2a Avenue Jean Moulin
Veynes – France
herve.orciere@cgr-international.com

Résumé— Le dimensionnement standard des ressorts s'appuie sur une hypothèse d'absence de contraintes résiduelles dans le fil. Cette hypothèse peut être assez forte pour les fils de faibles dimensions qui subissent un important tréfilage lors de leur fabrication. L'objectif principal de ce travail est de concevoir et d'éprouver une méthode de caractérisation des contraintes résiduelles dans les fils tréfilés de faible diamètre. Le principe de base consistant à enlever une partie de matière puis à mesurer les déplacements associés a été simulé par éléments-finis puis expérimenté en situation réelle. Les premiers résultats sont encourageants et semblent montrer que les contraintes résiduelles dans le fil étudié sont significatives et justifient nos investigations.

Mots-clés— contraintes résiduelles, tréfilage, ressorts, méthode de caractérisation, modélisation éléments finis

I. INTRODUCTION

La norme NF EN 13906-1 [1] sur laquelle se basent de nombreux calculs de dimensionnement des ressorts hélicoïdaux [2] pose l'hypothèse que les contraintes résiduelles d'un fil d'acier avant formage sont nulles. Plus précisément, la norme de calcul n'évoque à aucun moment la présence de contraintes résiduelles dans les fils à ressorts. Or lorsque les fils d'acier entrent dans la phase de formage, ils sortent d'un procédé de tréfilage très lourd en déformations plastiques, parfois suivi d'un traitement thermique.

Dès lors, il est évident que l'hypothèse de contraintes résiduelles nulles sur laquelle repose la majorité des calculs de dimensionnement des ressorts est très forte. Nous connaissons d'ailleurs le profil des contraintes résiduelles dans les fils d'acier en sortie de tréfilage [3-4]. Ce profil est très caractéristique et il se retrouve dans tous les fils tréfilés : la peau du fil subit des contraintes résiduelles de traction, tandis que le cœur du fil est sollicité en compression. Cette hypothèse d'une absence de contraintes résiduelles devient problématique dans le dimensionnement des ressorts au regard de l'influence sur le comportement mécanique des ressorts que peut avoir la distribution et l'intensité des contraintes résiduelles, notamment en fatigue [5].

Néanmoins, cette hypothèse de travail est difficile à corriger à cause de la difficulté que rencontrent les ressortiers lorsqu'il s'agit de caractériser les contraintes résiduelles dans les fils d'aciers qu'ils reçoivent. En effet, si les méthodes de caractérisation des contraintes résiduelles existent bien (nous connaissons l'efficacité de la méthode du perçage incrémental [6] ou la méthode de Sachs [7]), elles sont difficilement applicables sur des fils avec de faibles diamètres.

Dans l'optique de toujours affiner le dimensionnement des ressorts de faible diamètre, nous avons cherché à élaborer une méthode pour caractériser ces contraintes résiduelles.

Pour notre étude, nous avons fait le choix de confronter notre méthode à un fil de faible diamètre (0,8 mm), donc fortement tréfilé.

Par ailleurs, l'acier qui compose le fil que nous avons étudié est un acier austénitique que l'on retrouve très souvent dans les ressorts : l'acier AISI 301.

II. METHODE EXPERIMENTALE

A. Enrobage et polissage des fils d'acier

Nous nous sommes inspirés de la méthode du perçage incrémental pour concevoir notre méthode de caractérisation des contraintes résiduelles. Le principe est le même : nous enlevons de la matière au fil d'acier et nous observons le déplacement induit par cet enlèvement de matière. La différence réside dans l'impossibilité de retirer de la matière au fil sans l'enrober dans une résine. En effet, le fil est si fin qu'il est très difficile de le maintenir autrement que dans un enrobage de résine. Le corolaire de cette contrainte est que nous ne pouvons pas procéder de manière incrémentale, puisqu'une fois que nous avons dissous la résine et que nous avons mesuré le déplacement radial du fil, nous ne pouvons plus enlever de matière supplémentaire.

Ainsi, le protocole expérimental est relativement simple : il consiste à enrober des échantillons de fil (dans notre étude, le fil d'acier enrobé avait une longueur de 20 mm), à mesurer leur courbure, à polir les fils longitudinalement pour leur retirer de la matière, à dissoudre la résine et à mesurer la courbure du fil après dissolution. Il ne reste alors qu'à calculer la différence de courbure avant et après enlèvement de matière pour constater le

déplacement radial causé par le polissage du fil. En effet, lorsque nous retirons une couche de matière au fil d'acier parcouru de contraintes résiduelles, nous imposons au fil la recherche d'un nouvel équilibre interne. La couche que nous avons enlevée à l'acier étant majoritairement sollicitée en traction, le profil des contraintes résiduelles n'est plus équilibré. Le fil se courbe alors pour retrouver un état d'équilibre macroscopique.

L'enrobage des fils se fait à chaud, sur une presse Simplimet 2000 de Bhueler. Les mesures de courbures sont quant à elles réalisées sur l'InfiniteFocusSL d'Alicona, un appareil de mesure 3D optique. Les enrobages sont polis sur une polisseuse automatique. Il n'y a besoin d'aucun autre matériel pour pratiquer cette méthode de caractérisation.

B. Simulations éléments finis

En parallèle, et afin de comparer les déplacements obtenus expérimentalement, nous avons conduit des simulations numériques sur le logiciel Abaqus. Notre objectif était d'avoir une première notion des contraintes résiduelles présentes dans un fil tréfilé et d'évaluer si le procédé d'enlèvement de matière envisagé est susceptible d'engendrer des déplacements mesurables expérimentalement. Ces simulations se sont déroulées en deux étapes.

La première étape a été de reproduire un tréfilage de manière numérique. Nous avons simulé sur Abaqus une réduction de diamètre (figure 1), en nous basant sur la loi matériau étudiée dans le travail de C. LEVREAU [8]. De cette manière, nous avons pu obtenir un profil des contraintes résiduelles en sortie de tréfilage sur un acier inoxydable (figure 2).

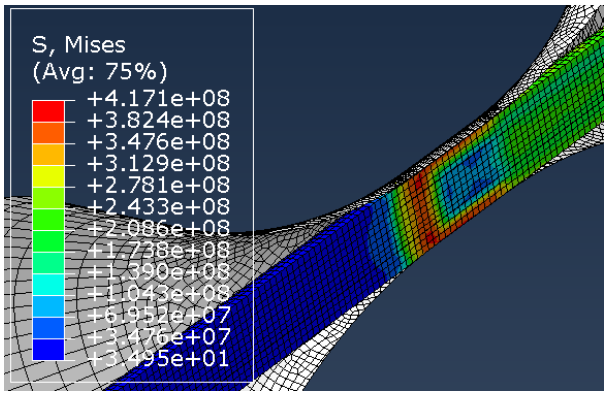


Figure 1. Contraintes de Von Mises pendant le tréfilage (Pa).

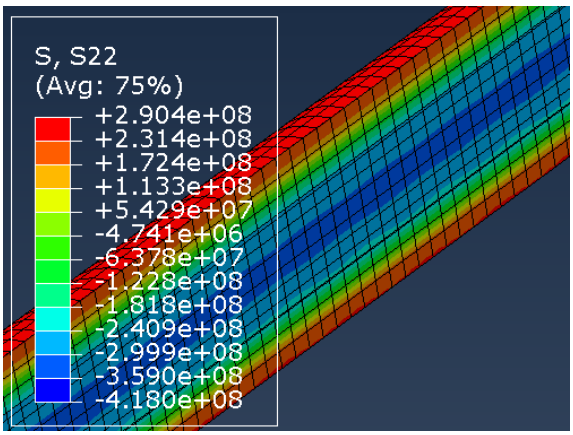


Figure 2. Contraintes résiduelles axiales après simulation du tréfilage (Pa).

La deuxième étape a été de simuler l'enlèvement de matière en désactivant certains éléments du maillage, pour libérer ensuite le fil et n'imposer que la fixation d'un bout du fil comme conditions aux limites. De cette manière, le fil se déforme et nous donne une idée du changement de courbure auquel peut correspondre un enlèvement de matière selon le profil des contraintes résiduelles. Nous avons effectué cette simulation avec 4 enlèvement de matière différents : 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm et 0,37 mm (figure 3).

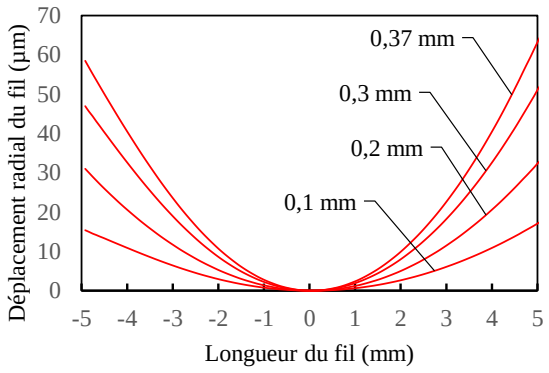


Figure 3. Simulation du changement de courbure d'un fil tréfilé après enlèvement de matière.

Nous pouvons donc observer très clairement sur ces simulations que plus nous enlevons de matière, plus le fil se déforme. De plus, pour le profil de contraintes résiduelles initiales simulées (de quelques centaines de MPa), l'ordre de grandeur des déplacements est de quelques dizaines de microns. Les déplacements auxquels nous nous attendons sont donc tout à fait mesurables expérimentalement.

C. Evaluation des biais expérimentaux

Avant de décrire les résultats que nous avons obtenus, il nous a semblé nécessaire de vérifier que notre méthode de caractérisation n'était pas biaisée par des erreurs de mesures évitables. Une étape critique pouvant influencer nos mesures semble se situer lors de l'enrobage des fils dans la résine,

puisqu'il se fait à chaud et sous pression, à 150°C et 2,9 bars. Nous avons alors mesuré la courbure de 4 fils une première fois après l'enrobage puis une deuxième fois après la dissolution de la résine. Les résultats nous ont rassurés car si les courbures que nous avons mesurées avant et après dissolution ne sont pas égales, la différence de courbure est largement négligeable en comparaison avec le déplacement radial provoqué par l'enlèvement de matière que nous obtenons dans nos simulations numériques. En effet, le déplacement radial ne dépasse pas 2 à 3 microns sur la longueur des fils étudiés contre plusieurs dizaines de microns dans notre calcul par éléments finis).

Nous avons aussi cherché à mesurer l'influence du polissage sur l'état des contraintes résiduelles dans le fil. Lorsque le fil est poli mécaniquement, des travaux antérieurs [9-10] ont montré que le profil des contraintes résiduelles était modifié, imposant des contraintes résiduelles de compression sur la surface polie. Cet ajout de contraintes résiduelles de compression sur le cœur du fil, lui-même comprimé, peut augmenter la courbure du fil après enlèvement de matière. Cette augmentation de la courbure est problématique car elle peut nous amener à surestimer l'intensité de contraintes résiduelles présentes dans les fils testés. Il est donc nécessaire d'estimer l'amplitude des contraintes résiduelles de compression que le polissage imprime au fil, et la profondeur de la couche affectée. Ici, la littérature ne nous permet pas de nous rassurer car les contraintes qu'ils ont mesurées dépassent 50 MPa (soit plus d'un dixième des contraintes obtenues dans nos simulation), et ils ne précisent pas la profondeur altérée. Nous sommes donc pour le moment dans l'incapacité d'intégrer l'influence du polissage dans notre modèle. Cette faiblesse sera donc à corriger par la suite, et nous impose d'analyser les résultats de notre travail avec réserve.

III. RESULTATS

Nous avons procédé aux enrobages et polissages sur 4 fils d'acier austénitique AISI 301 de 0,8 mm de diamètre. Les figues 4, 5, 6 et 7 illustrent les déplacements radiaux que nous avons observées pour chacun de ces 4 fils en suivant notre méthode de caractérisation. Nous avons ajouté à ces figures les déplacements que nous avons obtenus en simulation numérique. De cette manière, nous pouvons comparer les résultats théoriques et expérimentaux.

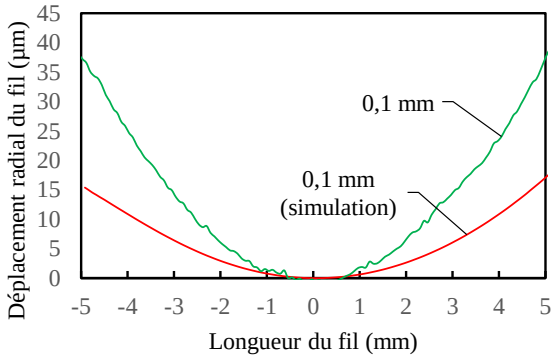


Figure 4. Comparaison de la courbure obtenue après le polissage du fil 1 (enlèvement d'une épaisseur de 0,1 mm) avec les résultats obtenus par simulation numérique.

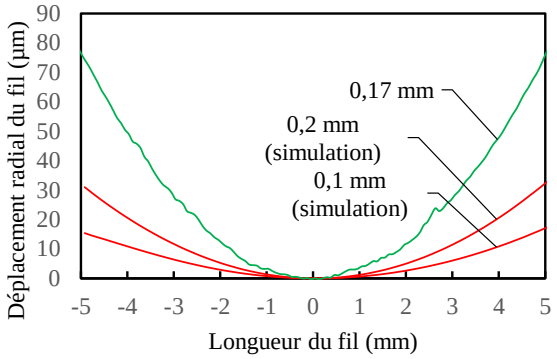


Figure 5. Comparaison de la courbure du fil obtenue après le polissage du fil 2 (enlèvement d'une épaisseur de 0,17 mm) avec les résultats obtenus par simulation numérique.

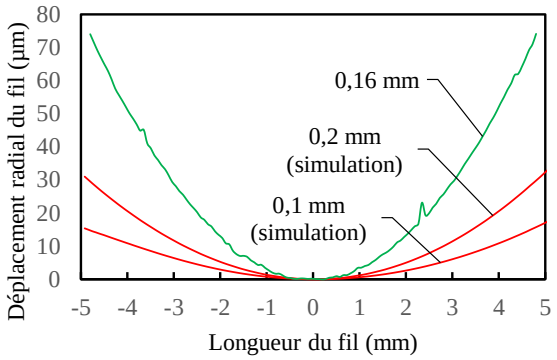


Figure 6. Comparaison de la courbure du fil obtenue après le polissage du fil 3 (enlèvement d'une épaisseur de 0,16 mm) avec les résultats obtenus par simulation numérique.

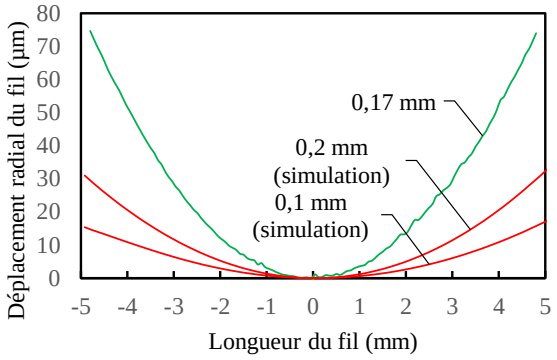


Figure 7. Comparaison de la courbure du fil obtenue après le polissage du fil 4 (enlèvement d'une épaisseur de 0,17 mm) avec les résultats obtenus par simulation numérique.

Les résultats se répètent sur les 4 fils que nous avons éprouvés : le déplacement radial observé après enlèvement de matière est non-négligeable, et invariablement supérieur à ce

que nos simulations numériques ont prévu, avec des niveaux de contraintes pourtant conséquents.

De plus, la répétabilité des mesures est remarquable car si nous superposons les déplacements radiaux pour les fils 2,3 et 4 dont l'enlèvement de matière est sensiblement égal, nous voyons que les courbes sont très proches (figure 8).

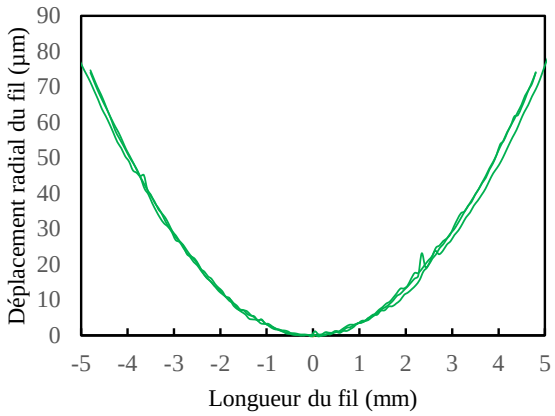


Figure 8. Superposition des déplacements radiaux obtenus après enlèvement de matière égal sur les fils 2,3 et 4.

Ici, nous pouvons vérifier que l'hypothèse selon laquelle les contraintes résiduelles du fil d'acier avant formage sont nulles est très éloignée de la réalité pour le fil étudié. En effet, les enlèvements de matières ont amené un déplacement radial des fils qui ne laisse aucun doute sur la présence de contraintes résiduelles. En revanche, notre modèle numérique sous-estime le déplacement engendré par l'enlèvement de matière. Ce qui implique que notre modèle numérique sous-estime le niveau des contraintes résiduelles.

Or sur la figure 2, nous pouvons voir que notre modèle évalue les contraintes résiduelles axiales à 291 MPa sur la couche extérieure et 418 MPa dans le cœur du fil. Ces valeurs, qu'il est difficile de considérer comme négligeables, sont donc probablement inférieures à celles qui se trouvent réellement dans le fil d'acier en sortie de tréfilage que nous avons étudié. Autrement dit, le fil tréfilé est bien parcouru de contraintes résiduelles est nous savons maintenant que leur niveau est assez conséquent.

IV. CONCLUSION

Cet article présente une méthode expérimentale originale de caractérisation des contraintes résiduelles adaptée au cas des fils de faibles dimensions (diamètre inférieur à 1 mm). Le principe consiste à enrober le fil dans de la résine puis à polir délicatement l'ensemble de manière à faire une découpe plane parallèle à l'axe du fil. Une fois la résine enlevée, les éventuelles contraintes résiduelles se libèrent et génèrent un changement de la courbure du fil d'autant plus grand que les contraintes résiduelles sont élevées.

Une simulation par éléments-finis de l'ensemble du protocole a tout d'abord montré des niveaux de déformées mesurables pour des contraintes résiduelles réalistes.

Les expérimentations menées sur un fil en acier inoxydable de diamètre 0,8 mm ont montré une très bonne répétabilité et mis en évidence une intensité très importante des contraintes résiduelles, qui justifie les investigations en cours.

Cette approche mérite donc d'être poursuivie de manière à permettre en particulier d'affiner la relation entre le profil obtenu après polissage et les contraintes résiduelles dans le fil ainsi que d'intégrer les effets du polissage sur le profil des contraintes résiduelles.

V. REFERENCES

[1] AFNOR "Ressorts hélicoïdaux cylindriques fabriqués à partir de fils ronds et de barres – Calcul et conception – Partie 1 : ressorts de compressions", NF EN 13906-1, Octobre 2013.

[2] N. RICHEUX, T. MORO. "Essais accélérés de fatigue pour la validation des objectifs de fiabilité d'un ressort de bouton-poussoir d'ouverture de portes de métro", QUALITA2013, Mars 2013, Compiègne, France.

[3] J.M. ATIENZA et al. "Residual stresses in cold drawn pearlitic rods", Scripta Materiala, Volume 52, Issue 12, June 2005, Pages 1223-1228.

[4] S.K. LEE et al. "Influence of process parameters on residual stress and reducing residual stress in drawn wire", Transactions of Materials Processing, Vol. 14, No.8, 2005.

[5] L. DEL LLANO-VIZCAYA et al. "Stress relief effect on fatigue and relaxation of compression springs", Materials and Design, Volume 28, 2007, Pages 1130-1134.

[6] G. MONTAY et al. "Analyse des contraintes résiduelles par la méthode de la rainure et du trou incrémental", AFM, Maison de la Mécanique, 2011.

[7] A. P. PARKER "A critical examination of Sachs' material-removal method for determination of residual stress", Journal of Pressure Vessel Technology, Volume 126, Mai 2004.

[8] C. LEVRAU "Compréhension et modélisation des mécanismes de lubrification lors du tréfilage des aciers inoxydables avec des savons secs", Ecole Nationale Supérieur des Mines de Paris, 2006.

[9] C.M. SÁNCHEZ CAMARGO, "Mechanical multi-scale characterization of metallic materials by nanoindentation test", Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, 2019.

[10] H. QI et al. "Experimental study on the improvement of surface integrity of tungsten steel using acoustic levitation polishing", Journal of Materials Processing Technology, Volume 259, 2018, p 361-367.

Instrumentation d'un procédé de forgeage : comparaison de différentes technologies de capteurs

Camille Durand, Ludovic Freund, Cyrille Baudouin, Régis Bigot
Arts et Métiers, Institute of Technology, Université de Lorraine, LCFC, HESAM Université
F-57070 Metz – France
camille.durand@ensam.eu

Jean-Dominique Guérin
Université Polytechnique Hauts de France, CNRS, LAMIH UMR 8201
F-59313 Valenciennes – France

Résumé— De nos jours, les simulations numériques sont de plus en plus utilisées dans l'industrie de la forge, et leur prédictibilité est validée grâce à des comparaisons avec des campagnes expérimentales. Il arrive cependant parfois que les résultats expérimentaux et numériques soient significativement différents. Dans ce contexte se sont bien souvent les modèles numériques implémentés dans les simulations qui sont tenus pour responsables des divergences avec les résultats expérimentaux. Les résultats issus de l'expérience peuvent toutefois également être discutés et remis en cause. Selon les conditions opératoires, ou le type de capteur utilisé, les résultats mesurés peuvent être différents. Sans compter que l'intégration de capteurs pour surveiller des procédés de forgeage, n'est pas aisée puisque que les capteurs peuvent être exposés à des conditions extrêmes en termes de vitesses, d'efforts appliqués, de hautes températures, de rayonnement… Dans cette étude, les valeurs de déplacement de l'outil supérieur d'une machine de forgeage et de l'effort appliqué, sont mesurées par différents capteurs et sont comparées. Les avantages des différentes technologies de capteur sont discutés dans le cas de procédé de forgeage à chaud mis en œuvre avec des machines pilotées en énergie.

Mots-clés— capteur laser, codeur incrémental, accélérometre, surveillance de procédé, procédé de forgeage

I. INTRODUCTION

Dans le domaine de la mise en forme, les industriels font actuellement face à de nouveaux défis puisqu'ils doivent produire avec un parc machine vieillissant tout en répondant aux exigences croissantes des clients, concernant la qualité des produits. Il faut donc trouver des solutions pour permettre l'instrumentation des machines de forgeage et ainsi surveiller les principaux paramètres procédés. Avec l'émergence des jumeaux numériques pour les procédés de fabrication [1], la façon de surveiller certains paramètres a été discutée. Concernant le forgeage à chaud, Hawryluk et al. [2] passent en revue les techniques de mesure de température et de dimensions des pièces ainsi que de l'usure matrice. L'utilisation des émissions acoustiques permet la détection des défauts dans les outillages et les pièces [3], et la position des capteurs d'onde acoustique peut être optimisée afin de surveiller le procédé de forgeage [4]. Concernant la surveillance machine, il a été montré qu'avec l'aide d'une caméra rapide, la vitesse d'impact du coulisseau peut être déterminée pour des marteaux pilons [5] ou des pilons contre-frappe [6]. Et grâce à cette méthode, l'énergie cinétique peut être déduite à partir de la vitesse d'impact mesurée. Par ailleurs, les systèmes de stéréovision [7] permettent aussi la mesure de la déformation de certains éléments de presse lors du forgeage : pour une presse mécanique [8] ou une presse à vis [9]. Mesurer la force développée par la machine pendant le forgeage peut aussi être une façon de surveiller les performances des presses et être un indicateur de rupture d'outils. Hsia et al. [10] et Kim et al. [11] ont ainsi disposé plusieurs capteurs piézoélectriques au sein d'un outillage. Sur une presse mécanique, une surveillance prédictive et un système de diagnostic ont été développés pour contrôler un procédé d'extrusion à froid. Pour cela, la presse a été instrumentée avec des capteurs piézoélectriques mesurant l'effort à différents endroits et des accéléromètres mesurant les accélérations spatiales, les vibrations et les torsions. Ces signaux sont utilisés pour détecter des déviations par rapport au procédé optimal [12]. Les presses mécaniques et hydrauliques sont plus faciles à instrumenter que des presses à vis ou des marteaux pilons ayant de hautes vitesse d'impact, rendant les conditions plus sévères. En outre, aucune comparaison de signaux provenant de différents types de capteurs n'a été trouvée dans la littérature afin de donner des directives pour obtenir l'instrumentation machine la plus fiable et la plus juste possible en fonction de l'environnement de travail (laboratoire ou industrie) et des objectifs visés. Pourtant, selon le type de capteur utilisé et de sa position, les informations enregistrées peuvent être très différentes et cela doit être pris en compte si un procédé doit être surveillé avec précision.

C'est pourquoi, dans ce papier, une étude sur la réponse des différents capteurs de déplacement et de force est réalisée, pour le cas du refoulement d'un cylindre de cuivre sur une presse à vis. Les différentes technologies de capteurs utilisées sont présentées et les résultats obtenus sont comparés et discutés. Une méthode pour déduire la vitesse du coulisseau à partir des capteurs de déplacements et grâce à un filtre Kalman est proposée. Enfin, une analyse critique des performances des différents capteurs permet de proposer des méthodes optimales pour utiliser les capteurs pour surveiller un procédé de mise en forme avec une machine pilotée en énergie, que ce soit en industrie ou en laboratoire. Des mesures rigoureuses de

déplacement, vitesse, accélération et effort du coulisseau permettent jusqu'à la détermination d'un modèle dynamique d'un moyen de production, ou un suivi de production en connaissant les efforts et la déformation subis par la pièce, ainsi que la sollicitation outillage.

II. PROCEDE DE FORGEAGE ET CAPTEURS

Cette étude est conduite sur la presse à vis Lasco SPR 400 de la plateforme Vulcain à Metz en France. Cette presse appartient à la catégorie des presses pilotées en énergie et a donc un comportement dynamique. Cela requiert alors l'utilisation de capteurs adaptés aux conditions dynamiques. Le but de cette étude est d'être capable d'enregistrer avec justesse le déplacement et la vitesse du coulisseau, ainsi que la force appliqué par le coulisseau sur la pièce. Cette étude ne prétend pas être exhaustive, en effet d'autres types de capteurs auraient pu être utilisés.

Avec les machines pilotées en énergie, 2 différents types de chocs peuvent avoir lieu : les « chocs mous » ou inélastiques pour lesquels l'énergie développée par la machine est absorbée de façon significative par la déformation plastique de la pièce, et les « chocs durs » ou élastiques, où l'énergie développée par la presse est absorbée de façon significative en déformation élastique du bâti de la machine.

Dans cette étude, les « chocs mous » ont été analysés grâce au refoulement de lopin de cuivre alors que les « chocs durs » ont été obtenus grâce à des frappes à vides, sans lopins. Les conditions expérimentales sont résumées dans le tableau 1.

choc mou		**choc dur**	
refoulement de cuivre		frappes à vide (sans lopin)	
Diamètre	50 mm		
Hauteur	30 mm		
Température	19 °C		
Energie(%)	25 %	**Energie (%)**	28 %
Energie(kJ)	7,25 kJ	**Energie (kJ)**	8,12 kJ
Vitesse d'impact	340 mm/s	**Vitesse d'impact**	360 mm/s

Tableau 1. CONDITIONS EXPERIMENTALES POUR LES CHOCS MOUS ET DURS

A. *Capteurs de déplacement*

Pour enregistrer le déplacement du coulisseau, les capteurs suivants ont été utilisés : une caméra rapide, un codeur magnétique incrémental, 3 capteurs laser, et un accéléromètre. La caméra rapide n'est pas en liaison avec la presse puisqu'elle est placée à 1 mètre de celle-ci et vise les mires collées sur l'outillage, le codeur magnétique est intégré à la presse, et les lasers ainsi que les accéléromètres sont fixés aux outillages. La position de tous les différents capteurs utilisés est synthétisée figure 1.

1) *Caméra rapide*

De nos jours les caméras rapides sont capables de filmer des scènes avec une très grande résolution (allant de 60×10 pixels jusqu'à 2 000×2 000 pixels) à de grandes fréquences d'acquisition (de 24 images/s à 650 000 images/s) avec suffisamment de mémoire interne pour enregistrer toutes les données. Cependant, il faut rappeler qu'il est impossible d'enregistrer d'un film à la plus haute résolution avec la plus grande fréquence d'acquisition. Il y a une relation entre le choix de la résolution et le choix de la fréquence d'acquisition : plus la fréquence d'acquisition est grande, plus basse sera la résolution, et inversement. Afin de mesurer le déplacement du coulisseau d'une machine de forgeage lors d'un coup, le critère le plus important est de définir la fréquence d'acquisition, car elle doit être suffisamment grande par rapport à la vitesse maximale du coulisseau. Pour les machines pilotées en énergie, la vitesse du coulisseau varie de 0,5 m/s à 9 m/s.

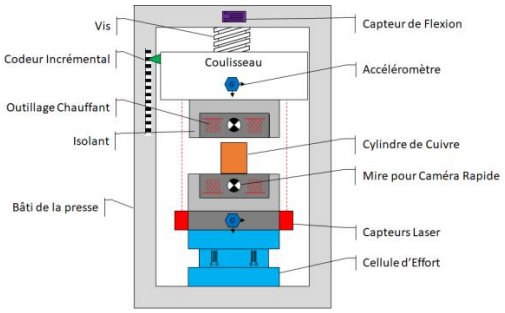


Figure 1. SCHEMA DE POSITION DES DIFFERENTS CAPTEURS

Dans notre cas, la presse à vis à une vitesse maximale de 0,7 m/s, et notre caméra rapide Photron Fastcam SA3 a une fréquence d'acquisition maximum de 120 000 images/s. La caméra est placée devant la presse, donc dans un référentiel absolu, avec un projecteur de lumière continue éclairant les mires disposées sur les outillages, afin de suivre leurs déplacements lors des frappes. Les images enregistrées sont ensuite calibrées : la relation entre la taille d'un pixel et la distance en mm est définie. En comptant le nombre de pixels entre 2 mires, la distance peut être déduite.

2) *Codeur magnétique incrémental*

Les systèmes de mesure magnétique fonctionnent de façon à ce que le capteur se déplace sans contact sur une bande magnétique aimantée à intervalles réguliers avec des pôles magnétiques. En balayant les pôles magnétiques, un signal analogique est généré, puis est converti en un signal numérique traité par l'électronique. Le capteur détecte l'intervalle de la bande et convertit les informations en un trajet haute résolution, et permet ainsi d'enregistrer la position du coulisseau par rapport au Point Mort Bas (PMB) du système, pour chaque incrément. Les capteurs magnétiques ont l'avantage d'être insensibles à la saleté, aux huiles et à l'humidité et sont relativement stables face aux chocs et aux vibrations. Ils peuvent également travailler à des températures allant de 0°C à 60°C et enregistrer des déplacements avec une vitesse maximale de 20 m/s.

Un codeur magnétique (MW991424 de IPF Electronic) est intégré à notre presse à vis, la bande magnétique est située sur un des montants de la presse. Le codeur magnétique peut enregistrer une vitesse de coulisseau jusqu'à 5 m/s avec une résolution de 10 µm.

3) *Capteurs laser*

Les spots laser sont projetés sur une surface et la lumière réfléchie tombe incidente sur l'élément récepteur des capteurs, selon un certain angle, en fonction de la distance. A partir de la

position du spot lumineux sur l'élément récepteur et de la distance entre l'émetteur et le récepteur, la distance à l'objet de mesure est calculée par le capteur. Les capteurs lasers peuvent mesurer des distances comprises entre 2 et 750 mm, avec une fréquence de mesure pouvant atteindre jusqu'à 50 kHz et une résolution pouvant aller jusqu'à 0,03 µm. Cependant, avec un capteur laser, il n'est pas possible de mesurer la distance la plus grande avec la plus grande fréquence de mesure et la plus haute résolution. Il existe une relation entre le choix de la plage de mesure, la résolution et la fréquence d'acquisition : plus la plage de mesure est grande, plus la résolution et la vitesse de mesure seront faibles, et inversement.

Dans cette étude, 3 capteurs laser sont disposés autour de l'outillage inférieur et les spots laser sont projetés sur la surface de l'outillage supérieur. Les capteurs laser utilisés sont des micro-epsilon ILD 1401-200 avec une plage de mesure pouvant aller jusqu'à 200 mm, une fréquence de mesure de 1 kHz et une résolution de 40 µm. La distance de mesure de 200 mm limite la hauteur de frappe mesurable pour la mise en forme, mais dans notre cas, cette limite est suffisamment haute car la course maximale de refoulement est d'environ 150 mm à une vitesse maximale de 0,7m/s.

4) Accéléromètres

L'accéléromètre est constitué d'éléments de détection à capacité variable MEMS sur chaque axe, qui se compose d'une très petite masse d'inertie et d'un élément de flexion en porte-à-faux positionné entre 2 plaques. Au fur et à mesure que la masse dévie sous l'accélération, la capacité entre ces plaques change. Le conditionneur de signal interne de l'accéléromètre fournit alors un signal de sortie analogique, proportionnel à l'accélération appliquée. Ce signal de sortie est mis à l'échelle en tant que tension proportionnelle à l'accélération appliquée. L'accéléromètre peut fonctionner à des températures allant de -55°C à 125°C avec une réponse en fréquence de 2 kHz.

Sur notre presse à vis, 2 accéléromètres triaxiaux (Kistler 8396A050) sont mis en place : l'un sur l'outil supérieur et l'autre sur l'outil inférieur pour mesurer l'accélération selon les 3 axes. Ces accéléromètres ont une plage d'accélération de +/- 50g, et une fréquence de résonnance de 6,5 kHz.

B. Déduction de la vitesse du coulisseau à partir de la mesure de déplacement

La vitesse du coulisseau peut être calculée en dérivant le déplacement du coulisseau. Une autre méthode pour déduire la vitesse du coulisseau, est d'appliquer un filtre de Kalman sur le signal enregistré par l'accéléromètre. Comme les accéléromètres mesurent l'accélération d'un objet en mouvement, mathématiquement, il est possible de déterminer la position de l'objet en intégrant 2 fois le signal de l'accélération et en connaissant les conditions initiales de positions et de vitesses de l'objet. Malheureusement, l'erreur d'estimation des conditions initiales, les erreurs de mesures de l'accélération et les bruits du signal rendent cette approche inappropriée à cause des biais d'intégration [13]. Néanmoins, si l'accéléromètre est couplé avec une mesure de déplacement (même de mauvaise qualité), il devient possible d'estimer le déplacement et la vitesse de l'objet avec une bonne précision grâce à un filtre de Kalman [14 -16]. L'emploi d'une telle méthode utilisant le filtre de Kalman a déjà été vue dans la littérature pour ce qui concerne le secteur de l'aéronautique, mais est totalement nouveau dans le domaine du forgeage.

Ici, le filtre de Kalman a été appliqué, d'abord pour filtrer le signal de déplacement obtenu avec les capteurs laser, mais aussi et surtout pour estimer la vitesse du coulisseau. Le problème peut être discrétisé avec les matrices suivantes [17] :

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A_d}\mathbf{x} + \mathbf{B_d}\gamma_m + \mathbf{w_k} \quad (1)$$

$$z_m = [1\ 0]\mathbf{x} + \eta_d \quad (2)$$

avec

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{A_d} = \begin{bmatrix} 1 & T_a \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{B_d} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}T_a^2 \\ T_a \end{bmatrix} \quad (5)$$

Et z_m, γ_m la position et l'accélération mesurées, z et $\dot{z}$ la position et la vitesse estimées, T_a l'intervalle de mesure, w_k la matrice de covariance et $\dot{\eta}_d$ le bruit de mesure associé au déplacement.

C. Capteurs de force

Concernant les capteurs d'effort, les transducteurs piézoélectriques sont souvent utilisés pour enregistrer la force sous conditions dynamiques. Mais ici une autre technologie de capteur a été choisi, utilisant un extensomètre de contact, aussi adaptée pour les mesure de forces en dynamique et dans nos ordres de grandeur de fréquence.

Un capteur de flexion est intégré à la presse : la force est mesurée et enregistrée par des jauges de déformation localisées sur la traverse de la presse. Une connexion solide est formée entre le transducteur de déformation et la traverse de la presse avec 4 vis. Les chargements mécaniques causent un changement dans la longueur de la traverse qui est transféré au transducteur de déformation. Le changement de longueur change la résistance électrique de la jauge de déformation proportionnellement à la déformation. C'est converti en un signal extérieur output par l'amplificateur DC intégrateur. Ici l'extensomètre est un HBM SLB-700A/06VA1 avec une tension de sortie de 0 à 10V, une étendue de mesure jusqu'à 500 µm/m et une température opératoire de -20°C à 60°C.

La même technologie de capteur est utilisée pour un capteur de force externe intégré à l'outillage et localisé sous la matrice inférieure. Donc à cette position, le capteur de force est plus proche du lieu de frappe. Ici l'extensomètre est fabriqué par Doerler, il a une tension de sortie de 0 à 10V, une jauge de résistance de 350 Ω et peut mesurer jusqu'à 6 300kN. Le capteur a une rigidité de 3,4 e^{10} N/m qui est plus grande que celle de la presse (approximativement 2,6 e^{9} N/m) et ainsi ne devrait pas avoir d'impact sur la presse.

Pour compléter ce dispositif expérimental, la force est aussi déduite de la déformation d'un cylindre de cuivre calibré. Dans la littérature, la méthode du refoulement de cuivre est utilisée

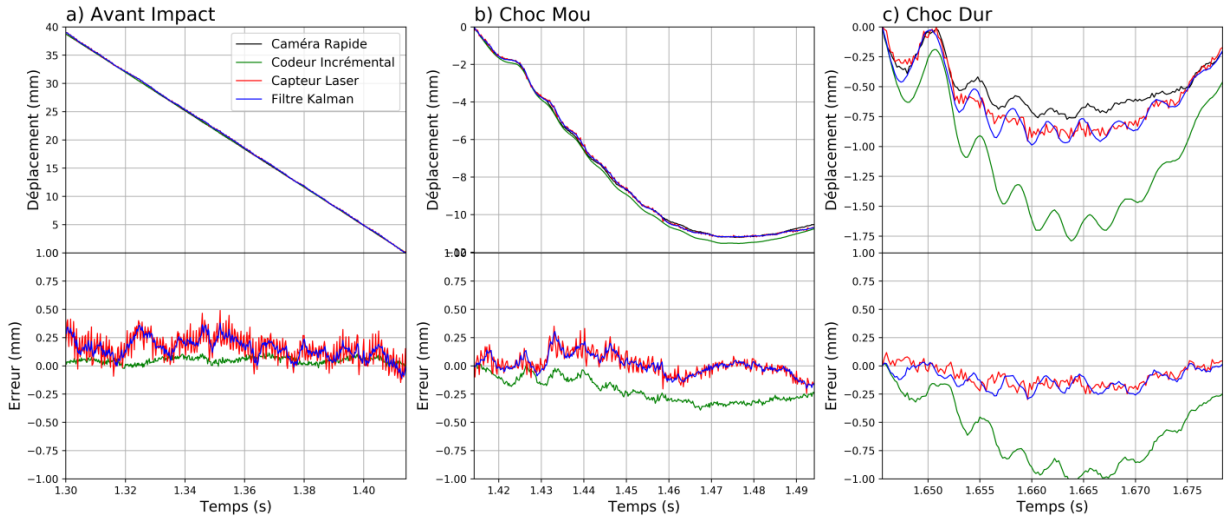


Figure 2. COMPARAISON DES DEPLACEMENTS ENREGISTRES PAR LES DIFFERENTS CAPTEURS

pour déterminer l'énergie des équipements de forgeage [18-19], [6] connaissant la rhéologie du matériau. Ici la même méthode est appliquée et poussée plus loin pour déterminer la force de forgeage. Le cuivre est utilisé car c'est un matériau avec une faible sensibilité à la vitesse de déformation [20] et les cylindres sont conçus pour limiter la chauffe thermique dans le but de limiter l'influence de la température sur la contrainte d'écoulement. Ensuite, si la déformation est considérée comme uniforme pendant la compression des lopins de cuivre, l'expression de l'effort de forgeage peut être déterminé par une intégration de l'équation d'équilibre et la méthode des tranches. Si le frottement entre la matrice et le lopin est exprimé selon la loi de Coulomb, l'expression de la force de forgeage peut être réduite à [21-22] :

$$F_i = \frac{\pi D_i h_i \sigma_i}{2\,\mu}\left(\frac{\exp\left(\mu\frac{D}{h_i}\right)}{\mu\frac{D}{h_i}} - 1\right) \quad (6)$$

Ou D_i et h_i sont le diamètre et la hauteur du lopin, σ_i la contrainte d'écoulement, et μ le coefficient de frottement. La contrainte d'écoulement du matériau peut être exprimée par la loi de Hansel-Spittel avec $\{A, m_1, m_2, m_3, m_4\}$ les paramètres dépendants du matériau :

$$\sigma_i = A\exp(m_1 T)\,\varepsilon^{m_2}\dot{\varepsilon}^{m_3}\exp\left(\frac{m_4}{\varepsilon}\right) \quad (7)$$

Ou la déformation peut être définie par :

$$\varepsilon_i = ln\left(\frac{h_0}{h_i}\right) \quad (8)$$

Et la vitesse de déformation est estimée grâce à la méthode d'Euler (si le temps d'échantillonnage T_a est assez faible)

$$\dot{\varepsilon}_i = (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})/T_a \quad (9)$$

Si l'effet tonneau est négligé, le diamètre du spécimen peut être exprimé comme une fonction de la hauteur grâce au principe de conservation du volume.

$$D_i = D_0\sqrt{\frac{h_0}{h_i}} \quad (10)$$

Ainsi, en mesurant la hauteur du cylindre de cuivre pendant la déformation, il est possible d'estimer l'effort de forgeage. Les paramètres de la loi d'Hansel-Spittel utilisé correspondent à un cuivre pur à 99,7% et sont résumés dans le tableau 2.

A	411,19 MPa
m_1	-0,00121
m_2	0,21554
m_3	0,01472
m_4	-0,00935

Tableau 2. PARAMETRES DE LA LOI HANSEL-SPITTEL POUR 99,7% CU

III. RESULTATS

A. *Déplacements du coulisseau*

Les déplacements issus des différents capteurs sont comparés sur la Figure 2. Le déplacement mesuré par caméra rapide est pris comme référence, car contrairement aux autres capteurs, la caméra est indépendante de la presse. En effet, le codeur magnétique et les lasers mesurent le déplacement du coulisseau respectivement par rapport au bâti de la presse et par rapport à l'outillage inférieur fixé sur la table de la presse. Seule la caméra rapide n'est pas liée à la presse, puisqu'elle est liée au sol, et est donc dans un référentiel absolu. Tout d'abord, tous les déplacements sont comparés avant l'impact et ils sont clairement tous superposés. Donc, durant la phase d'accélération du coulisseau, tous les capteurs donnent la

même information, ce qui signifie que la caméra rapide était correctement calibrée.

Les différences entre les signaux apparaissent pendant le choc. Pendant un choc « mou » sur un cylindre de cuivre, le déplacement du codeur incrémental est légèrement au-dessus du déplacement enregistré par les autres capteurs. On relève un écart maximal de 0,25 mm par rapport au déplacement caméra rapide. Les écarts les plus grands sont observés pour les chocs durs : tous les signaux varient à cause de la vibration de la presse, mais les déplacements issus de la caméra, des capteurs laser et du filtre Kalman sont proches. Seul le déplacement enregistré par le codeur incrémental est foncièrement différent des autres : un écart d'1 mm est observé par rapport au déplacement caméra. C'est une différence non-négligeable.

B. Vitesse du coulisseau

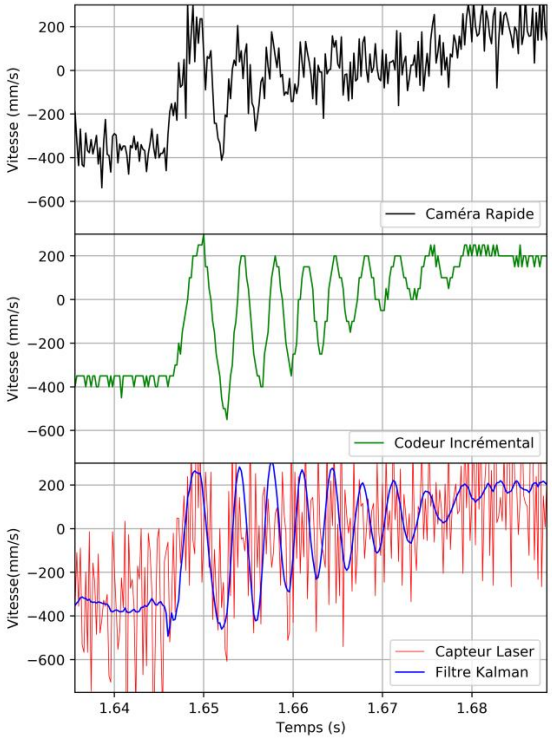


Figure 3. COMPARAISON DES VITESSES DE COULISSEAU DEDUITES DES DIFFERENTS CAPTEURS

Figure 3, les vitesses du coulisseau sont tracées séparément, afin de distinguer clairement la forme de chaque signal. Les vitesses déduites de la caméra rapide et du codeur incrémental sont toutes 2 bruitées et suivent la même tendance, cependant les vitesses du codeur ont une grande amplitude de variation. Concernant les capteurs laser, la vitesse de coulisseau qui en est obtenue est sérieusement bruitée, c'est pourquoi le filtre Kalman a été utilisé et fournit un signal bien plus propre.

Si l'on compare les vitesses issues du codeur et du filtre Kalman sur la figure 4, il apparait que les 2 signaux sont très proches avec des variations de vitesse de même amplitude.

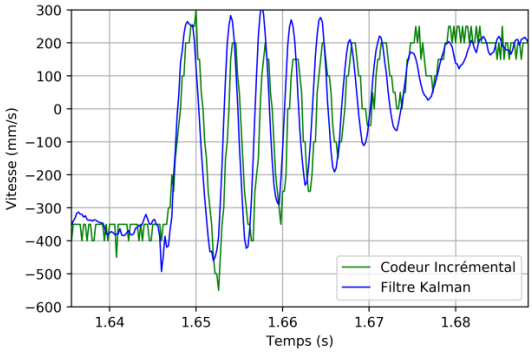


Figure 4. COMPARAISON DES VITESSES DE COULISSEAU OBTENUES GRACE AU CODEUR INCREMENTAL ET AU FILTRE KALMAN

C. Effort de forgeage

La Figure 5 présente les forces mesurées par les différents capteurs pendant le choc sur les lopins de cuivre. Pendant le choc, de grandes variations de force sont visibles sur l'acquisition du capteur de flexion intégré à la presse, alors que l'acquisition de la cellule d'effort intégrée à l'outillage inférieur est plus lisse. L'effort déduit de la déformation du cuivre semble être assez proche de la force enregistrée par la cellule d'effort, à l'exception du début et de la fin du choc, quand la force déduite du comportement du cuivre ne décroit pas comme celle de la cellule d'effort. Mais ceci est normal, car la force déduite de la loi matériau du cuivre ne tient pas compte de l'effet de retour élastique.

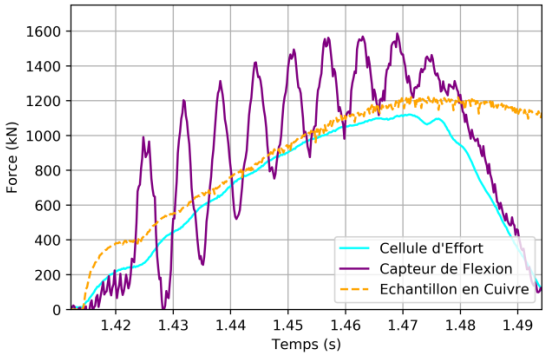


Figure 5. COMPARAISON DES EFFORTS DE FORGEAGE MESURES PAR LES DIFFERENTS CAPTEURS LORS DU REFOULEMENT DE CUIVRE

IV. DISCUSSION

A. Déplacements du coulisseau

Pour mesurer les déplacements du coulisseau, la caméra rapide présente l'avantage d'être dans un référentiel absolu, mais cela a pour conséquences que la caméra est difficile à mettre en place, et que le système n'est pas automatisable. De plus, le temps d'acquisition est limité par la capacité mémoire de la caméra et le temps de traitement des données est long. Par ailleurs, les résultats provenant de la caméra rapide peuvent être entachés d'erreur à cause de la résolution minimale limitée de +/- 1 pixel, ou d'un mauvais étalonnage distance-pixel, ou de parallaxes. Malgré tout, des stratégies ont été développées

pour obtenir des précisions inférieures au pixel dans les taches de reconnaissance d'image [23]. Donc, la solution d'utiliser une caméra rapide pour mesurer le déplacement du coulisseau est une bonne option dans le cadre d'un laboratoire, afin d'avoir une redondance d'information ou avec l'objectif de définir de façon précise un modèle mécanique. Ce système peut aussi être utilisé dans l'industrie, mais plutôt dans le cadre d'occasions exceptionnelles et non pas dans des conditions normales de production.

Le codeur incrémental, intégré à la presse, permet l'enregistrement automatisé des déplacements du coulisseau, mais prend en compte les vibrations du bâti de la presse. Pour les chocs mous, les phénomènes vibratoires ne sont pas activés et donc la justesse du codeur incrémental est acceptable comparée aux autres méthodes utilisées. En revanche, pendant un choc dur, le codeur surestime le déplacement de 1 mm par rapport aux autres capteurs, et cela peut être attribué à l'élongation de la presse pendant le choc. Ainsi, le codeur constitue une solution intégrée, automatisable et adaptée pour les laboratoires comme pour l'industrie, mais qui requiert un filtre pour supprimer les vibrations parasites du bâti de la presse.

Les capteurs laser, fixés aux matrices, ont un référentiel lié à la machine, mais ils ne sont pas parasités par les vibrations de la presse. Ils conviennent bien pour les procédés de forgeage à température ambiante, puisqu'ils peuvent être placés directement sur les matrices, sans avoir besoin d'être protégé par un isolant thermique, comme pour le forgeage à chaud. Les mesures de capteurs laser peuvent être entachées d'erreur si le faisceau laser n'est pas perpendiculaire à la surface mesurée. Les lasers montrent aussi des limites en dynamique, avec leur fréquence d'acquisition et leur résolution souvent bien plus faible qu'en statique. Ainsi, pour le choc dur, les capteurs laser ne sont pas capables de mesurer le comportement dynamique de la presse. Plus important encore, les lasers sont très sensibles à la saleté et le signal peut être perturbé si un objet traverse le faisceau (oxyde, flamme, huile etc…). C'est pourquoi plusieurs capteurs laser sont utilisés simultanément : si un signal est perturbé, les autres peuvent encore fournir les informations nécessaires. Une autre solution pourrait être d'éloigner un peu plus les lasers du lieu de frappe, mais ils perdraient alors leur intérêt, et resteraient plus sensibles que des codeurs incrémentaux. Donc pour toutes ces raisons, les capteurs lasers ne sont pas vraiment adaptés aux conditions de production industrielles, mais peuvent être utilisés en laboratoire.

Enfin, un accéléromètre seul, ne permet pas la mesure du déplacement du coulisseau car les doubles intégrations numériques du signal sont très sensibles au bruit et aux erreurs d'étalonnage. Cependant, l'utilisation de l'accéléromètre en plus d'une autre mesure de déplacement peut être utile pour identifier l'instant de contact entre la matrice supérieure et le lopin (Figure 6). Ceci est particulièrement utile pour le cas de frappes successives, car cela permet de savoir pour chaque frappe, la hauteur initiale du lopin. De plus, un signal de déplacement peut être combiné au signal d'un accéléromètre grâce à un filtre Kalman, ce qui améliore la justesse du déplacement, particulièrement en dynamique. Mais l'utilisation d'un accéléromètre peut aussi présenter des limites : des erreurs peuvent être commises si l'axe de l'accéléromètre n'est pas aligné avec l'axe de la frappe, et les accéléromètres de type piézoélectriques ne peuvent pas mesurer d'accélérations constantes et ne peuvent donc pas être utilisés pour des chocs mous. Ainsi, les accéléromètres peuvent être utilisés en laboratoire comme en industrie, mais ils ne suffisent pas, à eux seuls, à surveiller un procédé et la technologie du capteur doit être choisie avec attention, afin de correspondre aux objectifs visés.

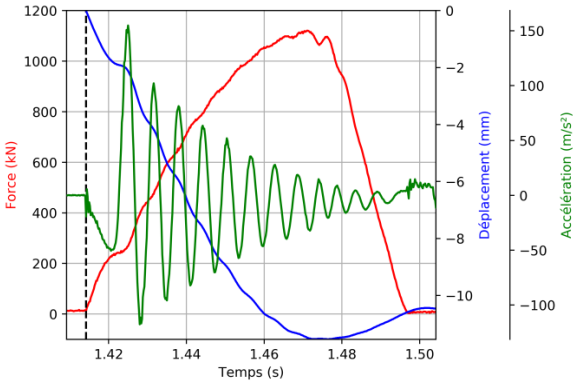


Figure 6. ACQUISITION SYNCHRONISEE DU DEPLACEMENT MESURE PAR LE CODEUR INCREMENTAL, DE L'ACCELERATION MESURE PAR L'ACCELEROMETRE ET DE L'EFFORT DE FORGEAGE MESURE PAR LA CELLULE D'EFFORT

B. Vitesse du coulisseau

La vitesse du coulisseau est déterminée en dérivant le déplacement mesuré par la caméra rapide, le codeur incrémental et les capteurs laser. La vitesse obtenue par caméra est modérément bruitée, alors que celle émanant du codeur est plus propre. Dériver le déplacement mesuré par les lasers donne un signal extrêmement bruité et impossible à analyser. Et intégrer l'accélération mesurée par les accéléromètres génère des biais d'intégration et requiert de connaitre précisément la vitesse initiale. Alors, une nouvelle méthode est appliquée, combinant à la fois les signaux des capteurs laser et des accéléromètres au travers d'un filtre Kalman. Cela résulte en un signal de vitesse propre et lisse, proche des vitesses issues de la caméra et du codeur, mais avec encore moins de bruit. Cette méthode, utilisant un filtre Kalman, fournit des résultats fiables pour 2 raisons : d'abord le déplacement issu des lasers est filtré et la dynamique est ajoutée grâce aux accéléromètres, et enfin les biais d'intégration sur le signal de l'accéléromètre sont réduits grâce à l'addition du signal de déplacement des lasers.

C. Effort de forgeage

Le capteur de force intégré à la presse est automatisable mais parasité par les vibrations du bâti de la presse, contrairement à la cellule d'effort intégrée à l'outillage qui est proche du lieu de frappe. En contrepartie, le capteur de l'outillage inférieur doit être déformable pour mesurer une déformation par extensomètre, ce qui ajoute une compliance à l'ensemble du système et donc une source de dissipation d'énergie. Par ailleurs, le comportement thermique du procédé

doit être sous contrôle, car les capteurs ne résistent pas à de hautes températures.

La force a aussi été déduite à partir de la déformation du cuivre. Bien sûr, cette méthode ne peut être appliquée que dans des conditions spécifiques : l'échauffement adiabatique doit être maitrisé, les conditions de frottement doivent être connues, la loi rhéologique du matériau doit être correctement identifiée et le déplacement mesuré doit être juste. Mais cette méthode est réellement intéressante car elle permet de connaitre la force sans avoir besoin d'ajouter d'un capteur. Or ceci peut être très utile pour réaliser des mesures sur des machines de forgeage industrielles qu'il n'est pas possible d'instrumenter en capteurs.

Enfin, il ne faut pas oublier que d'autres erreurs, qui concernent tous les types de capteurs, peuvent se produire au niveau de la chaine d'acquisition : erreur de calibrage ou défaut de synchronisation des signaux.

V. Conclusions

Dans cette étude, différent types de capteurs ont été utilisés pour mesurer le déplacement et les efforts dans le cas du refoulement de cylindres de cuivre sur une presse à vis. La technologie de chaque capteur a été détaillée ainsi que leurs avantages et inconvénients. Une nouvelle application du filtre de Kalman a été développée pour en déduire la vitesse du coulisseau à partir du déplacement et de l'accélération.
Pour mesurer le déplacement du coulisseau, les capteurs laser fixés sur l'outillage, semblent être une bonne option pour des conditions de laboratoire, puisque le signal est très proche de la référence, pour les chocs mous comme pour les chocs durs. Cependant, dans cette étude, les capteurs laser montrent des limites pour mesurer le comportement dynamique du procédé de forgeage, mais ceci devrait pouvoir être corrigé en choisissant des capteurs laser conçus pour la dynamique. Malgré tout, des capteurs laser seuls ne suffisent pas pour déduire la vitesse du coulisseau : un accéléromètre doit être ajouté et un filtre de Kalman doit être appliqué à la fois sur le déplacement et l'accélération. Les accéléromètres permettent aussi de déterminer, avec précision, le point d'impact, ce qui est intéressant pour des frappes successives. En conditions industrielles, le codeur incrémental intégré à la machine fournit une bonne alternative pour mesurer le déplacement : les résultats sont fiables et peuvent être filtrés pour supprimer les vibrations, si besoin. Concernant les efforts de forgeage, les cellules de mesure par extensomètre fournissent des résultats satisfaisants quand le capteur est proche du lieu de frappe. Dans le cas où une cellule de mesure ne peut être intégrée que dans le bâti de la machine, les données doivent être filtrées pour supprimer les vibrations parasites. Et si une machine ne peut être instrumentée en effort, il a été montré que déduire la force à partir de la déformation d'un lopin dont la rhéologie est connue, permet d'avoir de bonnes prédictions jusqu'à ce que la force maximale soit atteinte.

VI. Aknowledgements

Les auteurs veulent remercier M. Jean François Mull et M. Alexandre Fendler pour leur aide sur ce projet. Les auteurs souhaitent également remercier ISEETECH pour les fournitures de la plateforme Vulcain 4.0, dédiée au forgeage.

VII. References

[1] C. Cimino, E. Negri, L. Fumagalli, "Review of digital twin applications in manufacturing", Computers in industry, vol. 113, 2019

[2] M. Hawryluk, J. Ziemba, "Possibilities of application measurement techniques in hot die forging processes", Measurement vol. 110, pp. 284-295, 2017

[3] I. El-Galy, BA. Behrens, "Online monitoring of hot die forging processes using acoustic emission (part 1)", Journal for acoustic emission, vol.26, pp. 208-218, 2008

[4] C.K. Mukhopadhyay, S. Venugopal, T. Jayakumar, S.L. Mannan, B. Raj, B. Chatterji, R. Srinivasan, V. Gopalakrishnan, G. Madhusudan, R.S. Triapthi, "Optimisation of positionning of an acoustic emission sensor for monitoring hot forging", Materials and Manufacturing processes, vol. 21, pp. 543-549, 2006

[5] T. Yoneyama, K. Miyoshi, T. Tate, "Contact Stress and Temperature during Air-Stamp Hammer Upsetting of a Circular Cylinder", Journal of Manufacturing Processes 32 : 791-801. doi : 10.1016/j.jmapro.2018.04.012.

[6] L. Galdos, E. S. de Argandoña, N. Herrero, M. Ongay, J. Adanez, M. Sanchez, "The Calibration of High Energy-Rate Impact Forging Hammers by the Copper-Column Upsetting Method and High Speed Camera Measurements", Key Engineering Materials 611-612 : 173-177.

[7] R. Chen, Z. Li, K. Zhong, X. Liu, Y. Wu, C. Wang, Y. Shi, "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 19.5 : 996. doi : 10.3390/s19050996.

[8] C. Brecher, W. Klein, M. Tannert, "Optimization of Multi-Stage Closed-Die Forging Processes by Coupled Simulation of the Machine and the Forging Processes", Production Engineering 4.2-3 : 279-286.

[9] C. Durand, R. Bigot, C. Baudouin, "Contribution to the characterization of metal forming machines: application to screw presses ", 17th International Conference on Metal Forming, Metal Forming 2018.

[10] S.Y. Hsia, Y.T Chou, C.C Chang, L.Y. Hsu, "Measurement of wisdom forging force using piezoelectric materials", ICPMMT 2017, vol. 123

[11] S.Y. Kim, A. Ebina, A. SAno, S. Kubota, "Monitoring of process and tool status in forging process by using bolt type piezo-sensor", Procedia Manufacturing, vol. 15, pp. 542-549, 2018

[12] S.A. Spiewak, R. Duggirala, K. Barnett, "Predictive monitoring and control of the cold extrusion process", Annals of CIRP, Vol. 49, pp. 383-386, 2000

[13] S. Han, "Measuring displacement signal with an accelerometer," J. Mech. Sci. Technol., vol. 24, no. 6, pp. 1329–1335, 2010

[14] R. Ferrero, F. Gandino, M. Hemmatpour, B. Montrucchio, M. Rebaudengo, "Exploiting accelerometers to estimate displacement," 2016 5th

Mediterr. Conf. Embed. Comput. MECO 2016 - Incl. ECyPS 2016, BIOENG.MED 2016, MECO Student Chall. 2016, no. March 2018, pp. 206–210, 2016
[15] G. Koo, K. Kim, JY. Chung, J. Choi, N-Y. Kwon, D-Y. Kang, H. Sohn, “Development of a high precision displacement measurement system by fusing a low cost RTK-GPS sensor and a force feedback accelerometer for infrastructure monitoring,” Sensors (Switzerland), vol. 17, no. 12, 2017, doi: 10.3390/s17122745.
[16] K.-T. Park, S.-H. Kim, H.-S. Park, K.-W. Lee, “The determination of bridge displacement using measured acceleration,” Engeneeing Struct., vol. 27, pp. 371–378, 2005, doi: 10.1016/j.engstruct.2004.10.013.
[17] A. Smyth, M. Wu, “Multi-rate Kalman filtering for the data fusion of displacement and acceleration response measurements in dynamic system monitoring,” Mech. Syst. Signal Process., vol. 21, no. 2, pp. 706–723, 2007
[18] A. J. Organ, “ The calibration of high energy-rate impact forming machines”, Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol.7, pp.325-349, Pergamon press, 1967
[19] T. Altan, D.E. Nichols, “Use of standardized copper cylinders for determining load and energy in forging equipment”, Journal of engineering for industry, Transactions of the ASME, pp. 769-774, 1972
[20] R.P. Carreker Jr., W.R. Hibbard Jr, “Tensile deformation of high-purity copper as a function of temperature, strain rate, and grain size ”, Acta Metallurgica, Vol.1, pp. 654-663, Nov. 1953
[21] H. Han, “The validity of mathematical models evaluated by two-specimen method under the unknown coefficient of friction and flow stress”, J. Mater. Process. Technol., vol. 122, no. 2–3, pp. 386–396, 2002
[22] P. Christiansen, P. A. F. Martins, N. Bay, “Friction Compensation in the Upsetting of Cylindrical Test Specimens,” Exp. Mech., vol. 56, no. 7, pp. 1271–1279, 2016, doi: 10.1007/s11340-016-0164-z.
[23] A. Trujillo-Pino, K. Krissian, M. Alemàn-Flores, D. Santana-Cedrès, “Accurate subpixel edge location based on partial area effet,” Image and vision computing, Vol. 31, Issue 1, 2013, pp. 72-90

Design Optimization of Bistable NES

Zhenhang Wu
Institut Clément Ader (ICA), CNRS, INSA-ISAE-Mines Albi-UPS, Université de Toulouse,
3 rue Caroline Aigle,
Toulouse, 31400, France
e-mail: zhenhang.wu@insa-toulouse.

Sébastien Seguy
Institut Clément Ader (ICA), CNRS, INSA-ISAE-Mines Albi-UPS, Université de Toulouse,
3 rue Caroline Aigle,
Toulouse, 31400, France
e-mail: sebastien.seguy@insa-toulouse.fr

Manuel Paredes
Institut Clément Ader (ICA), CNRS, INSA-ISAE-Mines Albi-UPS, Université de Toulouse,
3 rue Caroline Aigle,
Toulouse, 31400, France
e-mail: manuel.paredes@insa-toulouse.fr

Abstract*—This work mainly focuses on the optimization of the control strategy to obtain a bistable NES that achieves maximum efficiency under different harmonic excitations. As excitation increases, four unique regimes appear in turn. According to its distribution of characteristic responses regimes, the maximum efficiency point occurs when the Strongly Modulated Response (SMR) disappears. The optimal stiffness for a given excitation is expressed as a function of negative stiffness, which gives the possibility of controlling it by adjusting the pre-compressed length in a four spring system. The model of the device consists of 2 conical and 2 linear springs that counterbalance one another and provide the desired stiffness. The optimal absorbing range of the device is found by numerical investigation. The result of the primary static experiment proves that the model and stiffness control strategy are valid. This work offers some fundamental procedures for the optimal design of a bistable NES and paves the way for its practical implementation.

***Keywords*— Bistable NES, Response regimes, Multiple Scales Method, Optimization, Stiffness control**

I. Introduction

Harmful vibration can reduce the life of civil constructions and mechanical structures, and increase errors in manufacturing processes. Suppressing such undesirable vibration has become a long-standing issue. The traditional solution is to use Tuned Mass Damping (TMD) as a linear absorber. However, the capability of TMD is restricted to a narrow frequency band near its natural frequency. To overcome the drawbacks, the Nonlinear Energy Sink (NES) has been proposed and is becoming an active research field. It uses a relatively small attached mass, which is connected to the primary system by essentially cubic nonlinear stiffness and damping. The energy of Linear Oscillator (LO) is irreversibly transferred into the NES and dissipated by the damping. This Targeted Energy Transfer (TET) results from 1:1 transient resonance capture [1]. During the TET, intensive energy transfer leads to high efficiency in absorbing vibration. The efficiency with which this mechanism absorbs vibration has been explored by both numerical [2] and experimental methods [3].

A certain high energy threshold needs to be reached to activate intensive energy dissipation. With the introduction of negative linear stiffness in a cubic NES, a bistable NES can be set up, which also shows high efficiency in processing a low energy input because of nonlinear beating. In the cubic case, a small NES mass ratio and low damping are required to ensure the occurrence of TET. Increasing the nonlinear stiffness makes the system more suitable for handling low energy input, which is considered as its core property. In the bistable case, the diameter and depth of the potential well expand with a larger value of negative stiffness [4]. The bistable NES can be constructed by introducing negative stiffness between the primary system and the attached NES mass. This essentially changes the dynamic regimes. When negative stiffness is included in the nonlinear stiffness, the modified bistable NES can absorb input shock energy with high efficiency [5].

By considering the variety of nonlinearity, a number of novel NES are proposed and investigated, each with its own potential. They include vibro-impact NES, rotational NES [7], and piecewise NES. In these systems, the impact acceleration can be suppressed mostly by the enhanced single side vibro-impact NES. Because of the above characteristics, potential applications have included the control of seismic vibrations in built structures, flutter mitigation in a hypersonic 3-D wing and chatter control in a turning process [5].

However, the traditional NES is not reconfigurable, which restricts its general applications in various conditions. Numerous attempts have been made to overcome this drawback, for example, a time-varying inertial mass is provided to better absorb a large initial impulse and lower energy pumping threshold in [8]. The distance between the central magnetic mass and the fixed magnetic mass is shown to be easily controlled to build a tunable stiffness in [9]. These kinds of method provide great flexibility in the use of NES in different mechanical contexts

The paper is organized as follows. In section 2, various response regimes are distinguished and investigated by the Multiple Scales method and complex variables method. The existence of negative stiffness introduces essentially chaotic behaviours. Based on the distribution of regimes, the optimal stiffness is selected to absorb input energy with maximum efficiency. In the next section, a system combining four springs - two conical springs and two pre-compressed springs - is presented. Its range of absorbing capability is also investigated. A pre-compressed length control strategy is presented in the fourth section. A bistable NES system, used to verify the previously determined optimal stiffness experimentally, is presented in the fifth section. The last section mentions some noteworthy conclusions.

II. RESPONSE REGIMES UNDER HARMONIC EXCITATION

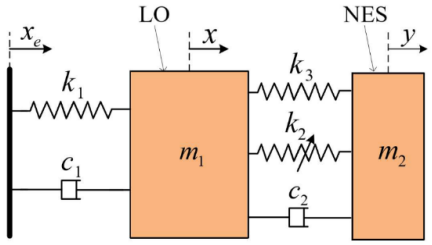


Figure 1 SCHEMATIC OF PRIMARY STRUCTURE (LO) AND NES

The proposed system is shown in Figure 1. m_1 and m_2 represent the mass of the Linear Oscillator (LO) and the NES. The LO is excited by the harmonic force x_e through the linear stiffness k_1 and damping c_1. The NES is attached to the LO by the cubic stiffness k_3, negative stiffness k_2, and damping c_2. The following equation governs the motion:

$$\begin{aligned} &m_1\frac{d^2x}{dt^2}+c_1\frac{dx}{dt}+c_2\left(\frac{dx}{dt}-\frac{dy}{dt}\right)+k_1x+k_2(x-y)^3 \\ &+k_3(x-y)=k_1x_e+c_1\frac{dx_e}{dt} \\ &m_2\frac{d^2y}{dt^2}+c_2\left(\frac{dy}{dt}-\frac{dx}{dt}\right)+k_2(y-x)^3+k_3(y-x)=0 \end{aligned} \quad (1)$$

The harmonic force is expressed as $x_e = G\cos(\omega t)$. By substituting the variables as follows into Equation (1), the dimensionless form can be obtained.

$$\begin{aligned} &\varepsilon=\frac{m_2}{m_1},\omega_0^2=\frac{k_1}{m_1},K=\frac{k_2}{m_2\omega_0^2},\delta=\frac{k_3}{m_2\omega_0^2},\lambda_1=\frac{c_1}{m_2\omega_0}, \\ &\lambda_2=\frac{c_2}{m_2\omega_0},\mathrm{F}=\frac{G}{\varepsilon},\Omega=\frac{\omega}{\omega_0},\tau=\omega_0 t \end{aligned} \quad (2)$$

The new variables $v = x+\varepsilon y$, $w = x-y$ and the Manevitch complex variables $\varphi_1 e^{i\Omega\tau} = dv+i\Omega\tau v$, $\varphi_2 e^{i\Omega\tau} = dw+i\Omega\tau w$ are introduced into the dimensionless equation. Only terms containing $e^{i\Omega\tau}$ are conserved.

$$\begin{aligned} &\dot{\varphi}_1+\frac{i\Omega}{2}\varphi_1+\frac{\varepsilon\lambda_1}{2(1+\varepsilon)}(\varphi_1+\varepsilon\varphi_2)-\frac{i(\varphi_1+\varepsilon\varphi_2)}{2\Omega(1+\varepsilon)}-\frac{\varepsilon F}{2}-\frac{i\varepsilon^2\lambda_1F\Omega}{2}=0 \\ &\dot{\varphi}_2+\frac{i\Omega}{2}\varphi_2+\frac{\varepsilon\lambda_1}{2(1+\varepsilon)}(\varphi_1+\varepsilon\varphi_2)-\frac{i(\varphi_1+\varepsilon\varphi_2)}{2\Omega(1+\varepsilon)}+\frac{\lambda_2(1+\varepsilon)}{2}\varphi_2 \\ &-\frac{3iK(1+\varepsilon)}{8\Omega^3}\varphi_2^2|\varphi_2|-\frac{\varepsilon F}{2}-\frac{i\varphi_2\delta(1+\varepsilon)^2}{2\Omega}=0 \end{aligned} \quad (3)$$

The stable periodic solutions φ_{10} and φ_{20} can be obtained under the assumption that the derivative is zero. The multiple scales method, which can also be found in [10], is applied by substituting the following variables.

$$\frac{d}{d\tau}=\frac{\partial}{\partial\tau_0}+\varepsilon\frac{\partial}{\partial\tau_1}+\varepsilon^2\frac{\partial}{\partial\tau_2},\quad \varphi_i=\varphi_i(\tau_0,\tau_1,\tau_2),\quad \tau_k=\varepsilon^k\tau_0 \quad (4)$$

The terms that contain the coefficient of ε^0 give:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial\tau_0}\varphi_2=0, \\ &\frac{\partial}{\partial\tau_0}\varphi_2+\frac{\lambda_2}{2}\varphi_2+\frac{i}{2}(\varphi_2-\varphi_1)-\frac{3iK}{8}\varphi_2^2|\varphi_2|-\frac{1}{2}i\delta\varphi_2=0 \end{aligned} \quad (5)$$

The new variables $\varphi_1(\tau_0)=N_1e^{i\theta1}$, $\varphi_2(\tau_0)=N_2e^{i\theta2}$ are introduced into Equation (5) to reveal the variation of the stable solution under the different levels of energy input.

$$\begin{aligned} &Z_1=\lambda_2^2Z_2+(\delta-1)^2Z_2-\frac{3K}{2}(\delta-1)Z_2^2+\frac{9K^2}{16}Z_2^3, \\ &Z_1=N_1^2,Z_2=N_2^2 \end{aligned} \quad (6)$$

The Slow Invariant Manifold (SIM) is an essential tool to describe the motion backbone with respect to the slow time scales. In the SIM structure, the two singular points Z_{21} and Z_{22} exist and divide the SIM into two stable branches and one unstable branch.

$$Z_{2i}=\frac{4\left(2(1-\delta)\mp\sqrt{(1-\delta)^2-3\lambda_2^2}\right)}{9K},i=1..2 \quad (7)$$

In the cubic case (δ=0), the unstable region is considered as the possible reason for energy pumping and may give rise to the SMR.

III. BISTABLE NES RESPONSE REGIMES

The potential function of a bistable NES can divide the response regimes according to its energy level, where its potential function is defined as $U=\delta w^2/2+K w^4/4$. Obviously, the bistable NES has two equilibrium points, whose coordinates are ($\sqrt{-\delta/K}$,0) in Figure 2.

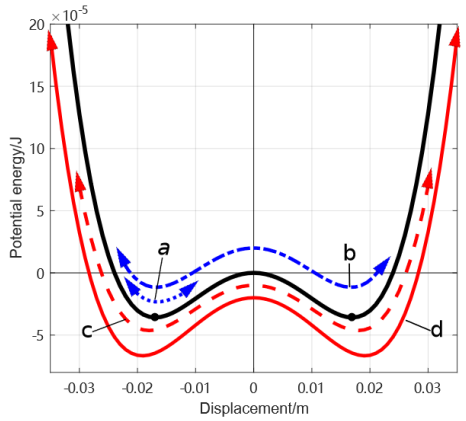


Figure 2 POTENTIAL FUNCTION OF THE UNPERTURBED SYSTEM: (A) AN INTRA-WELL OSCILLATION; (B) CHAOTIC INTER-WELL OSCILLATION; (C) STRONGLY MODULATED RESPONSE; (D) STABLE PERIODIC RESPONSE

In different energy levels, four characteristic stages, which contain the time domain of *w* and *v*, and its phase trajectory in the SIM structure, are chosen and illustrated in Figure 3 with parameters ε=0.01, λ_1=1.67, λ_2=0.167, K=1754, δ=−0.44. The four typical cases under the various G values: 0.08 mm, 0.15 mm 0.34 mm, and 0.45 mm respectively are chosen to show it dynamic behaviours in time domain in Figure 3.

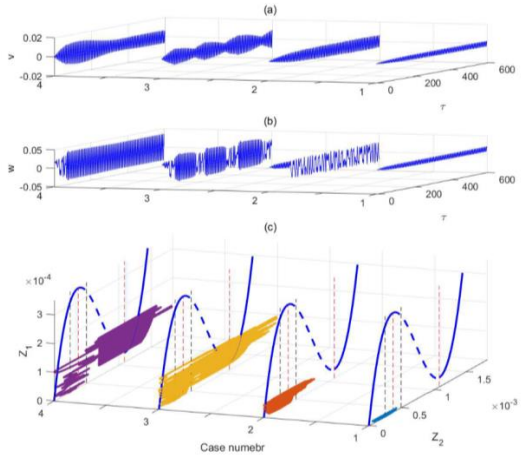


Figure 3 RESPONSE REGIMES IN BISTABLE NES (A) V DISPLACEMENT (B) W DISPLACEMENT (C) PHASE TRAJECTORY OF Z2 AND Z1

To better understand the efficiency distribution of a bistable NES over the different energy levels, the energy dissipated by a NES is defined in Equation (6) and its efficiency distribution is presented in Figure 4

$$E_{NES}(\tau)=\int_{\tau_0}^{\tau}\varepsilon\lambda_2\left(\dot{x}-\dot{y}\right)^2 d\tau$$
$$E_{LO}(\tau)=\int_{\tau_0}^{\tau}\varepsilon\lambda_1\dot{x}^2 d\tau, r_{NES}=\frac{100\%\times E_{NES}}{E_{LO}+E_{NES}} \quad (8)$$

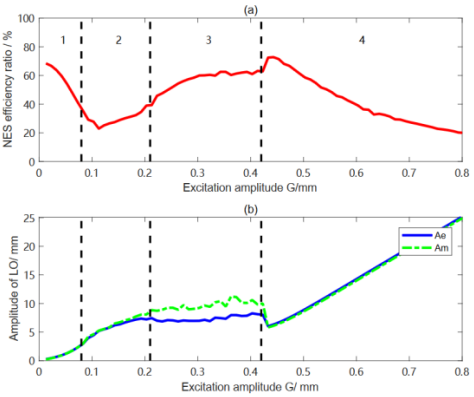


Figure 4 EFFICIENCY OF BISTABLE NES (A) THE MAXIMUM AMPLITUDE (AM) AND MEAN AMPLITUDE (AE) OF LO FOR DIFFERENT EXCITATIONS G (B) ENERGY DISSIPATION RATIO OF BISTABLE NES.

According to the above 3 figures, to describe bistable NES behaviours under different amplitudes of excitation, four response regimes can be clearly identified:

(a) Intra-well oscillation

This period is a low energy motion. The displacement of the NES is restricted to one of the wells, in the vicinity of equilibrium (x_0, 0). Unlike the situation in the cubic case, the phase trajectory is not located in the left stable branch of the SIM and symmetrical with the attractor axis. The small amplitudes of *w* and *v* are considered as a nonlinear beat that helps the system achieve relatively high efficiency.

(b) Chaotic inter-well oscillation

With the increase in energy, the motion of the phase trajectory exceeds the pseudo-separatrix and crosses two wells, so chaos occurs. The chaos phenomenon is the characteristic motion of a bistable NES. The Melnikov method is employed to determine the boundary of the chaos response for the homoclinic bifurcation. The trajectory in the SIM structure (case 2 in subplot (c) of Figure 3) occupies a chaos region and will grow and expand without jumping. The system remains in a relatively low-efficiency level. The amplitude is an unstable result in that the maximum amplitude A_m and mean amplitude A_e start to separate. The chaotic inter-well oscillation period also involves other subharmonic oscillation, which is beyond the scope of our present considerations.

(c) Strongly modulated response

When its energy continues to grow, the system still shows the 'jumping' phenomenon. Initially, the phase trajectory is located in the chaos region and is expanding. Then the phase trajectory jumps to the right SIM branch and moves down along it. When it reaches the singular point, it will jump back to the chaos region and expand until the next

jumping cycle. Unlike the situation in the cubic NES case, the SMR is triggered by chaos expanding behaviours instead of the phase trajectory reaching its singular point Z_{21}. In this stage, the amplitude of LO increases when NES performs chaotic motion and declines when systems have 1:1 resonance, where the LO and NES oscillate at the same frequency. The amplitude of LO appears in an unstable stage. The distance between the A_e and A_m becomes constant, confirming that the SMR occupies the whole time if the excitation increases. Its efficiency achieves a relatively high level at this moment.

(d) Stable response

In a high energy level, the SIM continues to function and describes the stable response. Once the excitation is a little greater than G_{2c}, the SMR disappears and the system produces a stable response. It symbolizes the saturation of energy absorption in the bistable NES, which is similar to the cubic case. The maximum efficiency points occur in the transition between SMR and stable response period. According to [10], the excitation threshold G_{2c} can be considered as optimal excitation to deduce the optimal stiffness reversely. The maximum amplitude and mean amplitude of LO coalesce again.

$$
\begin{aligned}
&G_{ic} = \varepsilon \frac{N_{2i}}{4}\frac{F_1}{F_2}, i = 1,2 \\
&F_1 = 9K^2N_{2,j}^2\lambda_1 + 24K^2N_{2,j}^2\delta\lambda_1 \\
&-24KN_{2,j}^2\lambda_1 + 16\delta^2\lambda_1 + 16\lambda_1\lambda_2^2 + 32\delta\lambda_1 + 16\lambda_1 + 16\lambda_2 \\
&F_2 = \sqrt{9K^2N_{2,j}^4 + 24KN_{2,j}^2\delta - 24KN_{2,j}^2 + 16\lambda_2^2 + 16\left(\delta^2 - 1\right)^2}
\end{aligned}
\tag{9}
$$

For a given excitation, G, there is an optimal stiffness to absorb energy at maximum efficiency. Substituting the G into the above equation and solving the optimal stiffness value, the optimal nonlinear stiffness to adapt to the given excitation is expressed as:

$$
\begin{aligned}
&K_m = \frac{2}{81}(\varepsilon^2(-144\delta\lambda_1^2\lambda_2^4 + 72\delta^2\lambda_1^2\lambda_2^2 - 36\delta^3\lambda_1\lambda_2 \\
&-7272\delta\lambda_1^2\lambda_2^2 - 324\delta\lambda_1\lambda_2^3) + 1086\delta^2\lambda_1\lambda_2 - 108\delta\lambda_1\lambda_2 \\
&-24\delta^3\lambda_1^2\lambda_2^2 + 48\mu\delta\lambda_1^2 + 108\mu\lambda_1\lambda_2^3 - 12\mu\delta^4\lambda_1^2 \\
&-36\mu\lambda_1\lambda_2 + 48\mu\delta^3\lambda_1^2 - 24\mu\lambda_1^2\lambda_2^2 - 72\mu\delta^2\lambda_1^2 \\
&-8\delta^2\lambda_1^2 + 40\delta^4\lambda_1^2 + 144\lambda_1^2\lambda_2^4 - 80\delta^3\lambda_1^2 \\
&+80\delta^2\lambda_1^2 + 24\lambda_1^2\lambda_2^2 + 324\lambda_1\lambda_2^3 - 40\delta\lambda_1^2 - 162\delta\lambda_2^2 \\
&+36\lambda_1\lambda_2 + 8\lambda_1^2 + 36\mu\lambda_1^2\lambda_2^4 + 162\lambda_2^2 - 12\mu\lambda_1^2 + 81\mu\lambda_2^2 \\
&+72\mu\delta\lambda_1\lambda_2 + 4\mu^3\delta^2\lambda_1^2 - 8\mu^3\delta\lambda_1^2)^2 / (\mathrm{G}^2(\delta^2 + \delta\mu \\
&+3\lambda_2^2 - 2\delta - \mu + 1)) \\
&\mu^2 = \delta^2 - 3\lambda_2^2 - 2\delta + 1
\end{aligned}
\tag{10}
$$

In the aim of finding the exact optimal stiffness under the given fixed excitation and comparing it with the optimal stiffness expression, the different nonlinear stiffnesses, K, were fully tested and the result is presented in Figure 5.

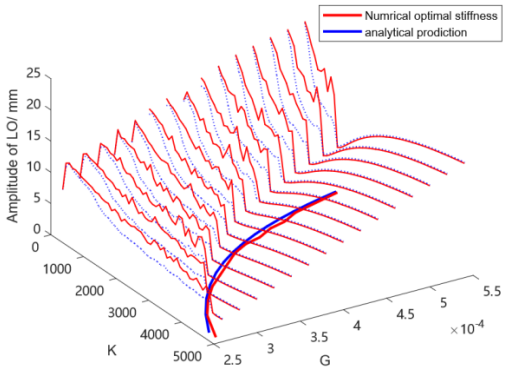


Figure 5 EFFICIENCY OF BISTABLE NES FOR DIFFERENT EXCITATIONS, G, WHERE THE NONLINEAR STIFFNESS, K, IS A CONTROL PARAMETER (ε=0.01, λ1=1.67, λ2=0.167 δ=−0.44)

The bold red line is the minimum amplitude of the projection of LO in the K-G plane, while the bold blue line is the analytical prediction of the optimal K value. Red line is A_m. Blue dotted line is A_e. An obvious tendency is observed: larger imposed force (input energy) leads to a smaller designed nonlinear stiffness for a fixed negative stiffness value. When the designed value nears the optimal value for a given excitation, the amplitude of LO will decline sharply. If the design stiffness is a little greater than the optimal value, it can still reduce the amplitude of the primary system with high efficiency. In a larger range, the analytical prediction can still describe the optimal $K-G$ curve well.

IV. NUMERICAL VALIDATION OF FOUR SPRING SYSTEM

The transition from cubic NES to bistable NES is mainly controlled by the introduction of negative stiffness. And the negative stiffness k_3 and nonlinear stiffness k_2 both determine the optimal excitation. To control the stiffness and adapt to different energy input levels, a system combining four springs was constructed and is illustrated in Figure 6.

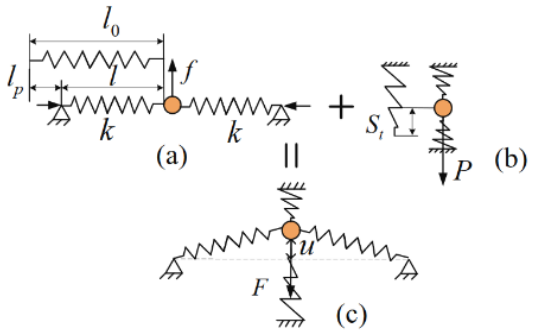


Figure 6 DETAILED DIAGRAM OF NES SYSTEM: (A) NEGATIVE STIFFNESS MECHANISM; (B) CONICAL SPRING; (C) THE COMBINING SYSTEM

The core component is the conical spring, which has two characteristic phases during the compression: (1) a linear phase and (2) a nonlinear phase. So the system consists of two conical springs, which are pre-compressed at the transition point to counterbalance the linear phase. The two linear springs are installed vertically with the nonlinear spring at a chosen pre-compressed length l_p in order to counterbalance the linear stiffness in the nonlinear phase and create the pure cubic or bistable NES. Its force-displacement relationship can be expressed as follows.

$$F = \left(a_1 + k_0 - 2k_l \frac{l_p}{l_{0l} + 2l_c - l_p} \right) u + \left(a_3 + k_l \frac{l_{0l} + 2l_c}{\left(l_{0l} + 2l_c - l_p \right)^3} \right) u^3 \quad (7)$$

where k_0 is the linear phase stiffness and a_1, a_3 are the linear stiffness and cubic stiffness in the nonlinear phase of a conical spring. l_{0l} and l_c are the lengths of the linear spring and connector, respectively. k_l is the stiffness of the linear spring. The optimal stiffness is a function of δ and, theoretically, the K can be detuned to meet the best tuned stiffness. By adjusting the pre-compressed length l_p, the system can process different negative stiffnesses k_3 and nonlinear stiffnesses k_2 to shift between the cubic NES and the bistable NES. So the system can adapt to various amplitudes with maximum efficiency in different contexts. The parameters of the system are presented as

	k_0	a_1	a_3	k_l
Value	187 N/m	280 N/m	4e5 N/m^3	1060 N/m
	l_{0l}	l_c	l_p	
	50 mm	14.5 mm	14.3 mm	

TABLE 1 PARAMETERS OF FOUR SPRING SYSTEM

The blue trajectory in Figure 7 projects onto the K-δ plane as the values of K and δ of the systems vary with changing l_p. Obviously, the initial increase in pre-compression augments the values of both K and δ. The surface in Figure 7 is the corresponding target excitation that the system can sustain at maximum efficiency under different combinations of K and δ values.

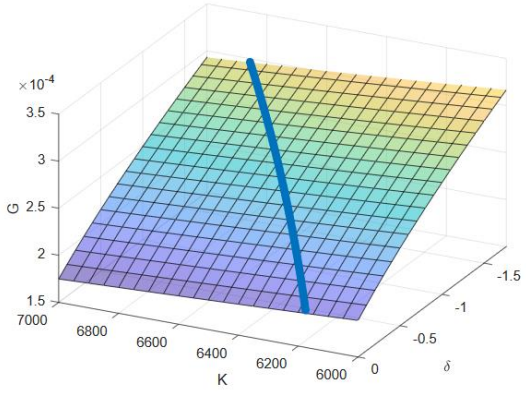


Figure 7 OPTIMAL EXCITATION SURFACE WITH DIFFERENT K AND Δ VALUES. BLUE LINE REPRESENTS THE K AND Δ VALUES THAT THE DEVICE CAN ACHIEVE BY ADJUSTING THE PRE-COMPRESSED LENGTH

As the value of nonlinear stiffness and negative stiffness augments, according to Equation (9), the threshold excitation value, G_{2c}, increases, meaning that the bistable NES can sustain more intense excitation. In the fixed nonlinear stiffness condition, a variation in δ results in a more intense change in G than in the changed K and fixed δ condition. This phenomenon indicates that the more efficient method to adapt to different amplitude excitations is to adjust the δ value. Through the method of adjusting the pre-compressed length, the target excitation that bistable NES can absorb in maximum efficiency can be modulated.

In our numerical study, the length of pre-compression varies from 14.3 mm to 19 mm, so the NES system changes from a cubic NES to a bistable NES. The intervals of K and δ are [6179, 6855] and [0, -1.74] respectively. From Figure 7, the minimum optimal excitation is G = 0.188 mm and the maximum optimal excitation G is 0.3 mm. For our device, increasing lp can enable the bistable system to sustain a larger excitation amplitude in maximum efficiency.

V. PRELIMINARY STIFFNESS CONTROL EXPERIMENT

In order to verify the stiffness control method, the system of four combined springs was built (Figure 8) and its characteristic displacement force curve was tested.

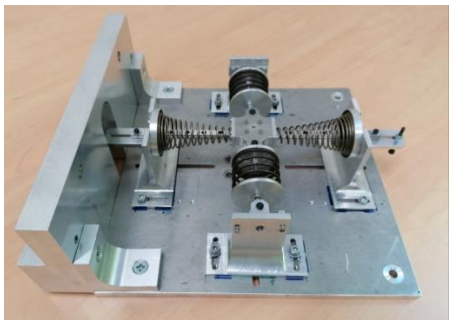


Figure 8 EXPERIMENT DEVICE

Figure 9 shows the difference between the target stiffness curve (solid line) and the actual result of the experiment (dashed dotted line). The pre-compressed lengths of cases 1, 2, and 3 were 16 mm, 18 mm, and 20 mm, respectively. In every case, the theoretical result described the experimental result with sufficient accuracy. The figure shows that two equilibria (F = 0) formed, one on either side of the displacement, which characterizes a bistable NES. The distance between the equilibrium points becomes greater when the l_p increases, resulting in the augmentation of the span and depth of the potential well. So it can be concluded that the control strategy of changing the length of pre-compression is feasible to produce desirable stiffness characteristics.

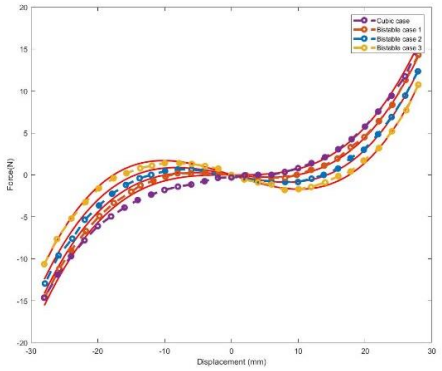


Figure 9 COMPARISON OF TARGET CURVE AND EXPERIMENTAL RESULT OF STATIC DISPLACEMENT FORCE CHARACTERISTIC OF DIFFERENT PRE-COMPRESSED LENGTH CASES

VI. CONCLUSION

The current study investigates the optimal state of bistable NES based on the response regimes. The optimal point is selected from the standpoint of energy absorption efficiency. The numerical method indicates the feasibility of the control strategy and the primary stiffness control experiment is carried out. Several main conclusions can be drawn:

(1) With increasing harmonic amplitude excitation, the intra-well oscillation, chaotic inter-well oscillation, strongly modulated response and stable response occur in that order. The optimal point occurs in the transition period from SMR to stable response.

(2) In large amplitude energy input conditions, the threshold excitation G_{2c} calculated by the multiple scales method and complex variables method can represent the target excitation. Explained by the SIM structure, the singular point Z_{22} represents the point where this system reaches the maximum efficiency it can.

(3) For a given excitation, the optimal nonlinear stiffness value is reached by adjusting the pre-compressed length l_p. Larger l_p leads to increasing K and δ values. So the bistable NES system can sustain a larger amplitude excitation. The numerical simulation reveals that a slightly larger design value of nonlinear stiffness K can still lead to high efficiency in absorbing certain excitations.

(4) The experimental set-up is being built and the fundamental stiffness control has been carried out to meet the target stiffness with sufficient accuracy. Good agreement is observed between the theoretical and the experimental results.

VII. REFERENCES

[1] Kerschen, G, Lee, Y. S, Vakakis, A. F, McFarland, D. M., and Bergman, L. A. "Irreversible passive energy transfer in coupled oscillators with essential nonlinearity", Appl Math, Cambridge University Press, 66(2), 2005, pp. 648–679

[2] Vaurigaud, B., Savadkoohi, A. T., and Lamarque, C.-H. "Targeted energy transfer with parallel non-linear energy sinks. Part i: design theory and numerical results". Nonlinear dyn, Springer, 66(4), 2011. pp. 763–780

[3] McFarland, D. M, Kerschen, G, Kowtko, J. J, Lee, Y. S, Bergman, L. A, and Vakakis, A. F. "Experimental investigation of targeted energy transfers in strongly and nonlinearly coupled oscillators". J. AcoustSoc Am, Acoustical Society of America, 118(2), 2005, pp. 791–799.

[4] Romeo F, Sigalov G, Bergman L A, et al. "Dynamics of a linear oscillator coupled to a bistable light attachment: numerical study", J. Comput. Nonlinear Dyn, ASME, 10(1), 2015, p. 011007

[5] AL-Shudeifat, M. A. "Highly efficient nonlinear energy sink", Nonlinear Dyn, Springer, 76(4), 2014, pp. 1905–1920.

[6] Sigalov, G., et al. "Resonance captures and targeted energy transfers in an inertially-coupled rotational nonlinear energy sink." Nonlinear dynamics, Springer, 69(4), 2012, pp. 1693-1704.

[7] Gourc E, Seguy S, Michon G, et al. "Chatter control in turning process with a nonlinear energy sink", Adv Mat Res, Trans Tech Publications Ltd, 698: 2013, pp. 89-98.

[8] Yang T, Hou S, Qin Z H, et al. "A dynamic reconfigurable nonlinear energy sink", J. Sound Vib, Elsevier, 494, 2020, p. 115629.

[9] Benacchio S, Malher A, Boisson J, et al. "Design of a magnetic vibration absorber with tunable stiffness" Nonlinear Dyn, 85(2), 2016, pp. 893-911.

[10] Manevitch, L. "The description of localized nor-mal modes in a chain of nonlinear coupled oscillators using complex variables". Nonlinear Dyn, Springer, 25(1-3) , 2001, pp. 95–109

[11] Qiu, D., Li, T., Seguy, S., and Paredes, M. "Efficient targeted energy transfer of bistable nonlinear energy sink: application to optimal design", Nonlinear Dyn, Springer, 92(2), 2018, pp. 443–461.

Session 1-C : Nouveaux enjeux et défis sociétaux

Ecodesign & medicine products: the pharmaceutical sector complexity

Duc-Nam LUU[1, 2]
[1]Arts et Métiers Institute of Technology, LCPI,
HESAM University
151 boulevard de l'Hôpital
75013 Paris, France
[2]Sanofi
82 avenue Raspail
94250 Gentilly, France
duc-nam.luu@ensam.eu

Nicolas MARANZANA[1]
[1]Arts et Métiers Institute of Technology, LCPI,
HESAM University
151 boulevard de l'Hôpital
75013 Paris, France
nicolas.maranzana@ensam.eu

Claus-Jürgen MAIER[3]
[3]Sanofi
Industriepark Höchst
65926 Frankfurt am Main, Germany
claus-juergen.maier@sanofi.com

Améziane AOUSSAT[1]
[1]Arts et Métiers Institute of Technology, LCPI,
HESAM University
151 boulevard de l'Hôpital
75013 Paris, France
ameziane.aoussat@ensam.eu

Abstract — Like any manufacture activity, the pharmaceutical industry has the duty to make available products without degrading the environment throughout its whole life cycle. The Ecodesign is an approach to integrate such parameters into design product and should be considered for medicine products. Nevertheless, this sector is facing an ethical complexity between the environmental faith of product and the health benefits for patients. This article aims to describe the complexity of eco-designed medicine in terms of societal duty within the pharmaceutical sector. The article is split with a first part who set aspects of medicines and their potential environmental impacts. Then, some points of view in terms of usage are described. Finally, a societal complexity of medicine is proposed to understand the Corporate Social Responsibility considerations for an Ecodesign approach within the pharmaceutical industry.

Key-words — Ecodesign, medicine product, pharmaceutical industry, product design, Corporate Social Responsability

I. INTRODUCTION

The environment is known as one of the biggest challenges of this 21st century [1]. In 2015, the United Nations (UN) has set 17 Sustainable Development Goals (SDG) to reach prosperity for people and the planet [2].
Most of companies have understand these aspects by integrating the SDG in their Corporate Social Responsibility (CSR). The Ecodesign is one approach to answer the environmental aspect of the CSR. The pharmaceutical industry does not make an exception on this topic. But this mindset does not seem to be widely spread in this sector and the overall CSR aspects should be considered or at least in the mind of people who are managing the implementation of Ecodesign.

II. OBJECTIVES & METHODOLOGIES

The goal of this paper is to describe the complexity that face ecodesign of medicine product in terms of societal duty within the pharmaceutical sector. We want to highlight these points through an integrative review of published literature as defined by Snyder [3]. We proposed to have a first part which covers the medicine product aspects (part III). A second part will cover some points of view in terms of usage of medicine product (part IV) to then discuss about the societal implications (part V).
The research was mainly performed through Google Scholar and Science Direct to cover the review of the medicine product (part III).

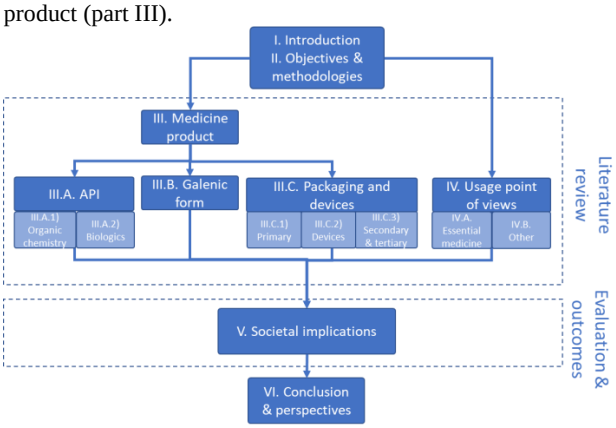


Figure 1 - Logical flow of the article

III. MEDICINE PRODUCT

The purpose of this part is to highlight some main aspects of medicine from a product point of view, who may have an environmental impact.

Basically, a medicine is declined with one or several Active Pharmaceutical Ingredient (API), mixed with excipients to obtain a galenic form. This last one is then put in a packaging or a device.

A. Active Pharmaceutical Ingredient (API)

Very specific of the pharmaceutical sector, the Active Pharmaceutical Ingredient is defined as the substance with a palliative, curative or preventive mechanism inside the organism or to establish a medical diagnostic and finally to act on physiologic functions. To get this API, there are mainly three ways [4]:

- Natural from plants, micro-organisms, wildlife
- Synthetic from organic chemistry / synthetic
- Synthetic from biological

We will have a focus on organic chemistry and biologicals who are widely used in the pharmaceutical sector.

1) Organic chemsitry

The organic chemistry is the most common way of the API production. It is possible to get the same molecule through different synthesis routes. These routes may lead to different steps in terms of heat, mix or even raw material consumptions. Nevertheless, it is possible to describe some high-level aspects like the production main steps, the main characteristics of the final product and the potential environmental concern.

Table 1 - Main aspects of organic chemistry processes

Aspects	Description
Production main steps	1) Mixing with solvent, reagents, and catalysts 2) Temperature control during reactions 3) Precipitation 4) Centrifugation 5) Purification 6) Drying
Final product main characteristic [4]	• Small molecules, low molecular weight, simple structure, stable • Predictable chemical process
Potential environmental concern [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12]	• API production stage Consumptions of energy, water, solvent, reagents, catalyzer Emissions of waste & wastewater, volatile organic compounds, Green House gases, non-degradable molecule by wastewater treatment plant • Medicine end of life stage Pharmaceutical in Environment (PIE) through patient excretion, unused medicine disposed unproperly, degradability of molecule variable by wastewater treatment plant (most part not)

2) Biologics

The terminology biologics refers to medicine product based on gene, cell, tissue, or protein therapy but also vaccines. Like for organic chemistry, even if each product has his own process and characteristic, it is possible to highlight some main common aspects [13].

Table 2 - Main aspects of biologics processes

Aspects	Description
Production main steps	1) Amplification with nutriments and scale-up steps 2) Harvest 3) Chromatography extraction & purification
Final product main characteristic [4]	• Large molecules, high molecular weight, complex & heterogeneous structure, sensitive to external conditions • Produced from living material and genetic engineering
Potential environmental concern [5] [6] [11] [12]	• API production stage Consumptions of energy, water, buffer, tonicity & stabilizing agent Emissions of waste & wastewater, Green House gases • Medicine end of life stage PIE through patient excretion, unused medicine disposed unproperly, for the most part degradable on wastewater treatment plant

Of course, the diversity of characteristics of molecules cannot be summarized as simply as in the previous paragraph. Nevertheless, the elements mentioned previously still represent a quick and rough overview of the API complexity.

B. Galenic form

Galenic form is defined as the final state of the medicine product, where each compound is combined [14]. It is in fact the presenting form but also a key for the stability and to make the API available to the targeted system of the patient. It is possible to define four big categories who can be then sub-divided.

- Liquid forms
- Semi solid forms
- Solid forms
- Injectable and inhalable forms

The injectable and inhalable families can be solid or liquids. We can identify a specific segmentation due to the condition of production with more constraints due to quality and the safety of the product.

An extraction and the processing of the data base of three health organization from France: Haute Autorité de Santé (HAS), Agence Nationale de Sécurité du Médicament (ANSM) and Assurance Maladie (AM) allow us to have the bellow repartition of the sub-categories galenic form [15].

This repartition is based on 15 045 products available on the data base. The notion "other" include every galenic form with 1% or less of the referenced products.

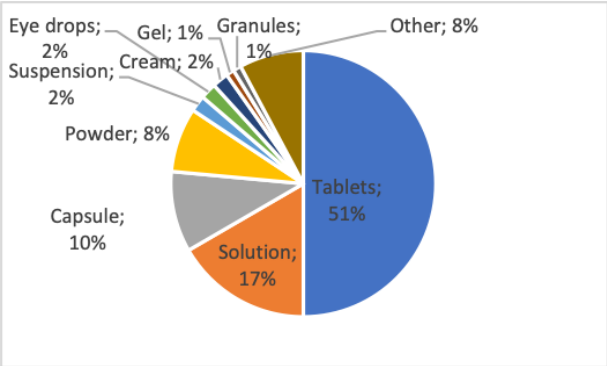


Figure 2 - Galenic form repartition, based on data from ANSM, HAS and AM

All these different galenic forms have specific processes but like for the API, we can identify some common potential environmental concern.

Table 3 - Example of potential environmental concern for the galenic formulation

Potential environmental concern [5]	• Galenic formulation stage Consumptions of energy, water Emissions of waste & wastewater, Green House gases Excipients residue (excretion and unused medicine)

C. Packaging and devices

1) Primary

The primary packaging is basically the packaging material directly in contact with the medicine [14]. It has the key roles of guarantee the integrity and quality of the product, identify, and give main information and facilitate the use of medicine. The primary packaging is closely linked to the galenic form and it is possible to set a list related with mains primary packaging.

Table 4 - Non exhaustive list of primary packaging per galenic form including device [16]

Galenic form	Potential primary packaging	
Liquid	- Aerosols - Bulbs - Bottlepacks - Soft capsules - Capsules	- Bottles - Nebulizers - pockets - Syringes
Semi solid	- Aluminum tube - Plastic tube - Jar	- Patch - Gauze - Blisters
Solid	- Blister pack	- Roller
	- Strip - Aluminum pillbox - Box - Inhaler	- Bulk - Bottle - Big bag
Injectable	- Bottle - Bulb - Pre-filled syringe - Soft pocket	- Infusion bottle - Injectable ampoule - Pen

Even for the same packaging form, the process may differ depending on the formulation. For example, a blister for tablets may not have the same energy consumption than a blister for pre-filled syringe.

The safety of the patient is a key mantra within the pharmaceutical sector. The packaging processes and related consumptions are directly linked to this concern, to ensure the quality of the product all along its distribution and storage phases.

Table 5 - Example of potential environmental concern for the primary packaging

Potential environmental concern [5]	• Packaging stage Consumptions of energy, water Emissions of waste & wastewater, Green House gases • Packaging end of life stage Incineration of product, unused medicine disposed unproperly, pharmaceutical residue in environment

2) Devices

There are several definitions of medical devices. In general, it can be defined as *"A contrivance designed and manufactured for use in healthcare, and not solely medicinal or nutritional »*. [17].

A segmentation can be identified by use, which implies specifics related regulations.

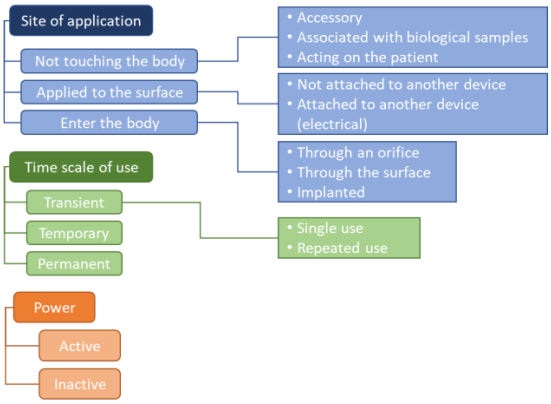


Figure 3 - Classification of medical devices based on the site of application, the time scale of use, and whether it is electrically powered [17]

Table 6 - Example of potential environmental concern for the devices

Potential environmental concern [5]	• Packaging stage Consumptions of energy, water Emissions of waste & wastewater, Green House gases • Device end of life stage Incineration or landfill of product, unused medicine disposed unproperly, pharmaceutical residue in environment

3) Secondary & tertiary

With a protection role, the secondary packaging is used around the primary. It also has the purpose to identify and give information to the patient [14]. The tertiary packaging is usually the one used for the transportation.

The processes of secondary and tertiary packaging within the pharmaceutical industry are quite similar with the other sectors.

Table 7 - Example of potential environmental concern for the galenic formulation

Potential environmental concern [5]	• Packaging stage Consumptions of energy, water Emissions of waste & wastewater, Green House gases • Medicine end of life stage Incineration of product instead of recycling, unused medicine disposed unproperly, pharmaceutical residue in environment

All these parameters described previously have impacts in terms of sourcing materials, manufacturing, distribution or at the level of the patient for both use phase and end of life [18]. To answer these concerns and the Sustainable Development Goal number 12 (Ensure Sustainable consumption and production patterns) [2], ecodesign is a relevant approach to implement during design phases such as Research and Development (R&D) before the market authorization induces to freeze the parameters of the product.

IV. USAGE POINT OF VIEW

We have previously seen some specificities in terms of product. In this part, we aim to highlight few considerations to take regarding the use of it. The purpose of this part is not to define classifications such as the therapeutic one from WHO [19] but rather highlight some different usage point of views regarding medicine.

A. Essential medicine

The definition of essential medicine is set by the World Health Organization (WHO) like below.

"Essential medicines are those that satisfy the priority health care needs of the population. They are selected with due regard to public health relevance, evidence on efficacy and safety, and comparative cost-effectiveness" [20]

A list is available and updated every 2 years by the WHO. From 208 in 1977, the list was up to 460 in 2019.

The purpose of this list is to define the *"minimum medicine needs for a basic health-care system"*. It includes curative, preventive, palliative and diagnostics products with a high range of medicine from cancer treatments to antibiotics [21].

B. Other

Another way to consider medicine is to split them between the ones who requires a prescription order and the others who does not, also called Over the Counter (OTC).

1) Prescription

There is a high diversity of medicine under this wording. We can consider products for chronic/non-chronic disease, the life savings drugs, vaccines, etc.

The common point of such product is that they are prescribed by a healthcare professional to patient. The choice of product is therefore not in the hand of the patient. The prescription decision is an act of doctors based on multiple criteria. The selection process is also highly regulated by healthcare insurances.

Elements such as the drug information availability, the medical representatives' effectiveness, the patient expectations or the collaboration between pharmacist and physician seems to have an influence on this decision making [22]. Even if some physicians are willing to integrate more environmental parameter in their prescription act, they do not seem to have the environmental knowledge to integrate such issues [23].

2) Over the counter

The OTC products do not require a prescription. Main particularity, and unlike prescribed medicine, advertising is allowed for such products [24]. The OTC are in fact consumer driven and branding have a big impact in the market share [25]. In other words, the patient has a strong decision power in the choice of such products who may lead to an over consumption [26].

Depending on the API, they may have PIE issues, like prescribed medicines [10].

The main driver of a medicine, in every case, is therefore related to the health benefit for the patient.

V. SOCIETAL IMPLICATIONS

A. Environmental perspective

Like all manufacture activity, the pharmaceutical industry should integrate the SDG number 12 to fulfilled completely their CSR duties. Non exhaustively speaking, the development of functionality economy business model, the reduce of virgin

raw materials or even modular design to foster the re-use and reparation are concrete examples who feed this SDG.
In a Life Cycle perspective and depending of the value chain of the company, the steps can be segmented under its control or its influence perimeter.

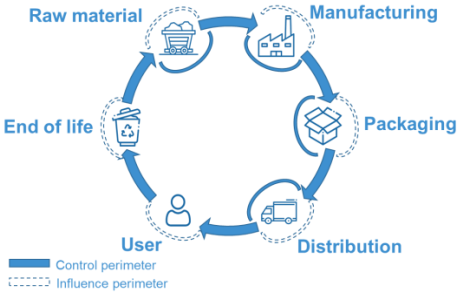


Figure 4 - Perimeter of control or influence of a pharmaceutical company within the Life Cycle of product

We saw in the previous paragraph that medicine have a specific issue with PIE. This concern can be found on the manufacturing part (e.g. wastewater), at patient level (e.g. excretion) and at end of life (e.g. unused medicine).

B. Ethics and health perspective

Basically, a medicine product is one of the answers for the SDG number 3, "Ensure healthy lives and promote well-being for all at all ages". In other words, the Corporate Social Responsibility (CSR) is part of the DNA of a pharmaceutical industry.
One of the well-known societal challenge, part of this SDG, of the pharmaceutical sector, is to make medicines available [27] and affordable [28]. All medicine product is indeed a long journey in terms of R&D. This process can take 15 years [29] with a growing cost around 2,4 billion $ [30]. This aspect shows the ethical and economic dilemmas that face the pharmaceutical industry.
In France, a system called Service Medical Rendu (SMR) assess the benefits of a medicine product through several criteria [31]. For instance, it considers the comfort of the patient. In other words, if an easier administration way for a medicine is developed, it will increase the SMR ranking.

VI. Conclusion & perspectives

Ecodesign is a recognized approach to integrate environmental parameters into product design to reduce the environmental footprint throughout its whole life cycle. Due to its structure and purpose, medicine have specific impacts related to their API. This article aims to explain high level aspects of such product, with their potential environmental concern and different patient usage point of views. With these, some societal implications are highlighted to show the complexity of an Ecodesign approach for medicine products.
To produce a medicine product, many pathways are possible, from the API production, to the formulation, and the packaging. Many other aspects, not mentioned in this article, may lead to an increasement of the environmental impacts such as the distribution mode, the way of consumptions, or the materials sourcing. It is part of the CSR of companies to consider the environmental issues. One of the singularities of the pharmaceutical sector is to make available medicine without degrading the environment. This sector has therefore the duty to consider both the health of patient and earth.
The COVID-19 is a good example of the complexity to consider the environment into the design of product. The pandemic situation is indeed a witness of the duality of the pharmaceutical sector. The development, the production and the availability of vaccines are considered as a top priority. Despite the extreme condition of stability of the BNT162b2 vaccine from Pfizer-BioNTech, most of countries have deployed adapted supply chain to answer this worldwide crisis. It shows several limits and constraints of the consideration of environment in medicine. The main limit is that the benefits to health will always be the main driver for such products. The stability of this vaccine is ensured under low temperatures and the supply chain conditions (e.g.: packaging, cooling system of transportation to secure the cold chain) will depend on the climate condition of the country. In other words, Ecodesign should also be considered with the local perspective. This aspect is reinforced within medicine products through the specific regulations by countries, who are not developed during this paper.
Nevertheless, it does not mean that ecodesign should be avoided within the pharmaceutical sector. Quite the contrary, due to the strong regulation who guarantee the safety of the product, changes who lead to a modification in the market authorization, after the submission, are unusual in medicine. Therefore, Ecodesign should be fully integrated in the R&D to make the best compromise at the beginning. To reach a systemic and holistic Ecodesign approach, it seems necessary to foster the research on several levels.
The first one is the meso level, by considering and setting the framework of the Ecodesigners of the pharmaceutical industry, within its New Product Development process (NPD). It should include both when, within this NPD, decision making set impact on the Life Cycle of medicine (e.g.: the choice of galenic form will set some impact on the Use phase, linked to the administration way); and also the type of support relevant regarding the step of the development (such as qualitative or quantitative data).
This last element leads to the second research perspective who aims to develop tools to support these Ecodesigners. Considered as the best tool to assess the environmental profile of product, the Life Cycle Assessment is not fully embedded by Pharmaceuticals companies. This sector lack of maturity regarding this methodology and some harmonization through Products Category Rules (PCR) should be explored. In fact, few PCRs are available, but they do not cover all pathways of medicine products.
Finally, another aspect to explore is the development of a scoring system, to rationalize the societal benefits of a medicine (e.g. health benefits for the patient) versus its environmental footprint. This part concerns the sensibilization of patients, healthcare professionals or even deciders and

buyers (e.g.: Government, Health insurances). In fact, the level of understanding of environmental issues may vary between each group. In order to create intelligible messages, it seems interesting to look at this communication piece.

VII. References

[1] Environment, U. N. 21 "Issues for the 21st century: results of the UNEP foresight process on emerging environmental issues" http://www.unep.org/resources/report/21-issues-21st-century-results-unep-foresight-process-emerging-environmental (accessed Feb 16, 2021).

[2] U.N. "LES 17 OBJECTIFS | Sustainable Development" https://sdgs.un.org/fr/goals (accessed Feb 16, 2021).

[3] Snyder, H. "Literature Review as a Research Methodology: An Overview and Guidelines". Journal of Business Research 2019, 104, 333–339.

[4] Sanofi. "Drug development - Key steps and challenges R&D France Communications". 2019 mai.

[5] TU Berlin. "Product Category Rules (PCR) for Pharmaceutical Products and Processes". December 2019.

[6] EMA. "Environmental Risk Assessment of Medicinal Products for Human Use". September 17, 2018.

[7] Sanchez, W.; Sremski, W.; Piccini, B.; Palluel, O.; Maillot-Maréchal, E.; Betoulle, S.; Jaffal, A.; Aït-Aïssa, S.; Brion, F.; Thybaud, E.; Hinfray, N.; Porcher, J.-M. "Adverse Effects in Wild Fish Living Downstream from Pharmaceutical Manufacture Discharges". Environment International 2011, 37 (8), 1342–1348. https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.06.002.

[8] Cardoso, O. « Vers Une Meilleure Compréhension Des Effets Écotoxicologiques Induits Par Des Rejets Industriels Pharmaceutiques, Chez Les Poissons Sauvages Chroniquement Exposés ». These de doctorat, Reims, 2015.

[9] Carlsson, G.; Örn, S.; Larsson, D. G. J. "Effluent from Bulk Drug Production Is Toxic to Aquatic Vertebrates". Environmental Toxicology and Chemistry 2009, 28 (12), 2656–2662. https://doi.org/10.1897/08-524.1.

[10] Hester, R. E.; Harrison, R. M. "Pharmaceuticals in the Environment": Volume 41; Royal Society of Chemistry, 2016.

[11] Siegert, M.; Lehmann, A.; Emara, Y.; Finkbeiner, M. "Addressing the Use and End-of-Life Phase of Pharmaceutical Products in Life Cycle Assessment". The International Journal of Life Cycle Assessment 2020, 25. https://doi.org/10.1007/s11367-019-01722-7.

[12] Académie nationale de Pharmacie. "Médicaments et environnement"; Académie nationale de Pharmacie: France, 2019; p 59.

[13] Research, C. for B. E. and. What Are "Biologics" Questions and Answers. FDA 2019.

[14] acadpharm http://dictionnaire.acadpharm.org/w/Acadpharm:Accueil (accessed Jan 15, 2021).

[15] ANSM; HAS; Assurance maladie. "Téléchargement - Base de données publique des médicaments" http://base-donnees-publique.medicaments.gouv.fr/telechargement.php (accessed Jan 15, 2021).

[16] Collectif. "Pharmacotechnie industrielle", 3ème.; IMT: Paris, 2016. 749 p.

[17] Aronson, J. K.; Heneghan, C.; Ferner, R. E. "Medical Devices: Definition, Classification, and Regulatory Implications". Drug Saf 2020, 43 (2), 83–93.

[18] Emara, Y.; Lehmann, A.; Siegert, M.; Finkbeiner, M. "Modelling Pharmaceutical Emissions and Their Toxicity- related Impacts in Life Cycle Assessment (LCA) – A Review. Integrated Environmental Assessment and Management" 2018, 15. https://doi.org/10.1002/ieam.4100.

[19] Belaïche, A. M. "Le Système ATC - DDD Intérêt En Pharmacovigilance ».

[20] WHO | "Essential medicines" http://www.who.int/medicines/services/essmedicines_def/en/ (accessed Feb 15, 2021).

[21] WHO. WHO Model List of Essential Medicines.

[22] Ahmed, R. R.; Streimikiene, D.; Abrhám, J.; Streimikis, J.; Vveinhardt, J. "Social and Behavioral Theories and Physician's Prescription Behavior". Sustainability 2020, 12 (8), 3379. https://doi.org/10.3390/su12083379.

[23] Dupont, B.; Faure, S. "Le hazard score, un outil pour réduire l'impact environnemental des prescriptions". Actualités Pharmaceutiques 2020, 59 (594), 27–32. https://doi.org/10.1016/j.actpha.2020.01.009.

[24] Henkemans, A. Argumentative Patterns in Over-the-Counter Medicine Advertisements. Argumentation 2016, 30. https://doi.org/10.1007/s10503-015-9373-3.

[25] Suppliet, M. "Umbrella Branding in Pharmaceutical Markets". Journal of Health Economics 2020, 73, 102324. https://doi.org/10.1016/j.jhealeco.2020.102324.

[26] Sansgiry, S. S.; Bhansali, A. H.; Bapat, S. S.; Xu, Q. "Abuse of Over-the-Counter Medicines: A Pharmacist's Perspective". Integr Pharm Res Pract 2016, 6, 1–6. https://doi.org/10.2147/IPRP.S103494.

[27] Gateaux, V.; Heitz, J.-M. "L'accès aux médicaments : un défi pour l'industrie pharmaceutique". Humanisme et Entreprise 2008, n° 286 (1), 13–28.

[28] Nussbaum, A. (Sascha) K. Ethical "Corporate Social Responsibility (CSR) and the Pharmaceutical Industry: A Happy Couple?" Journal of Medical Marketing 2009, 9 (1), 67–76. https://doi.org/10.1057/jmm.2008.33.

[29] Hughes, J.; Rees, S.; Kalindjian, S.; Philpott, K. "Principles of Early Drug Discovery". Br J Pharmacol 2011, 162 (6), 1239–1249.

[30] Deloitte. "Ten Years on: Measuring the Return from Pharmaceutical Innovation 2019". 2019.

[31] HAS. "Le service médical rendu (SMR) et l'amélioration du service médical rendu (ASMR) " https://www.has-sante.fr/jcms/r_1506267/fr/le-service-medical-rendu-smr-et-l-amelioration-du-service-medical-rendu-asmr (accessed Feb 16, 2021).

Using Value Analysis and Systems Engineering for complex projects

Alexis Lalevée
CREIDD, InSyTE, University of Technology of Troyes,
12 rue Marie Curie, 10010 Troyes – France
Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, 38000 Grenoble – France
Euro Contrôle Projet (ECP) Company
13000 Aix-en-Provence - France
alexis.lalevee@utt.fr

Nadège Troussier
CREIDD, InSyTE, University of Technology of Troyes,
12 rue Marie Curie, 10010 Troyes - France
nadege.troussier@utt.fr

Éric Blanco
Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, 38000 Grenoble – France
École de l'Air BA 701 13661 Salon Air
eric.blanco@ecole-air.fr

Abstract— Value Analysis (VA) is a collaborative method that could be used to make decision-making in complex projects. System Engineering (SE) is a design method used in complex projects. In complex projects, stakeholders are multiple and carry specific technical, social and environmental expectations that define the value of the project. The aim of this paper is to demonstrate that VA and SE are two complementary approaches to collect and analyze Stakeholder' expectations in a complex project. The paper presents a literature review on VA and SE that show the complementarity of the methods to involve Stakeholders in projects. From this analysis, a case study is proposed to illustrate the complementarities of the method. The paper concludes that the two methods VA and SE can be combined to analyze and track multiple dimensions of value (as economic, social and environmental) in a complex project context.

Keywords— Complex Project; Stakeholder; System Engineering; Value Analysis

I. INTRODUCTION

Value Analysis (VA) is a well-known method able to be adapted in many contexts [1]. Due to the adaptability and a stakeholders-centered approach, VA is used to support decision-making especially in the early phases of the project when requirements and principle of solutions are defined.

For complex systems, System Engineering (SE) is today the mainstream methodology used in industry. According to [2], SE "technical processes are life cycle processes". The phase of architecting is the result of aggregation of the "stakeholder requirements definition" and the "requirements analysis". Thus, this first phase of architecting represents a conceptual level of engineering in which Stakeholders are taken into account defining the value of the project for each of them. The interrelations of stakeholders are complex and the understanding and clarification of value is difficult. This step of architecting could be a stakeholders-centered one as described by [3]. Unfortunately, group of practitioners often estimate that this step is most of the time reduced at some few exchanges. However, in complex systems projects, the value is multiple including economic, social and environmental expectations from stakeholders. The questionnaire method seems to be commonly used as revealed by the Stakeholder Value Network approach used by [4]. The consulting branch of Assystem, Euro Contrôle Projet (ECP), is specialized in project consulting and part of their work consists in supporting companies in the management of technical installations and infrastructure projects. In this context, project delivery is one of major preoccupations. Thus, two branches have to contribute to project success: the management one and the design one. In the early phase of a technical project, it seems that the two aspects have to be mixt to make a decision in order to achieve a complex project, with a dynamic point of view as shown by [5]. As highlighted by [6], it is recognized that the quality of the execution of the early project phases is critical to project performance. Yet, early project phases received limited attention in past research. Uncertainty and the influence of project stakeholders are presented as two key success factors of projects [6]. Practitioners observe that the value is often reduced to economic value and projects may lose environmental and social value that are stakeholder expectations.

With a practical approach, it seems that VA and SE could be combined not only to design a complex system but also to ensure the project delivery, with a stakeholder-centered approach. As highlighted by [7], "Systems Engineering and Value Engineering […] offer outstanding concepts to improve designers' goals". In this research work, we have made the hypothesis that VA should complement the phase of architecting to ensure the success of the project with a Stakeholder-based approach.

The aim of this paper is to understand how it is possible to combine VA and SE in order to facilitate collaboration between management and technical actors to achieve Stakeholder' expectations linked to sustainable issues, as social and ecological ones. The next section will present a literature review to compare VA and SE through their capacity to perform a deep stakeholder analysis. It enables the identification of the complementarities of the two methodologies. The third section is driving the same analysis based on the company use of VA and SE on a representative case study. Based on these two sections, authors will conclude that VA and SE are able to be used in the same project and discuss the advantages and limits of this proposal.

II. LITTERATURE REVIEW

To introduce the literature review, it should be noted that the authors are aware that there are other approaches than VA. Indeed, although the industrial context of our study leads us to specifically study the issue of considering stakeholders in a complex project. Design Thinking (DT) as described by [8], or other tools and method as Stakeholder Analysis and Social Network compared by [9] could be other approaches that should be explored and would allow us to compare our studies. It may be future works.

A. Value Analysis

Value Analysis is supported by different standards as [10], [11], used in Europe to frame its applications. Originally, VA was defined as a cost-cutting tool, allowing redesigning products more competitively [1]. That limited vision reduced the extension of applications of the concept into other levels of management. Many different works and applications had developed the concept and the methods. "We can find a tremendous number of different learning exercises and theoretical evolution from that work, but that has not yet answered many aspirations regarding the initial concept of value and value analysis. VA has evolved or is yet evolving" [1]. It shows that the method is able to be adapted to many situations. The concept of value was customer centric and became stakeholder based in the last standards evolution. [12] had shown that VA is a method able to support Sustainability value integration within early phases of a complex project.

Concerning Stakeholders approach, we can say that there exists multiple possible views due to multiple applications of the methodology. Indeed, as underlined by [13], VA uses the workshop system to produce brainstorming synergies. This collaborative work is used to support decision-making in project management. Thus, Stakeholders are involved into and throughout the project and its success is optimized. The method is based on a Function Analysis (FA) that treats functions that respond to stakeholder' requirements and systems finalities. What the system is supposed to do. However, this method is completed with another approach that treats positive or negative externalities of the system: nun-functional needs. They are treated and used to compare some solutions proposed within different scenarios. These other needs are often subjective and difficult to estimate. They are mainly based on social or environmental issues as the quality of life at work or corporate branding. All along the method, a collaborative work in group is used to permit collective intelligence and a VA leader is designated to assure good practices. Often consultancy companies play that role. In VA, Stakeholders are often managed within workshops to elicit the multiple dimensions of value of the project. The next section will discuss how SE approached the stakeholder involvement.

B. System Engineering

With a general viewpoint, "SE is a transdisciplinary approach and means to enable the realization of successful systems. Successful systems must satisfy the needs of their customers, users and other stakeholders", [2].

As evocated earlier, a phase of "architecting" is used before the main phase of design of a system.

According to the general guide [2], SE approach is guided by a stakeholder-centered approach. However, with a more detailed study, we can find that:

- Stakeholders are questioned at the beginning of the project, during the "architecting phase", according [2]Their requirements are relieved with questionnaires [14]. This research is based on a specific phase of SE study dedicated to stakeholders' requirements elicitation.
- Requirements correspond to a very technical view of Stakeholders needs: as illustrated by [2], "a systems engineer helps ensure the elements of the system fit together to accomplish the objectives of the whole, and ultimately satisfy the needs of the customers and other stakeholders who will acquire and use the system".
- A non-specific view of the context of the project is proposed: according to [14], some artefacts are researched and used.

Observations conducted us to determine some limitations of the SE view of stakeholders-centered system as the fact that involvement of Stakeholders seem to be limited by the method used. We will discuss it more precisely in the discussions section.

C. Main findings of the methods review

Our analysis is based on two dimensions 1) to list the different phases of considering stakeholders in each of the methodologies and 2) to characterize them in relation to the way in which they are involved. The next step is to compare their characteristics, presented in Table 1.

	Methods	
	Value Analysis	***System Engineering***
Objectives	To optimize a project	To design complex project

	Methods	
	Value Analysis	***System Engineering***
Stakeholders' involvement	As soon as the definition of the objectives of the project	"As early as possible"
Stakeholders' interrogation	Collective works and sometimes questionnaires	Questionnaires and interviews
Uncertainty treatment (of the project)	Operational KPIs are used to reduce uncertainty	based on risk analysis
Stakeholder influences	Is relative to workshop composition. No tracking indicator identified	There is no direct influence between theStakeholders. No tracking indicator identified
Decision-making	Based on collective works, by project decision-makers	Based on formalization of Stakeholders' needs, by system engineers
Main references	[1], [10], [13]	[2], [15], [16]

Table 1: Comparison of VA and SE approaches

Both methods highlight the importance to involve Stakeholders in the early phase of the project. Major difference comes in the way it is supported. VA imposes collective work to build a consensus, while SE is mainly based on formalization and collection of individual interrogations. VA focuses on common agreement while SE targets exhaustivity with decisions made to respond to Stakeholders' expectations according to their importance in the project.

In conclusion, the analysis emphasises that Stakeholders' management with a collective approach, it is to say VA approach seems 1) to permit to reduce the uncertainty of the project (linked to its complexity) and 2) to try to take into account some influences between project Stakeholders contrary to the SE approach, mainly based on individual relationship and choices.

In the following section, the analysis proposed is illustrated with a company practice using the illustration of the use of VA and SE on a representative case study of complex system design.

III. CASE STUDY

A. Presentation of the case study

The case presented thereafter was used to demonstrate that VA is a method able to introduce sustainability issues into project management [12]. The case used concerns the design of a transportation facility and policy between two cities A and B far from about twenty kilometres each other. The project's aim is to find some solutions to link up A to B globally more efficiently. In fact, existing small roads between A and B are overload and a highway exists near to B from North to South without any exit to lay out B. Furthermore, some residential subdivisions were built on the outskirts of both cities; a river is situated at few hundred meters of A and B South's limits, and there is a mountain to the North. These topological constraints do not let us think about an "easy" solution. A consulting company is solicited by the Government to determine what is the project (management and Stakeholders) which would design the best solution.

Value of the project is complex since it has multiple dimensions: social, political, economic and environmental. Many stakeholders are concerned by the project. Multiple solutions exist with complex links between Stakeholders and with coupled dimensions that make the complexity of it.

B. Implementation of the interface

1) A VA approach

- **Identification of Stakeholders:** to treat this case, the context is important: who are the different Stakeholders? This first step of work, identification, is made with the Government, which already knows some of them through contact established and different early studies as topographical or socioeconomic ones. However, this is an iterative process to be comprehensive and to be able to evolve. Thus, Government that funds the project is also the decision-maker. Citizens of the zone concerned are implied as all companies (and workers) that will work on the project. Many Stakeholders could be identified: in this case study, around fifteen exist. Numerous and varieties of Stakeholders are a key element: it requires analysing the Value of them concerning the project in terms perception of "cost" and "benefits". It is made through a Function Approach described below.
- **Identification of the needs and functions associated:** after having identified all Stakeholders, it is crucial to know what they really need, and to characterise it. Each Stakeholder needs are expressed through a Function Analysis approach. Linking A and B corresponds e.g. to transport people and facilitate exchanges. It corresponds respectively to cities expectations and Government's one. For each step of the life cycle, functions are characterized and ranked by "order of importance" for Stakeholders. In this case, collective work is important because it permits Stakeholders involvement. The most important function is "to transport people" that is noted with 65% of the importance of the project while "to facilitate exchanges" have 35% of Stakeholders preferences. Thus, the Government wants to improve exchanges between two cities to enable the Economic Value creation, within a given budget. Thus, the aim of the project is to perform functions within an optimized cost. Citizen's life is at stake also with traffic jams reduction, which is reported to Social Value. Objectives of reducing pollution at the same time with public transports, refers to Environmental Value. Moreover, inhabitants of both cities and peripheral ones, neighbouring ecosystems like river and mountain, have to be taken into account also. Thus, a systematic life cycle step's approach has to be performed to elicit all needs of Stakeholders at each step of the project lifecycle. In this case, several needs are identified leading to about ten functions. These functions are used to determine real needs that complex projects have to respond to. Finally, solutions and scenarios that combine multiple solutions are compared to Stakeholders needs and are evaluated.

2) A SE approach

SE is represented through a generic life cycle model (fig1 SEBoK Original). In this representation, we can see that there exist different steps, with one major, the "architecting phase" dedicated to definition of the concept and definition of the system. "The model is defined as a set of stages, within which technical and management activities are performed. The stages are terminated by decision gates where the key stakeholders decide whether to proceed into the next stage, to remain in the current stage, or to terminate or re-scope related projects". according to (INCOSE and IEEE Computer Society, 2016).

These steps are applied according (INCOSE and IEEE Computer Society 2016) on our case study: we will consider that these macro-steps are representative of all SE approaches.

- **The Concept Definition:** Government decides to invest resources in the project of linking A and B cities. The first step is determining a set of stakeholders that have interests in the engineering project: citizens, and different government administrations are concerned. Activities during this phase include the development of the concept of operations and business case; determining the key Stakeholders and their desired capabilities; negotiating the Stakeholder requirements among the key Stakeholders. Questionnaires are used to interrogate Stakeholders. Decision-makers and System Engineers lead this first phase of SE.
- **The System Definition:** this step begins when the Government, the key Stakeholder of this project, decides that the business needs and Stakeholder requirements are "well defined". It is an iterative step in which solution options are progressively detailed. It is the basis of system realization. Activities during this phase include the development of the system architectures (physical, numerical, etc.); the definition and agreement of the levels of system requirements; and the definition of the expected performances, as the number of trains per hour. The transition into the system realization stage can lead to either single-pass or multiple-pass development, led by SE engineers.
- **The System Realization:** one more time, this step begins when decision-makers, it is to say Government, decides that the project architecture and feasibility evidence are sufficiently low-risk to justify committing the resources necessary to develop and sustain the first phases of project realization.
- **The System Production, Support, and Utilization (PSU):** one more time, this step begins when decision-makers, it is to say Government, decides that the project is sufficiently low-risk level that justifies committing the resources necessary to produce, field, support, and utilize the system over its expected lifetime.
- **The System Retirement:** this step is often executed incrementally as system versions or elements become obsolete or are no longer economical to support and therefore undergo disposal or recycling of their content. Increasingly affordable considerations make system re-purposing an attractive alternative: maintenance and internal processes are deployed to assure the quality of services and expected performances regarding clients, it is to say A and B's citizens that have to travel between these cities.

To conclude, we have seen that each step of SE consists of iterations and adjustments, it is to say that SE takes into account an internal form of dynamism. However, this dynamism is not directly linked to the Stakeholders: they are interrogated through questionnaires only one time, at the beginning of the project and system engineers are in charge of creating and implementing the project, based on one vision at a precise moment of Stakeholders of the project. We can also notice that decision-makers have power: they are informed and involved in all steps of the project while other Stakeholders are not.

C. Preliminary conclusions about VA and SE

In this section, we will present what are complementarities and major differences between the two methods, Value Analysis and System Engineering.

1) A VA/SE comparison

The Table 2 offers the same comparison as that made with the literature review, but this time adopting the point of view of the case study:

	Methods	
	Value Analysis	***System Engineering***
Objectives	To optimize a project with Stakeholders' involvement	To design complex project
Stakeholders' involvement	As soon as the definition of the objectives of the project	As soon as a technical architecture is defined
Stakeholders' interrogation	Collective works	Individual questionnaires
Uncertainty treatment (of the project)	To compare solutions, Stakeholders are contributors: they define requirements, risks and opportunities with their own experiences, in the workshop	Solutions are over-provisioned to take into account risks, based on system engineer experience
Stakeholder influences	VA leader try to limit the phenomenon (with group management)	External influences exist on system engineer
Decision-making	Based on the collective works by decision-makers	Based on individual Stakeholder needs, by system engineer
Main references	[1] and internal company sources	[2] and internal company sources

Table 2: Comparison of VA and SE approaches

We can remark that, with a practical approach, the major difference is the fact that VA uses collective work, while SE uses individual interrogations with decisions made to respond to Stakeholders' expectations. On one hand, the collective approach permits to have a systemic view of the project and permits to treat some uncertainties, to have a constructed support to decision-making; it is to say a methodology used to permit Stakeholders' involvement to assure project success. On the other hand, we have SE that permits to design complex

systems within a complex technical framework while decisions are mainly based on questionnaires and reduce exchanges between designer and Stakeholders. Formalization of stakeholder expectations is a valuable input.

2) Conclusions

In this comparison, VA and SE approaches of Stakeholders appear to be complementary. Indeed, if VA approaches lead practitioners to have Stakeholders involvement on the project and the possibility to make decisions, SE advantages seem to be linked to the fluidity to make decisions (only one Stakeholder in our case study) and many iterations are made all along the project lifecycle. It has to be noted that SE treats the ideation concept to dismantling one, while VA is mainly used in early phases of the project with a macro-vision of the project. As described by [7], system engineering and value engineering communities should "explore and experiment together" to "improve designers' goals" to improve Stakeholders' involvement on projects through a systemic approach of their requirements.

IV. DISCUSSIONS

Firstly, we showed that VA is a method able to be adapted in all contexts and is well adapted to make decisions based on Stakeholders, in the context of complex projects. Moreover, Stakeholders are involved all along the project with a collective approach in VA. Thus, project success is facilitated with decisions made as soon as conceptual phases of the project. Secondly, it has been highlighted that SE is a method able to design complex projects. Stakeholders' needs are treated, through questionnaires and interviews, by system engineers that are in charge to design these systems.

Thus, in this section, we will discuss in one hand differences between theoretical approaches and practical ones for each method and in other hand the interest to implement SE approaches with AV ones, to involve Stakeholders on projects of system design.

A. The architecting approach vs VA approach

In this part, we will compare the two approaches of Stakeholders. Indeed, it has been seen that within a theoretical framework, Stakeholders seem to be more involved with a VA approach than a SE one. VA uses group works while SE uses mainly individual approaches, based on questionnaires and interviews. Exchanges permit not only collective intelligence through exchanges made during phases of the project but also an involvement of Stakeholders with a VA approach. SE advantages are linked to decision-making: it is quicker due to the fact that system engineers make decisions based on Stakeholders requirement and that they make trade-offs to obtain coherent systems.

With a more applicative approach, it has been seen that Stakeholders take an important part of VA approach: they are interrogated through groups of work all along the project. With ECP's experience, we can add that they are crucial elements of a project success. This element is comforted by [6]. Thus, authors can make the hypothesis that another system of Stakeholders' involvement on a SE framework should improve success of projects.

Thus, we could think that SE and VA approaches of Stakeholders should be implemented to a better involvement of Stakeholders all along a complex project. It is what is discussed in the next paragraph.

B. The interest of an integrated approach of Stakeholders

In this section, we will highlight the interest of having a systemic and integrated approach of Stakeholders. Indeed, as evocated earlier, they are key elements of the success of a project. As highlighted by [2]: "Understanding the needs of all stakeholders inside and outside the company" take part of major activities of a SE approach. We have seen above that VA and SE approaches are complementary to involve Stakeholders in a complex project but we have to show what are key elements to support a "mixed" method. In fact, if they seem to be complementary, both methods have particularities as the method to interrogate Stakeholders. What has to be determined in future works is the manner to use together the two methods to obtain a global method able to take into account and integrate Stakeholders and all their requirements all along a complex project.

VA seems to be a method capable of integrating Stakeholders during early phases of the project and continuing interrogating them all along the project. Moreover, the approach permits a Stakeholders involvement and decision-making that is not only based on technical aspects. It is why VA is complementary to SE that is based on Stakeholders needs and treated mainly by system engineers with a technical approach. This aspect of the complementarity is reinforced by [7]: in fact, their works show that SE have to optimise Stakeholders' perceived value of a system and show that VA could be a tool of SE. However, some limits are determined in the manner to implement a mixed method: we will discuss this aspect hereafter.

C. VA approach to complement SE: preliminary conclusions

We have demonstrated all along this article that Stakeholder approaches of VA are more global than SE ones to involve them into a project. Thus, authors make the hypothesis that VA should be a complement to the architecting phase of SE to fill the gap of Stakeholders involvement into projects, which lead to uncertainty and project failures sometimes. As underlined by [7] in his works about opportunities of using VA in SE, VA "workshop offers a playground where functional analysis, requirements analysis, requirements validation and the value definition of the system are coupled together and offer a quick acceleration and focus in the system development process". This theoretical hypothesis has some limits as to how to link these two methods with a real application and what should be the language to communicate between the two design phases. These questions raised questions seem to be not treated in the literature review nor with the industrial approach.

V. CONCLUSIONS AND FUTURE WORKS

We have seen that VA is a flexible method able to integrate sustainable issues expressed by Stakeholders. These types of requirements are able to complete the FA that helps

practitioners to respond to the technical need. This "technical" need is also treated by SE, with system engineers dedicated. Moreover, with a VA, it is possible to take into account Stakeholders as soon as the early phase of a complex project and keep them involved during the project. Contrary to SE that treats Stakeholders with questionnaires in the beginning of a design project, VA treats them with a collaborative work as soon as early steps of the project: from the conceptual phase. The interest of VA before SE is a better integration of Stakeholders and what they globally want, not expressed by functionalities, as sustainable dimensions that are non-functional requirements, in early phase of the project that is to say in a phase in which decisions are important and few investments. The work of [7] comes to show, with an SE approach, that our work has not only an industrial interest but also a theoretical one.

Limits of this research firstly based on our approach: it is centred on Value Analysis, our entry point from industrial observations. Other approaches to involve Stakeholders could be explored and compared to this approach in future work, such as Design Thinking for example, studied by [8]. Thus, we could undertake to make a comparative study between these two approaches that it is a very theoretical approach of interfaces possible between both methods. Future research works have to be done to validate presented hypotheses and to know how it is possible to apply together the two methods: communication and capacity to integrate each other's indicators have to be worked and validated. To integrate VA in a SE framework could be a support to improve socio-technical systems design as described by [17].

VI. REFERENCES

[1] M. T. Fernandes, "Value Analysis: Going into a further dimension," *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 5, no. 2, pp. 781–789, 2015.

[2] INCOSE and IEEE Computer Society, *Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK)*, no. version 2.2. 2016.

[3] E. Rechtin, M. Maier, and M. W. Maier, *The Art of Systems Architecting - Second edition*, vol. 20001178. 2000.

[4] B. M. Pereira, L. A. dos Santos Senna, and L. A. Lindau, "Stakeholder Value Network: Modeling key relationships for advancing towards high quality bus transit systems," *Res. Transp. Econ.*, vol. 69, pp. 386–393, 2018.

[5] J. M. Lyneis, K. G. Cooper, and S. A. Els, "Strategic management of complex projects: A case study using system dynamics," *Syst. Dyn. Rev.*, vol. 17, no. 3, pp. 237–260, 2001.

[6] B. J. Kolltveit and K. Grønhaug, "The importance of the early phase: The case of construction and building projects," *Int. J. Proj. Manag.*, vol. 22, no. 7, pp. 545–551, 2004.

[7] R. de Graaf, G. van der Linde, H. de Jong, and B. Vogt, "Value Engineering as a Specialty for Systems Engineering: Exploring Opportunities," *Insight*, vol. 22, no. 1, pp. 41–44, 2019.

[8] J. Batista, A. Hassan, and E. Bonjour, "Design Thinking to enhance Requierements Analysis in Systems Engineering," in *International Design Conference*, 2020, pp. 2255–2264.

[9] M. Real, I. Lizarralde, B. Tyl, J. Legardeur, and D. Millet, "Exploring Stakeholder-Centred tools to improve the maturationof the Front-End of Eco-Innovation Process (FEEI)," in *International Design Conference*, 2014, pp. 1671–1682.

[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. Lalevée, 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] P. Bowen, K. Cattell, P. Edwards, and I. Jay, "Value management practice by South African quantity surveyors," *Facilities*, vol. 28, no. 1, pp. 46–63, 2010.

[14] S. Malviya, M. Vierhauser, J. Cleland-Huang, and S. Ghaisas, "What Questions do Requirements Engineers Ask?," *Proc. - 2017 IEEE 25th Int. Requir. Eng. Conf. RE 2017*, no. September, pp. 100–109, 2017.

[15] A. Pyster *et al.*, "Exploring the relationship between systems engineering and software engineering," in *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 44, pp. 708–717.

[16] ISO/IEC/IEEE 15288:2015, "Systems engineering--- System life cycle processes," *Int. Organ. Stand. Geneva, Switz.*, 2015.

[17] G. Baxter and I. Sommerville, "Socio-technical systems: From design methods to systems engineering," *Interact. Comput.*, vol. 23, no. 1, pp. 4–17, 2011.

Sustainable Value forms

Insights from a Sustainable Business Model serving a poor context.

Eduardo MÉNDEZ-LEÓN [1]
Université de Technologie de Troyes, ICD (CREIDD).
12 rue Marie Curie, CS 42060-10004 Troyes Cedex, France.
eduardo.mendez_leon@utt.fr

Tatiana REYES [1]
tatiana.reyes_carrillo@utt.fr

René DÍAZ-PICHARDO [2]
South Champagne Business School.
217 Avenue Pierre Brossolette, Troyes, France
renediazp@hotmail.com

***Abstract*— Sustainable business models are promising strategies to combat environmental, social, and economic depletion. They produce several benefits from systemic relationships among multiple actors, however; they explicitly consider the environment and society as main stakeholders. Currently, research is focused on reveal how sustainable business models create sustainable values but not much has been said about the typologies of values produced. Conducting a case study methodology, we studied a venture serving poor people living in an environmental exhausted context. As a result, we found that the sustainable model produces forms of value that can extend the conventional sustainable value frameworks discussed in the literature. We believe our results show sustainable value facets not portrayed so far.**

***Keywords*— Sustainable Value forms; Sustainable Business Model; Base of the Pyramid.**

I. INTRODUCTION

Over the years, our society has experienced several societal, environmental, and economic problems that are transforming the way how we produce, consume, and even how we interact with each other. Some authors argue that contemporary problems could be related to capitalism [1]. However, sudden changes on a global scale have also contributed to. Recently, a health crisis has allowed us to re-think our position in nature but ironically it has also produced irreversible environmental, societal, and economic damages.

By developing technologies, several problems have been addressed. However, it is important to admit that some of those solutions are not oriented to meet basic needs. The development of automatic systems has nothing to do about energy poverty experienced in developed countries. Some societal sectors have different necessities; therefore, we must not assume that technologies are the key for all contexts nor introduce them in societies considering they have the same necessities. In this sense, technical solutions seem to be not enough. Additional social, cultural, or strategic aspects are crucial to delivering suitable solutions for different contexts. The population at the Base of the Pyramid (BoP) is one of them. Authors argue that they require solutions… "that reduce or eliminate harmful pollution and ecosystem degradation…while simultaneously supporting human capabilities and functioning and the attainment of basic human rights" [2].

In that regard, Sustainable Business Models (SBMs) are strategic tools that encompass not only technical solutions but also resources, strategies, and social aspects connected to companies for benefits generation [3]. As an innovative version of traditional models, SBMs are attractive for organizations with a BoP focus because they can transform a neoclassical model towards social and environmental priorities [4]. By definition SBMs "…seek to go beyond delivering economic value and include a consideration of other forms of value for a broader range of stakeholders" [5]. In the context of the BoP, SBMs can generate other forms of value for poor people, non-profit organizations, or society at large [6].

Since business models summarize the value proposed, created, delivered, and captured by an organizational unit, some authors state that the business model and the value have an inherent link [7,8]. Usually, positive results produced by SBMs are known as a sustainable value, a broad notion of value referring to the group of benefits that… "in the context of sustainability, does not only include monetary profit but also includes social and environmental aspects" [9].

Recent studies explore and demonstrate how different SBM archetypes generate the sustainable value [10–13], some other describes hypothetical sustainable values forms that can be produced by business models [11,14] and just a few analyze empirical evidence about how the sustainable value is created in the context of poverty [12,15]. However, no paper extending the sustainable value forms from an empirical approach in the BoP has been found. We cover this gap by examining a case study, an SBM that tackles water supply issues of the BoP population from Mexico City. Therefore, by employing interviews' content analysis this paper answers the following research question: *What are the sustainable value forms produced by an SBM for the BoP?*

*W*e found that this SBM is structured with several stakeholders and their complex exchanges are producing several forms of environmental, social, and economic advantages at different phases within the sustainable value creation. From those results, we produce a new sustainable value framework (forms of value) by integrating values in the conceptual models proposed by Evans et al. [14] and Laukkanen and Tura [11]. We believe our results represent different sustainable value facets that, manifested in our case

study, can contribute to describing what is sustainable value in no conventional business models.

After the introduction, the paper is organized as follows: Section 2 shows the theoretical background. Section 3 details the method. Section 4 presents our results. Finally, Section 5 presents a brief discussion and conclusions of our research.

II. THEORETICAL BACKGROUND

A. Sustainable Business Model at the BoP.

By introducing solutions for the BoP in the market economy, companies are simultaneously mitigating poverty and creating economic values (profits) [16]. However, attending the BoP is not a simple task because the BoP often is a complex context with financial, infrastructural, or legal problems [17]. To configure business models for the BoP implies the integration of several stakeholders in order to collectively create value.

Few studies have analyzed how traditional and innovative models fulfill the need of the BoP and their multiple stakeholders. From the traditional point of view, Angot and Plé [18] highlight that some value propositions for the BoP are traditionally based on adaptations which include: (i) lowering the product quantity (packaging modifications); (ii) tailoring offerings to low incomes and (iii) adapting consumption modes (renting vs owning). Much evidence shows that these "basic" strategies contribute to the well-being of the poor [19], although new ways to propose, create and capture the value from the BoP context suggest that value can be maximized and reach other actors involved in the business system and not only stay at the company-customer level.

Those businesses are known as Sustainable Business Models for the BoP. Basically, they have a focus on a long-run profit maximization or no interest in profit generation since they pursue to redesign business activities for society and the environment [20]. Business Models at the BoP are able to increase its native pull capability, that is to say; being able to get knowledge from the context and produce sustainable benefits at the same time. For example, Ausrød et al. [15] show that by providing electricity, a business model can learn from the BoP and simultaneously offer cheaper and better-quality products, employ local and natural resources from the local supply chain, use a non-scalable rational but a learn-from-customer logic, increase customer acceptance, get BoP workforce and expand the value proposition to a broader community.

In another sense, Angeli and Jaiswal [21] emphasize that some activities of business models serving the BoP can create win-win scenarios for the involved stakeholder. In the analysis of six health care businesses, they discover that eight strategies of the focal company (e.g., community engagement, the involvement of customers, medical technology innovation, strategic partnerships) could enhance the value that is captured by providers, suppliers, distributors, alliance members, and other value chain partners.

By answering the question of what sort of values are delivered to the stakeholder of 55 business models for the BoP, Dembek et al. [6] indicate that "delivering models" tackle single needs of BoP communities, "sourcing models" meet specific needs of BoP population, and "reorganizing models" aim to generate collective wellbeing for the poor. According to the authors, these models have the potential to be sustainable but that depends on how the value creation mechanism affects the stakeholders and to what extent they get benefits from it.

Within the energy sector, one study also demonstrates the shared and sustainable value created by companies. From 33 energy companies, the research exhibit that almost all the organizations produce benefits related to (i) the basic need of the poor (cooking, lighting, and electricity); (ii) incorporate the poor in the model (as an employee, producer, builder or entrepreneur) and (iii) environmental benefits generations (emission reduction, resource usage reduction, and ecosystem sustaining) [22].

Finally, another example is found in the water sector. A private venture testifies that its sustainable business model has increased its level of business innovation and its sustainable potential compared to the traditional water industry. Moreover, the BoP consumer is enjoying safe and affordable water, the providers and manufacturers of the model increase its profits and the environment is benefited by the changes in the consumer behavior concerning bottled water consumption [12].

These studies represent examples of how systemic benefits can be produced by sustainable models and also corroborate the current interest in illustrating it. To do that, we have noticed that several "frameworks" have been employed by academics. In the next section then, we briefly discuss two types of frameworks and explain how their approaches can contribute to a sustainable value analysis for this case study.

B. Sustainable Business model frameworks

Sustainable value is a relatively new concept that emerged in 2003 with the work of Hart and Milstein [1]. The concept has been studied from different perspectives and domains. Over the years, the sustainable value concept has been embedded mostly in the business domain. However, a recent literature review, reveals that it is extensively used in the specific SBM area, and is playing an important role as a framework [23].

Sustainable value can be considered as an ambiguous term because it is often quoted as a benefit in a "very broad sense, to mean everything good, long-lasting, profitable, low-risk, neutral, or positive, connected with society and/or the environment" [23]. Thus, it is expected that its frameworks share the same fate in terms of what aspect of sustainable value they represent. In that regard, we notice that there are two sorts of frameworks and they deal with two different value nuances.

On the one hand, we observe that sustainable value in SBMs is compared to the value in traditional business models, that is to say; sustainable value is treated as a business process involving resources, strategies, and funds for value generation. In that regard, after a previous and comprehensive review, we corroborated that an integrative value-based framework [24] is shaping the way how the value is studied in sustainability. Therefore, we interpret that most of the sustainable value analysis are actually dealing with a sustainable value creation process which can be described as a process of activities that

generates benefits or advantages, performed by a focal company and several stakeholders since they participate actively in the exchange activities coordinated by the focal firm [25].

On the other hand, we distinguish that different forms of sustainable value produced by business models lie on conceptual frameworks [6]. Using a basic template of three pillars of sustainability, academics have theoretically contributed to list positive impacts from businesses [11,14]. Overall, we conceptualize value forms as the environmental, social, or economic facets of value that are generated by business models. In a nutshell, the value forms framework helps to understand what type of values are produced instead of how sustainable value is created by companies. In this paper, we mainly study this sustainable value nuance.

III. Methodology

A. Case Study Methodology

To explore the sustainable value in an SMB for the Base of the Pyramid, we selected the qualitative research approach, that rooted in rich descriptions of real-life situations, is claimed to help investigators in the understanding of complex situations [26]. Among several ways to conduct qualitative research, Case Study contributes to solving "how" and "what" questions to generate knowledge. Although we followed the general clauses of Yin [26] for Case Study research, we specifically keep close to Eisenhardt's [27] approach for case studies. Interviews were the main source of qualitative data, however secondary sources as company reports were also analyzed.

B. Case Study selection.

Our selection followed theoretical sampling reasons, in other words, the case was selected considering we aimed to extend the theoretical sustainable value forms previously defined in frameworks. The single case examined in this paper was chosen because of the expectations to be an "extreme" case, that one with the richness to reveal alternative explanations of sustainable value and eventually new theoretical forms [26]. Our expectations were based on two aspects of the SBM.

On the one hand, we previously analyzed a group of SBMs in Mexico reaching the BoP population. Among them, we noticed that the selected case has several stakeholders' interactions; a characteristic stated as crucial to extend the understanding of sustainable value in SBMs [8]. On the other hand, expectations were also based on the supposed values it generates. Several sources of information (publications, videos, reports, etc.) showed several social, environmental, and economic benefits created not only for the BoP but also for the environment. In this way, we believe our selection process partially agreed with the criteria other authors followed to select single cases to study value [12].

C. Data analysis.

Content Analysis, a method of codifying texts into various categories, was selected to analyze data. We selected it due to its versatility to either test theoretical issues or provide new knowledge to improve the understanding of data. We followed the process of Bengtsson [28]. The analysis process was conducted using the software MAXQDA which was useful to manage the variety of data.

We simultaneously conducted two analyses about the SBM: the sustainable value creation process and forms generated by it. To do that, an iterative process between deductive and open analysis was performed. Through deductive analysis, we coded data using the previous frameworks to verify the correspondence of theoretical dimensions (*activities* in the SBMs and *value forms*). In the open analysis, notes and headings were assigned to data associated with *activities* and *value forms* but not related to the conceptual frameworks. 256 codes were finally assigned to 8 interviews and 15 secondary documents.

Codes were used to create categories, however, during open analysis, they were freely created by employing the manifest content of data [29]. Finally, meanings, relations, and explanations were reached by inductively interpret patterns in summary tables created to show the content of codes and categories [30].

IV. Results

A. Isla Urbana Case Study.

Isla Urbana (IU) is a hybrid company that supplies water to BoP communities by installing Rainwater Harvesting Systems (RWHS) in households. IU can be considered as an SBM fitting with the "repurpose for society and environment" archetype [20] because profits maximization is not a priority. IU tries to mitigate the overexploitation of the aquifers and provide water to the BoP population with an inefficient provision. Although the model is extending to other Mexican territories, it is mainly focused on environmental advantages for Mexico City and social benefits for its BoP population.

The components of the RWHS depend on the structural characteristics of households. Basically, the system harvests the rainwater that drops on the households' roofs. The water is transported through pipes towards a cistern. Water is transported from the cistern to the serving device through pipes once is filtered by several filters. The final product (water) provided by Isla Urbana met the drinking water standards for Mexican territory.

IU attends the BoP population through an SBM funded by the local government. The SBM involves several stakeholders, among them the BoP is the beneficiary and the government the client. During 2019, this SBM installed 10,126 RWHSs providing water for 60,000 beneficiaries in the valley of Mexico (islaurbana.org). Behind the main device (Tlaloque), several services are included in the SBMs such as tailored installations, training, supervision, and repair of the RWHS.

B. How the sustainable value is created by Isla Urbana?

To analyze sustainable value creation, we use the three-components business model framework of Richardson [24]. However, we considered its most recent version which includes additional elements that are supposed to well explain the sustainable implication of business models [20,31]. One variation was also considered for this version, we position the "activities" in the center of the sustainable value analysis instead of keeping them as an element of "value creation

component" since we consider they are the lowest and most important level of value analysis for business models. A summary of the value proposition, value creation and delivery, and value capture of IU is shown in Figure 1.

Value Proposition.	Value Creation and Delivery.	Value Capture.
-Water Provision for the BoP by installing RWHS in households. - A high rate of adoption which increases the attraction of funders.	Integrating several stakeholders for community intervention (mostly the BoP), this SBM increase the environmental awareness of the BoP while potentialize several social benefits for the system.	-Transforming the family water situation in the BoP. -Capturing several social and environmental benefits for the stakeholders.

Figure 1. IU's SBM.

C. *Stakeholders and activities.*

The SBM of IU is structured with several stakeholders. Some of them have a strong influence on the logic of how IU generates value for BoP people, however, the activities other actors perform could not be relevant from an economic point of view. To identify the different value forms, it was essential to thoroughly examine who are the main actors and what activities are executed by them.

We use basic principles to recognize stakeholders: (i) those who create or capture value; (ii) those who assume risks (inside or outside the firm) and (iii) those who suffer the impacts of the firm´s externalities [32]. However, the recognition process also implied understanding what value for them is, that is to say; what they are seeking from an exchange with any business model actor.

In that regard, we stated that sustainable value is a broad concept. Thus, "sustainable value for stakeholders" meant more than economic benefits or advantages that stakeholders need. As a result, we found thirteen stakeholders involved in IU's business model. Table 1 shows their role in the SBMs.

Stakeholder	Main role
1.Focal company	Manager of the SBM
2. BoP beneficiary	Recipient of the RWHS and IU training
3. BoP community	Recipient of IU training
4. RWHS installers (BoP)	Installer of the RWHS
5. Suppliers	Provider of plastic devices
6. Government	Financial sponsor
7. CI stakeholders	Cultural partners for IU training (CI: community intervention).
8. Environment	Environmental value recipient
9. Academics	Information and data producer
10. Society	Social value recipient
11. Co-workers	Employees of the focal company
12. BoP community leaders	Communication agents
13. Education Department	Training manager and designer

Table 1. STAKEHOLDERS OF THE IU'S SBM.

The second factor in value forms identification was to pick out the activities performed by these stakeholders. As value, sustainable value is produced by exchanges [33]. Therefore, even if we identify many unilateral activities producing values for the BoP (one single stakeholder), we paid special attention to those performed among stakeholders. The scope of this paper is not scrutinizing them, nevertheless; Figure 2 shows how many activities are performed by each stakeholder. In summary, we observed that stakeholders from the BoP are together performing almost the same number of activities that the focal company (IU). That reveals the importance of the BoP in the value creation process of this SBM.

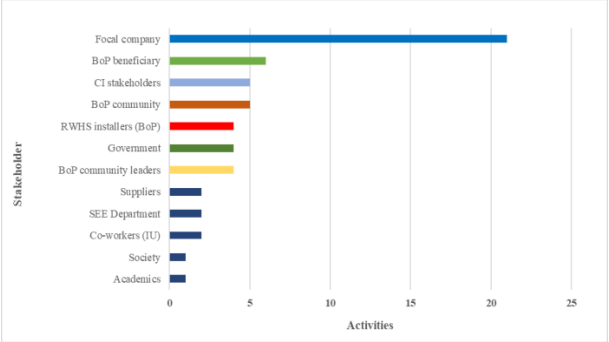


Figure 2. STAKEHOLDERS AND ACTIVITIES IN IU'S SBM.

D. *Value forms produced by IU.*

Inspired by other frameworks, this paper was focused on listing sustainable value forms from IU's business model. Our framework uses the three pillars of sustainability but also integrates the value forms produced in the context of BoP into predefined subcategories. In this regard, Laukkanen and Tura [11]'s subcategories were used as a foundation of our analysis because it comprises the value forms enunciated by Evans et al. [14]'s framework and some of those created by the IU model. Additionally, subcategories in which no values could be placed were removed to obtain a clear outlook of real values from the case study.

Environmental value forms produced by IU are shown in Table 2.

Environmental Value forms
Increasing resource efficiency
Reuse of products and materials
Elimination/reduction of waste
Responsible use of resources
Responsible use of natural resources (rainwater)
Increasing environmental well-being
Environmental well-being by diminishing the environmental stress for water extraction and consumption in the territory.
Increasing of the environmental awareness
Environmental awareness on BoP about the water crisis
Environmental awareness on BoP about the use of alternative energies by using an eco-technology
Environmental awareness on BoP about the harvest of rainwater.
Increasing of awareness (RWHS system and function)
Environmental awareness (as a whole)
Increase of environmental awareness on BoP installers (Distribution Channel of the model)
Generating an eco-technology adoption
Eco-technology adoption for the BoP (USE vs CONSUMPTION)
Increase of adoption levels (RWHS)
Promoting sustainable practices
BoP beneficiary identification (for harvesting rainwater)
Promotion of RWHS (Forum creation)
Lowering the environmental impact of the territory
Promoting a close relationship with the environment
Changing the sustainable paradigm of the BoP population

Table 2. ENVIRONMENTAL VALUE FORMS FROM IU'S SBM.

The SBM is producing traditional environmental values, for instance, elimination of waste or the responsible reuse of products. However, we remark that several environmental

values emerged to create the "Increasing of the environmental awareness" category. Fundamentally, this category is grounded on environmental literacy for society and all the BoP stakeholders. In doing so, they promote the "adoption" of the RWHS and not just its consumption. This adoption is just captured by the BoP but almost all environmental values identified in IU are leveraged by the BoP intervention. The main systemic impact of IU' SBM is the reduction of the environmental stress for water extraction and consumption in the territory.

Table 3 shows a summary of the social values.

Social Value forms
Respecting laws and regulations
Standards (drinking water), and individual rights are respected.
Respecting employee, stakeholders, and individual rights
No discrimination
Equal treatment of employees/stakeholders/individuals
Ethical principles and no harmful social impacts
Operation, products, and services do not harm people or the community
Ethical principles are followed (caring use of resources)
Increasing social well-being
Employees Happiness, Career promotion
Intrinsic value for employees
Professional experience, Satisfaction with the job, operational learning, acquisition of knowledge and capabilities, professional development, environmental and technical training for employees
Social networking creation
Communication channels creation with BoP communities and BoP beneficiaries.
Networking creation with strategic actors from BoP communities (community leaders)
Social cohesion in BoP communities
Improving communication with BoP
Closing the communicational gap between the focal company and the BoP communities
Increasing the rallying power of the focal company in BoP communities
Development of social awareness
Learning the social realities of BoP communities
Cultural development at the BoP
Bringing artistic and cultural practices to the BoP
Improving the living conditions of the BoP
Social and environmental wellbeing
Water provision by RWHS
Awareness for a participative role
Teaching to beneficiaries the skills for increasing the efficiency of the RWHS

Table 3. SOCIAL VALUE FORMS FROM IU'S SBM.

The BoP is integrated into several aspects of the IU's business model. For example, BoP beneficiaries are hired by IU in order to take advantage of the technical knowledge embedded in them. IU model produces several intrinsic values for employees, more importantly, operational learning about the rainwater harvesting systems. The BoP is also involved in networking creation. Often, BoP people (community leaders) create communicational channels in communities and legitimate the results of the RWHS by sharing the economic benefits it produces for households. During educational events performed by IU and other community intervention stakeholders, one of the main social impacts is the promotion of social cohesion. This factor was also seen when BoP beneficiaries share the main value of the RHWS during rainy seasons; BoP beneficiaries help their community by sharing the water they harvest. Beneficiaries claim to be happy to help their community.

Table 4 presents the economic value forms produced by this systemic model.

Economic Value forms
Increasing profits and business opportunities
Increase of profits
Increasing attractiveness
Increases in reputation and brand value (attractiveness as an employee/collaborative partner)
Increasing economic well-being
Employment creation and Economic well-being for the BoP (avoiding economic fees for insufficient water provision)
Provision of strategic information for the system
Product properties, product acceptance evaluation
System adoption evaluation
Increasing the efficiency of the RHWS
Getting feedback about the RWHS and the business model from the BoP
Increasing innovation and performance

Table 4. ECONOMIC VALUE FORMS FROM IU'S SBM.

Results corroborate what the literature states about SBMs attending the BoP. IU's business model does not pursue the maximization of profits. Even if IU does not have a real competitor, it keeps the focus on producing environmental values and social values for BoP communities. Behind the economic value that traditional models produce (an increase of profits), the most outstanding economic value is allowing the BoP to save money from water provision expenses (water transportation). From collaboration with the academy sector, the IU's model is getting strategic information about its system and the level of adoption for an eventual improvement in the funding attraction.

Finally, even though we focus on value forms we noticed some challenging situations. To overcome financial obstacles, the SBM of IU is getting funds from a parallel traditional model. This allows generating financial resources to continue the social and environmental mission of the firm, however, innovating the business model for reaching scalable SBMs could represent a value opportunity.

V. DISCUSSION AND CONCLUSIONS.

Sustainable Value is understood as the social, environmental, and economic benefits [33]. Often, this concept is linked to the positive results of Business Models but mainly to those considered Sustainable. Research has produced interesting information about the different sort of Sustainable Business Models and how these "mechanisms" deliver sustainability [20]. However, exploring cases is necessary to extend conceptual categories of sustainable value forms and simultaneously improve the understanding of how sustainable models create them. We paid special attention to the SBMs for the BoP, the archetype where it is assumed that different logics of value generation and systemic benefits exist [6]. Through this paper, we aimed to describe sustainable value forms of a sustainable model attending to poor people.

In our case study, we corroborate that the sustainable business model for the BoP is characterized for offering a comprehensive solution for the BoP [6], adoption and implementation of technologies [12], social interactions to increase customer acceptance, and the integration of BoP to generate more values [15]. From our descriptive results, we notice that direct and indirect collaboration of BoP agents is

defining the way how sustainable value is produced and defines value forms not sketched out in the literature so far. Mainly, its process is focused on increase environmental and social awareness which is not common in traditional business models.

We assume that more case study examinations can contribute to extend the value forms described here and to propose new theoretical dimensions for the value creation framework. We remark that there are some overlaps among value forms, sometimes is not evident to position a value as environmental, social, or economic since complexity is a natural characteristic of value term [34]. We also highlight that analyzing the sustainable value in the business model implies two aspects: a creation process and the types of sustainable value produced by them. In both cases, we emphasize that an approach of activities should be taken for researchers to obtain clear insights of stakeholders involved in the SBM, their activities, and the positive impacts.

Further research should identify more value forms in the other sustainable value archetypes. By conducting this research, we unearth some value forms that could help academics understand what the sustainable value for the BoP is.

VI. RÉFÉRENCES

[1] HART SL, MILSTEIN MB. Creating sustainable value. Acad Manag Exec. 2003 May;17(2):56–67.

[2] ARNOLD DG, WILLIAMS LHD. The paradox at the base of the pyramid: Environmental sustainability and market-based poverty alleviation. Int J Technol Manag. 2012;60(1–2):44–59.

[3] CHESBROUGH H, AHERN S, FINN M, GUERRAZ S. Business Models for Technology in the Developing World: The Role of Non-Governmental Organizations. California Management Review. 2012; 48(3):48–61.

[4] STUBBS W, COCKLIN C. Conceptualizing a "Sustainability Business Model." Organ Environ [Internet]. 2008;21(2):103–27.

[5] BOCKEN N, SHORT S, RANA P, EVANS S. A value mapping tool for sustainable business modelling. Corp Gov. 2013;13(5):482–97.

[6] DEMBEK K, YORK J, SINGH PJ. Creating value for multiple stakeholders: Sustainable business models at the Base of the Pyramid. J Clean Prod. 2018;196:1600–12.

[7] YANG M, EVANS S, VLADIMIROVA D, RANA P. Value uncaptured perspective for sustainable business model innovation. J Clean Prod. 2017;140:1794–804.

[8] GEISSDOERFER M, VLADIMIROVA D, EVANS S. Sustainable business model innovation: A review. J Clean Prod. 2018;198:401–16.

[9] YANG M, VLADIMIROVA D, RANA P, EVANS S. Sustainable value analysis tool for value creation. Asian J Manag Sci Appl. 2014;1(4):312–32.

[10] KRISTENSEN HS, REMMEN A. A framework for sustainable value propositions in product-service systems. J Clean Prod. 2019;223:25–35.

[11] LAUKKANEN M, TURA N. The potential of sharing economy business models for sustainable value creation. J Clean Prod. 2020;253:120004.

[12] SOUSA-ZOMER TT, CAUCHICK MIGUEL PA. Sustainable business models as an innovation strategy in the water sector: An empirical investigation of a sustainable product-service system. J Clean Prod. 2018;171:S119–29.

[13] WINSLOW J, MONT O. Bicycle Sharing: Sustainable Value Creation and Institutionalisation Strategies in Barcelona. Sustainability. 2019;11(3):728.

[14] EVANS S, VLADIMIROVA D, HOLGADO M, VAN FOSSEN K, YANG M, SILVA EA, et al. Business Model Innovation for Sustainability: Towards a Unified Perspective for Creation of Sustainable Business Models. Bus Strateg Environ. 2017; 26(5):597–608.

[15] AUSRØD VL, SINHA V, WIDDING Ø. Business model design at the base of the pyramid. J Clean Prod. 2017;162:982–96.

[16] CALTON JM, WERHANE PH, HARTMAN LP, BEVAN D. Building Partnerships to Create Social and Economic Value at the Base of the Global Development Pyramid. J Bus Ethics. 2013;117(4):721–33.

[17] GEBAUER H, HALDIMANN M, SAUL CJ. Business model innovations for overcoming barriers in the base-of-the-pyramid market. Ind Innov. 2017;24(5):543–68.

[18] ANGOT J, PLÉ L. Serving poor people in rich countries: the bottom-of-the-pyramid business model solution. J Bus Strategy. 2015;36(2):3–15.

[19] PRAHALAD CK, HART SL. The Fortune at the Bottom of the Pyramid. Strateg + Bus. 2002;(26).

[20] BOCKEN NMP, SHORT SW, RANA P, EVANS S. A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. J Clean Prod. 2014; 65:42–56.

[21] ANGELI F, JAISWAL AK. Business Model Innovation for Inclusive Health Care Delivery at the Bottom of the Pyramid. Organ Environ. 2016 ; 29(4):486–507.

[22] PANAPANAAN V, BRUCE T, VIRKKI-HATAKKA T, LINNANEN L. Analysis of Shared and Sustainable Value Creation of Companies Providing Energy Solutions at the Base of the Pyramid (BoP). Bus Strateg Environ. 2016;25(5):293–309.

[23] CARDONI A, KISELEVA E, TATICCHI P. In Search of Sustainable Value: A Structured Literature Review. Sustainability. 2020; 12(2):615.

[24] RICHARDSON J. The business model: an integrative framework for strategy execution. Strateg Chang. 2008; 17(5–6):133–44.

[25] O'CASS A, NGO LV. Examining the Firm's Value Creation Process: A Managerial Perspective of the Firm's Value Offering Strategy and Performance. Br J Manag. 2011 ; 22(4):646–71.

[26] YIN RK. Case Study Research: Design and Methods. Third Edit. CA: SAGE Publications Inc; 2003. 178 p.

[27] EISENHARDT KM. Building Theories from Case Study Research. 1989;14(4):532–50.

[28] BENGTSSON M. How to plan and perform a qualitative study using content analysis. NursingPlus Open. 2016;2:8–14.

[29] ELO S, KYNGÄS H. The qualitative content analysis process. J Adv Nurs. 2008;62(1):107–15.

[30] ERLINGSSON C, BRYSIEWICZ P. A hands-on guide to doing content analysis. African J Emerg Med. 2017;7(3):93–9.

[31] SHORT SW, BOCKEN NMP, BARLOW CY, CHERTOW MR. From Refining Sugar to Growing Tomatoes. J Ind Ecol. 2014;18(5):603–18.

[32] ARGANDOÑA A. Stakeholder Theory and Value Creation [Internet]. Vol. 3. Barcelona, Spain; 2011. Report No.: 922.

[33] TAO J, YU S. Product Life Cycle Design for Sustainable Value Creation: Methods of Sustainable Product Development in the Context of High Value Engineering. Procedia CIRP. 2018;69(May):25–30.

[34] AHMED W BEN, YANNOU B. Polysemy of Values or Conflict of Interests: A Multi-Disciplinary Analysis. Int J Value-Based Manag. 2003;16(2):153–79.

Vers des tables en flux physiques de l'économie française

Alexandre BORTHOMIEU[1]
Equipe STEEP
alexandre.borthomieu@inria.fr

Jean-Yves COURTONNE[1]
Equipe STEEP
jean-yves.courtonne@inria.fr

Vincent JOST[2]
GSCOP – Equipe ROSP
vincent.jost@grenoble-inp.fr

Guillaume MANDIL[1]
Equipe STEEP
guillaume.mandil@inria.fr

Peter STURM[1]
Equipe STEEP
peter.sturm@inria.fr

[1] Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Inria, Grenoble INP, LJK, 38000 Grenoble, France
[2] Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 38000 Grenoble, France

Résumé— Il existe maintenant plusieurs travaux de recherche traitant de tables input-output en flux physiques. Ces travaux sont cruciaux pour essayer de répondre aux questions sur les possibles trajectoires de nos sociétés et modes de consommations. Dans cette communication, nous souhaitons faire le pont entre ces travaux et l'analyse de flux de matières et développer une méthodologie capable de fournir des tables en flux physiques dans un formalisme commun à partir de données avec plusieurs unités physiques.

Mots-clés— Développement durable, Economie, Optimisation, Comptabilité environnementale

I. INTRODUCTION

Les tables Input-Ouput (IO) sont un cadre comptable des économies nationales popularisé par Leontief ([1] Leontief, 1970 ; [2] Miller and Blair, 2009). Ce formalisme permet de fournir une représentation des interactions entre trois composantes : (i) des facteurs de production vus comme exogènes au système étudié (comme le travail ou encore l'environnement en tant que fournisseur des ressources ou réceptacle d'émissions), (ii) les secteurs économiques qui transforment des facteurs de production pour produire des biens et services, et (iii) la consommation finale.

L'Analyse IO a gagné en popularité dans la communauté de l'évaluation environnementale ([3] Suh, 2009) car elle permet, en traçant les interactions entre secteurs économiques, de décrire des chaînes d'approvisionnement et d'allouer les facteurs de production (au sens large, c'est-à-dire y compris les pressions environnementales induites) au consommateur final. On peut ainsi produire une comptabilité environnementale du point de vue du consommateur, incluant les effets directs et indirects, en d'autres termes calculer des « empreintes ».

En pratique, de telles tables sont aujourd'hui disponibles pour l'essentiel des pays du monde sous différents format (ex : EXIOBASE, EORA, GTAP, WIOD, ...). Le « cœur du modèle », c'est-à-dire les échanges entre secteurs et vers la consommation finale sont quantifiés en unités monétaires et les extensions environnementales (par exemple les émissions de carbone) en unités physiques.

Depuis plusieurs années, des travaux de recherche se donnent pour objectif d'avancer vers des tables exprimées partiellement ou totalement en flux physiques ([4] Hubacek and Gljum, 2003 ; [3] Suh, 2009 ; [5] Teixeira et al., 2020 ; [6] Nakamura et al., 2007 ; [7] Bruckner et al., 2019) mettant en avant plusieurs avantages. Le premier est de parvenir à une description intégrée énergie/matière d'un état de l'économie qu'il soit passé, présent ou scénarisé ([5] Teixeira et al., 2020) . Cet enjeu est crucial pour s'assurer de la cohérence globale des trajectoires d'évolution mises en débat : par exemple, dispose-t-on de suffisamment de matériaux pour mettre en œuvre la transition énergétique ? Quel est l'impact climatique de ce scénario plus intensif en matériaux (voir également à ce sujet [8] Vidal et al. (2018)) ? Quels sont les compromis à trancher dans l'allocation des ressources entre secteurs selon les critères visés (par exemple, niveau et mode de consommation, mode de production, pressions environnementales) ? Un second avantage est de fournir une description des filières de production plus proche de la réalité de terrain, et donc plus à même de permettre l'identification des leviers de changements, grâce à une description des produits et secteurs plus fine (au moins par endroits) que dans les tables monétaires. Par exemple la notion d'un euro dépensé ou généré par le secteur agricole dans son ensemble reste relativement abstraite alors

que décrire les chaînes d'approvisionnement en céréales est plus concret. Enfin, le cadre de durabilité forte dans lequel nous nous situons ([9] Daly and Farley, 2011) invite naturellement à décrire l'économie du point de vue de son substrat matériel, dans la mesure où elle est inscrite dans un monde fini impliquant des contraintes biophysiques.

Cette communication se propose de faire le pont entre ces efforts de recherche passés et en cours et la méthodologie d'analyse de flux de matière (AFM) de filières développée par [10] Coutonne et al. (2015) et dans le projet ADEME AF Filières (www.flux-biomasse.fr). La piste explorée consiste à partir des expertises sectorielles existantes, souvent très détaillées, de les transcrire une à une dans un formalisme commun (AFM de filières) avant de les **fusionner** pour produire une unique table emplois ressources de l'économie, ou plutôt, comme nous le verrons, **une table par unité de compte pertinente**.

Nous décrivons dans un premier temps la méthode que nous avons développées pour répondre à ces objectifs avant de présenter quelques premiers cas d'application et de discuter des perspectives envisagées.

Après un rappel de l'existant en termes d'AFM de filières, nous détaillons deux contributions, (i) une typologie de cas pour gérer le multi-unités au sein d'une ou de plusieurs filières, (ii) une méthode d'assemblage progressif d'expertises de filières, et nous les mettons en oeuvre sur un exemple.

II. MÉTHODES DE FUSION POUR DES DONNÉES MULTI-UNITÉS

A. *Description du formalisme*

Pour réaliser cela, nous avons utilisé un formalisme ([10] Courtonne et al., 2015) basé sur les Tables Emplois Ressources (TERs) qui décrit tous les flux entre les secteurs et les produits de l'économie. Les TERs combinent deux tables « Emplois » et « Ressources » (voir tables Tableau 1. et Tableau 2.) dans lesquelles les informations sur les flux sont stockées. Prenons comme exemple un simple graphe de flux (Figure 1.), on peut alors traduire celui-ci en TERs (et inversement) en supposant que les nœuds *B, C, E, G* sont des secteurs et *a, d, f, h* sont des produits.

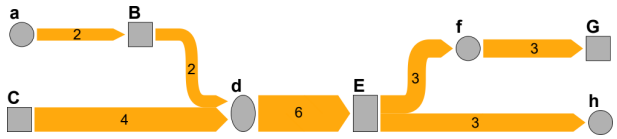


Figure 1. SIMPLE GRAPHE DE FLUX

On obtient donc les deux tables suivantes : Ressource Tableau 1. et Emploi Tableau 2. qui décrivent notre figure ci-dessus.

Produits	Secteurs			
	B	*C*	*E*	*G*
a				
d	2	4		
f			3	
h			3	

TABLEAU 1. TABLE RESSOURCE

Produits	Secteurs			
	B	*C*	*E*	*G*
a	2			
d			6	
f				3
h				

TABLEAU 2. TABLE EMPLOI

Pour construire un modèle d'une filière donnée, nous avons d'abord besoin de modéliser sa structure puis rassembler d'importantes quantités de données pour plus tard déterminer la valeur des flux. Dans notre formalisme, cela se traduit par des TERs comme précédemment mais qui ne référencent que les flux potentiels (Tableau 3. et Erreur : source de la référence non trouvée). Ainsi, un « 1 » dans le tableau indique qu'un flux est possible entre les deux champs. De plus, nous avons la possibilité de donner des niveaux d'agrégation pour chaque produit et secteur. Ces deux options vont permettre de propager des flux pour lesquels on a des données enregistrées et déduire celles que nous n'avons pas (flux manquants).

Produits	Secteurs			
	B	*C*	*E*	*G*
a				
d	1	1		
f			1	
h			1	

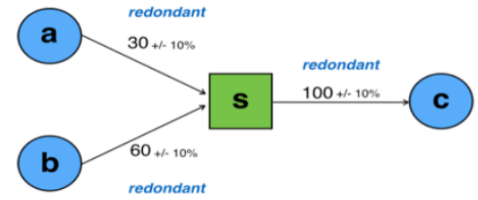
TABLEAU 3. TABLE RESSOURCE DES FLUX POUVANT EXISTER.

Produits	Secteurs			
	B	*C*	*E*	*G*
a	1			
d			1	
f				1
h				

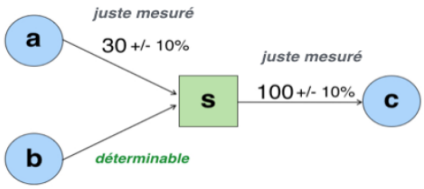
TABLEAU 4. TABLE EMPLOI DES FLUX POUVANT EXISTER.

Nous entrons ici dans le cœur de notre méthode. En effet, pour calculer ces données de flux manquantes, nous avons développé un algorithme qui assigne d'abord un parmi les quatre types suivants à chaque flux selon différents critères (Figure 2.) : variable « déterminée » (*VD*), « mesurée » (*VM*), « redondante » (*VR*) et « libre » (*VL*). Les *VM* et *VR* sont les entrées de notre outil tandis que *VD* et *VL* vont être calculées. Les *VL* sont les variables les plus intéressantes car nous ne pouvons pas les calculer précisément. Nous sommes donc forcés d'utiliser des intervalles pour les décrire. Pour calculer les *VL* ainsi que les *VD* nous utilisons un algorithme de réconciliation de données basé sur de l'optimisation sous contraintes (dont certaines représentent des bilans matières) : chaque nœud (produit ou secteur) de notre graphe doit avoir un bilan matière équilibré. Donc, chaque nœud va représenter un ensemble de contraintes en fonction de la variable qu'on souhaite calculer. Grâce à cela, nous sommes capables de déterminer toutes les variables identifiées comme *VD* et de calculer l'intervalle des *VL* (l'algorithme essaie de réduire au maximum les bornes des intervalles de départ associées à chaque variable). Enfin, notre outil utilise des simulations

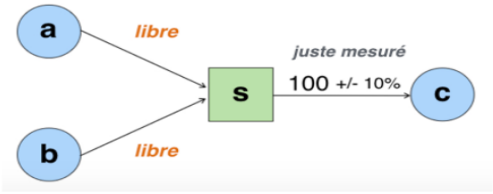
Monte-Carlo pour estimer et propager les incertitudes des valeurs calculées ([11] Courtonne et al., 2019).



A) VARIABLES REDONDANTES



B) VARIABLES MESURÉES ET DÉTERMINÉES



C) VARIABLES LIBRES

Figure 2. TYPES DE VARIABLES ([11] COURTONNE ET AL)

Il est difficilement possible de construire une représentation complète d'une structure économique considérable en une fois notamment à cause de la trop grande quantité de flux à connaître. Mais il est toutefois possible de le faire par morceaux. C'est en partant de ce constat, que nous avons développé un algorithme simple capable de fusionner deux filières (e.g. deux fichiers excels) sans perdre d'informations sur la structure de données de ces filières. Ainsi les niveaux d'agrégation restent cohérents et les flux qui leur sont liés également. Cet algorithme fonctionne en concaténant les informations des filières jusqu'à trouver un produit ou un secteur présent dans les deux auquel cas il va simplement fusionner les cases correspondantes en évitant les doublons.

B. Traitement du multi-unités

Quand on travaille sur un système de fusion lié au bilan matière, les unités sont un aspect important : le principe de bilan matière fonctionne avec une unité de référence qui est effectivement la plupart du temps des grammes ou des tonnes. Cependant, les flux physiques intrinsèques à chaque produit ne peuvent pas être tous décrits avec des unités massiques. En effet, les données récoltées auront d'autres types d'unités comme des mètres cubes, des litres ou même des Watt-heure. On peut alors dire qu'il existe deux grands types de bilans : matière et énergie. Mais comment alors fusionner et réconcilier deux filières entre elles si les unités de plusieurs flux sont différentes ?

On peut décrire trois cas spécifiques liés à cette question. Le premier est assez basique, il s'agit seulement de facteurs de conversion. Beaucoup d'unités ont un lien logique pour un même bilan entre elles comme la tonne, le litre, etc. pour le bilan matière et Watt-heure, Joules, etc. pour le bilan énergie. Ces unités peuvent modifier notre interprétation du flux mais il est possible de passer de l'une à l'autre au sein d'un même bilan avec un simple calcul. On peut prendre en compte ce cas facilement : il suffit de convertir tous les flux dont on a besoin dans la même unité de « référence » pour ensuite les réconcilier comme décrit plus haut. De cette façon, les contraintes de conservation peuvent être respectées et les variables calculées.

Le deuxième cas est un peu plus délicat. En effet, nous souhaitons parfois prendre en compte les deux types de bilans, matière et énergie. Plus on ajoute des produits dans la modélisation de filières plus on a de chances de se retrouver avec plusieurs unités différentes mais surtout liées aux différents types de bilans. Prenons un exemple d'une filière simple représentant un nœud dans notre graphe de flux. Supposons que ce nœud modélise une centrale à charbon. Cette centrale va bien évidemment utiliser des tonnes de charbon en entrée et produire de l'énergie comme de la chaleur ou de l'électricité. Cependant, si l'on suit la combustion pour qu'elle respecte le bilan matière, on ne voit apparaître que du charbon puis du CO_2, de l'H_2O, des cendres. Ce n'est que lorsqu'on décide d'observer le bilan énergie qu'apparaît la production d'électricité de la centrale. Ainsi, on peut décrire cette combustion selon les deux bilans. Le bilan matière : il y a un certain tonnage de charbon qui entre dans l'usine et couplé à l'oxygène on obtient une certaine quantité de CO_2 avec d'autres co-produits. Le bilan énergie : la centrale va bien produire une certaine quantité d'électricité qu'on ne peut mesurer qu'avec des unités « énergétiques » comme le Watt-heure. L'entrée d'énergie, cependant, n'est pas un flux véritablement visible. En effet, cette énergie provient de l'énergie contenue dans le charbon. On va donc rajouter un flux qui va correspondre au PCS ou PCI (Pouvoir Calorifique Supérieur ou Inférieur) du charbon. Ainsi, le bilan énergie peut être respecté également.

Les graphes suivants représentent cet exemple simple. La figure 3 nous indique les données en entrée. On remarque clairement les flux manquants pour réaliser une analyse précise de la « filière ».

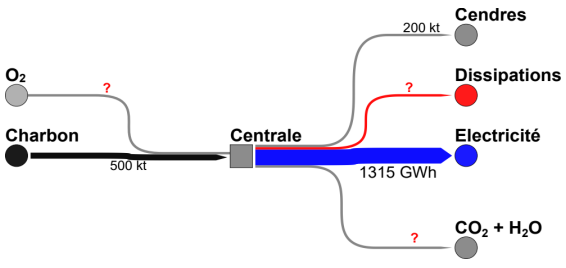


Figure 3. GRAPHE DES DONNÉES D'ENTRÉE

Avec ces données en entrée, la réconciliation nous donne la figure 4 qui n'a aucun sens physique.

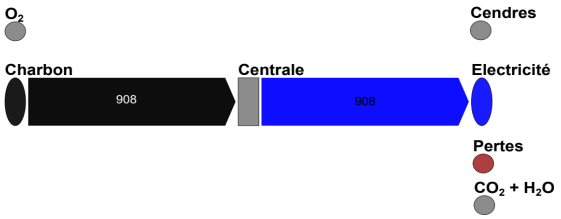


Figure 4. DIAGRAMME DE SANKEY DE LA RÉCONCILIATION SANS TRAITEMENT PRÉALABLE DES DONNÉES

La figure suivante (Figure 5.), après traitement des données selon les deux aspects massique/énergétique, est vraisemblablement plus proche de la réalité et les bilans matières sont respectés.

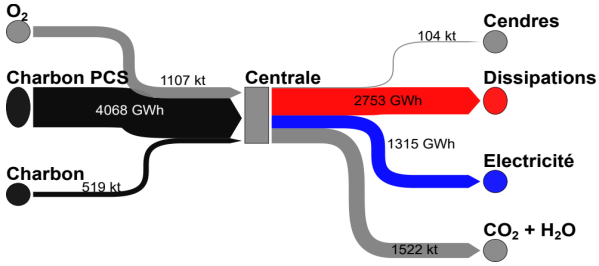


Figure 5. DIAGRAMME DE SANKEY DU RÉSULTAT CORRECT INCLUANT LE MULTI-UNITÉ

Nous avons pris en compte ce cas dans notre approche de fusion et réconciliation de filières. Lorsqu'un secteur est traversé par au moins deux flux d'unités « incompatibles » (pour lesquels les deux types de bilans sont nécessaires) comme c'est le cas pour la centrale, nous ajoutons un niveau de représentation en créant une « copie » du secteur pour chaque unité « incompatible ». De cette façon, on va pouvoir représenter chaque aspect et réconcilier nos données selon chaque unité. On obtient ainsi la Figure 5.

Enfin, le troisième cas est au sujet de la composition des flux. Il est possible qu'on veuille respecter un bilan matière avec différents types d'unité massique. Il est donc intéressant et utile de connaître le pourcentage de chaque composant d'un produit pour la réconciliation. Si on prend l'exemple de la filière lait, il est possible de caler (également via une méthode d'optimisation sous contraintes) les coefficients de transformation des procédés ainsi que les compositions des différents produits afin de satisfaire simultanément les bilans en masse totale, sèche, grasse et protéique .

C. *Résumé de la méthode*

Ainsi, pour synthétiser, nous partons d'abord de plusieurs expertises sectorielles brutes qui peuvent avoir des formats et des origines différentes. Nous les transcrivons (étape 1 Figure 6. dans le formalisme décrit ici, c'est-à-dire nous créons des tables pour chaque expertise et chaque unité pertinente. Puis, nous les fusionnons sous une et même table avec toujours cette prise en compte du multi-unités (étape 2 Figure 6.) ce qui représente notre contribution dans cet article.

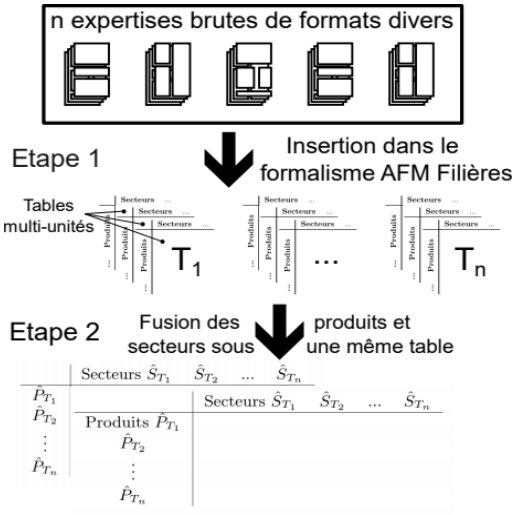


Figure 6. RÉSUMÉ SCHÉMATIQUE DE LA MÉTHODE DE FUSION DE FILIÈRES

Dans la figure ci-dessous, les Tx représentent les différentes tables et $\hat{P}_{T_x}$ (resp. $\hat{S}_{T_x}$) tous les produits (resp. secteurs) de la table qui ne sont pas dans les tables précédentes. En effet, s'ils contenaient tous les produits (ou secteurs) il s'agirait tout simplement d'une concaténation de table. Ici nous pouvons écrire que chaque ligne (resp. colonne) est construite selon cette équation ensembliste :

$$\begin{gathered} \hat{P}_{T_1} = P_{T_1}, \\ \forall i \in [\![2;n]\!], \quad \hat{P}_{T_i} = P_{T_i} \setminus \left(\bigcup_{1 \le j < i} P_{T_i} \cap P_{T_j}\right) \\ (\text{resp. } \hat{S}_{T_i} \text{ et } S_{T_{j/i}}) \end{gathered} \tag{1}$$

Où P_{T_i} (resp. S_{T_i}) représente tous les produits (resp. secteurs) présents dans la table T_i et représente le nombre de table que l'on souhaite fusionner.

D'un point de vue opérationnel, nous utilisons des tableurs pour stocker nos données et nos algorithmes sont implémentés dans le langage *Python* avec parfois des librairies externes comme *Pybind11* pour accélérer la vitesse de calcul.

III. APPLICATIONS À DES JEUX DE DONNÉES

Nous avons commencé à rassembler et structurer des données sur l'économie nationale française. Nous avons choisi d'utiliser pour débuter les données 2015 de négaWatt[3] présentes dans le diagramme de Sankey de leur scénario 2015-2050[4] afin de reproduire celui-ci. Ainsi, nous avons pu mettre les donnée 2015 du scénario dans notre formalisme et le représenter avec nos outils en annexe (Figure 7.).

[3] www.negawatt.org
[4] www.negawatt.org/scenario/sankeys/2015

De plus, nous avons choisi de travailler sur le couplage entre mobilité et énergie. Nous avons ainsi réalisé un état des lieux simplifié du parc automobile français des particuliers ([13] Warburg et al. 2011) en se focalisant sur les voitures diesel et essence. Nous en avons tiré le graphe présenté en annexe (Figure 9.) et avons également réduit et agrégé la filière énergétique pour la centrer sur l'aspect mobilité (Figure 8.). Puis nous avons donc réalisé la fusion de ces deux filières (Figure 10.).

IV. Discussion

Nos méthodes et le logiciel associé sont conçus pour faciliter la modélisation d'une structure économique complexe. Les TERs remplies avec les flux « pouvant exister » nous permettent de mieux comprendre la structure de l'économie étudiée et donc de dessiner facilement des graphes d'interaction. Une fois que la structure est établie, il suffit « seulement » de collecter les données correspondant aux flux, ce qui représente la tâche la plus chronophage quand on veut modéliser une économie. Mais le système de réconciliation nous aide à diminuer le temps passé à cette tâche en calculant certains flux manquants. Notre outil peut être utile pour comprendre les interactions entre secteurs d'une économie et leurs impacts sur l'environnement. Le système d'agrégation nous permet d'avoir une certaine liberté dans la façon de modéliser précisément une filière donnée et de la visualiser avec plus ou moins de détails. Il nous donne également une réponse aux systèmes multi-unités qui peut être une partie éprouvante car les économies nationales font appel à des flux énergétiques et de matières. Un des problèmes récurrents lorsqu'on travaille sur des chaînes de productions, c'est le double comptage de flux quand on rassemble les informations. Cependant, notre système de réconciliation couplé à notre outil de visualisation permet de prévenir ce type de problème et de détecter facilement un flux compté deux fois. Cet article est une preuve de concept et il faudra par la suite appliquer cette méthodologie a toutes les filières pour lesquelles des expertises existent.

V. Conclusion

Cet article propose donc une première méthodologie pour permettre d'approcher par des intervalles des flux dont les informations sont difficiles à collecter mais également afin de rassembler les données sous un même formalisme en fusionnant les expertises disponibles pour créer une seule table à l'échelle voulue. **De plus, nous sommes maintenant capable de fusionner ces expertises selon des bilans différents (matière-énergie).** Nous réalisons de cette façon un pont entre les travaux cités en introduction et l'analyse de flux de matières de filières ([10] Courtonne et al., 2015 ; [12] Courtonne, 2016). Comme mentionné plus haut, ce travail s'insère dans un projet qui souhaite construire une table physique nationale de notre économie. Cependant, la création de cette table n'est pas le seul objectif, nous souhaitons en effet travailler sur l'aspect multi-échelle de cette table, c'est-à-dire pouvoir descendre du national au régional, voire infra-régional. Un objectif à moyen terme est d'utiliser le formalisme et les méthodes présentés dans des exercices participatifs de prospective territoriale, par exemple pour scénariser des agencements alternatifs de l'économie sur un territoire et les évaluer selon des critères de soutenabilité ou résilience. Il s'agit donc ici de la première étape vers une évaluation environnementale multi-échelle de notre économie.

VI. Références

[1] W. LEONTIEF. « Environmental repercussions and the economic structure : An input-output approach », The Review of Economics and Statistics, 1970, 52(3):262-271.

[2] R. E. MILLER, P. D. BLAIR. « Input-Ouput analysis: foundations and extensions. » Cambridge University Press.

[3] S. SUH. « Handbook of input-output economics in industrial ecology » Volume 23. Springer Science & Business Media. 2009.

[4] K. HUBACEK, S. GILJUM. « Applying physical input-output analysis to estimate land approprioation (ecological footprints) of international trade activities. » Ecological economics, 44(1):137-151. 2003.

[5] A. TEIXEIRA, J. LEFÈVRE, A. SAUSSAY, F. VICARD. « Construction de matrices de flux de matières pour une prospective intégrée énergie-matières-économie. » Site internet de l'ADEME.

[6] S. NAKAMURA, K. NAKAJIMA, Y. KONDO, T. NAGASAKA. « The waste input-output approach to mateirals flows analysis. » Journal of Industrial Ecology, 11(4):50-63. 2007.

[7] M. BRUCKNER, R. WOOD, D. MORAN, N. KUSCHNIG, H. WIELAND, V. MAUS, J. BÖRNER. »Fabio- the construction of the food and agriculture biomass input-output model. », Environmental Science & Technology, 53(19):11302-11312. PMID : 31479245. 2019.

[8] O. VIDAL, H. LE BOULZEC, C. FRANCOIS. « Modelling the mateiral and energy costs of the transition to low-carbon energy. » In EPJ Web of Conferences, volume 189, page 00018. EDP Sciences. 2018.

[9] H. E. DALY, J. FARLEY. « Ecological economics: principles and applications » Island press.

[10] J-Y. COURTONNE, J. ALAPETITE, P-Y. LONGARETTI, D. DUPRÉ, E. PRADOS. « Downscaling material flow analysis : the case of the ceral supply chain in France. » Ecological Economics, 118:67-80. 2015.

[11] J-Y. COURTONNE, M. BEVION, J. ALAPETITE, V. WAWRZYNIAK, Y. RAVAUD. « AF Filières – Analyse des Flux des Filières biomasse pour des stratégies régionales de bioéconomie. » 2019.

[12] J-Y. COURTONNE. « Environmental assessment of territories through supply chain analysis : biophysical accounting for deliberative decision-aiding. », Thèse, Université Grenoble Alpes, 2016.

[13] N. WARBURG, A. FORELL, L. GUILLON, H. TEULON, B. CANAGUIER. « Elaboration selon les principes des ACB des bilans énergétiques, des émissions

de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2012 et 2020. » Site Internet de l'ADEME. 2011.

VII. ANNEXE

Figure 7. VISUALISATION DES DONNÉES NÉGAWATT TRANSCRITES DANS NOTRE FORMALISME

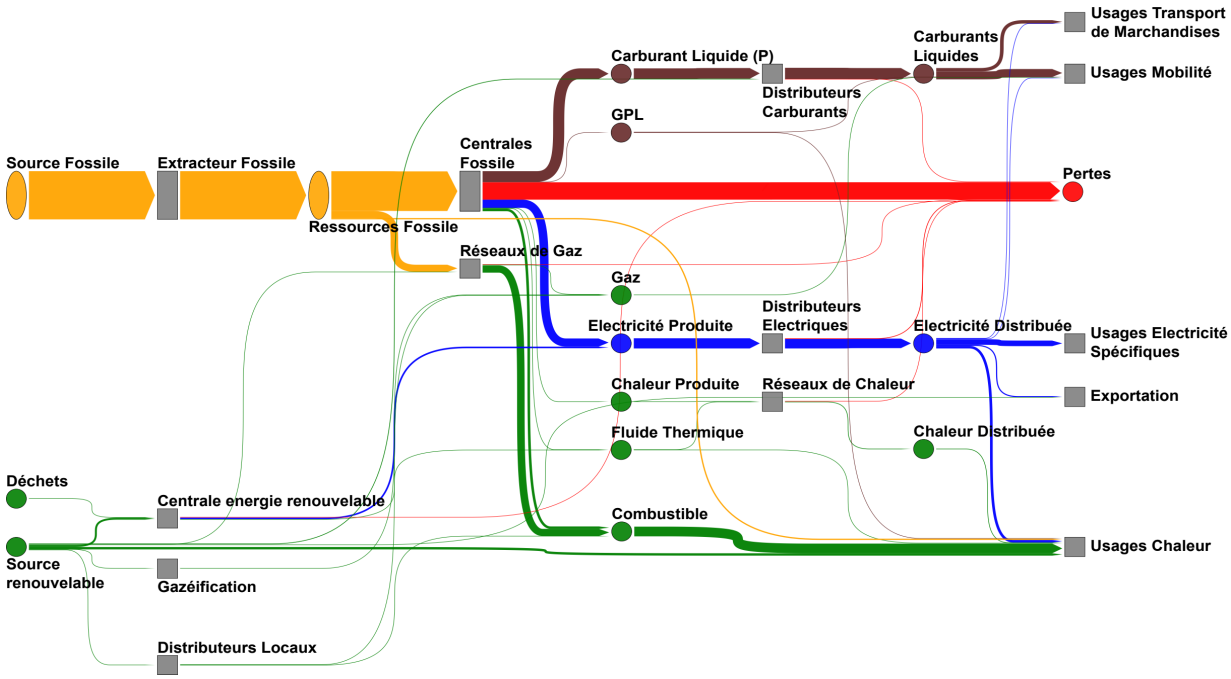


Figure 8. FILIÈRE ÉNERGIE CENTRÉE AUTOUR DE LA PARTIE MOBILITÉ – DONNÉES EXTRAITES DE L'ANNÉE 2015 DU SCÉNARIO NÉGAWATT

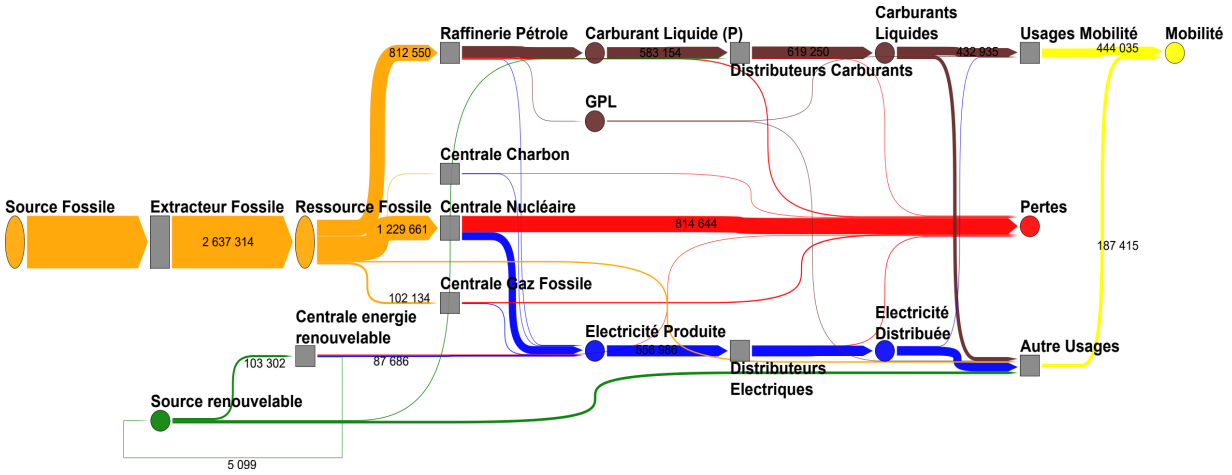


Figure 9. FILIÈRE AUTOMOBILE CENTRÉE SUR LE DIESEL ET L'ESSENCE [DONNÉES EXTRAITES DE WARBURG ET AL. 2011 [13]]

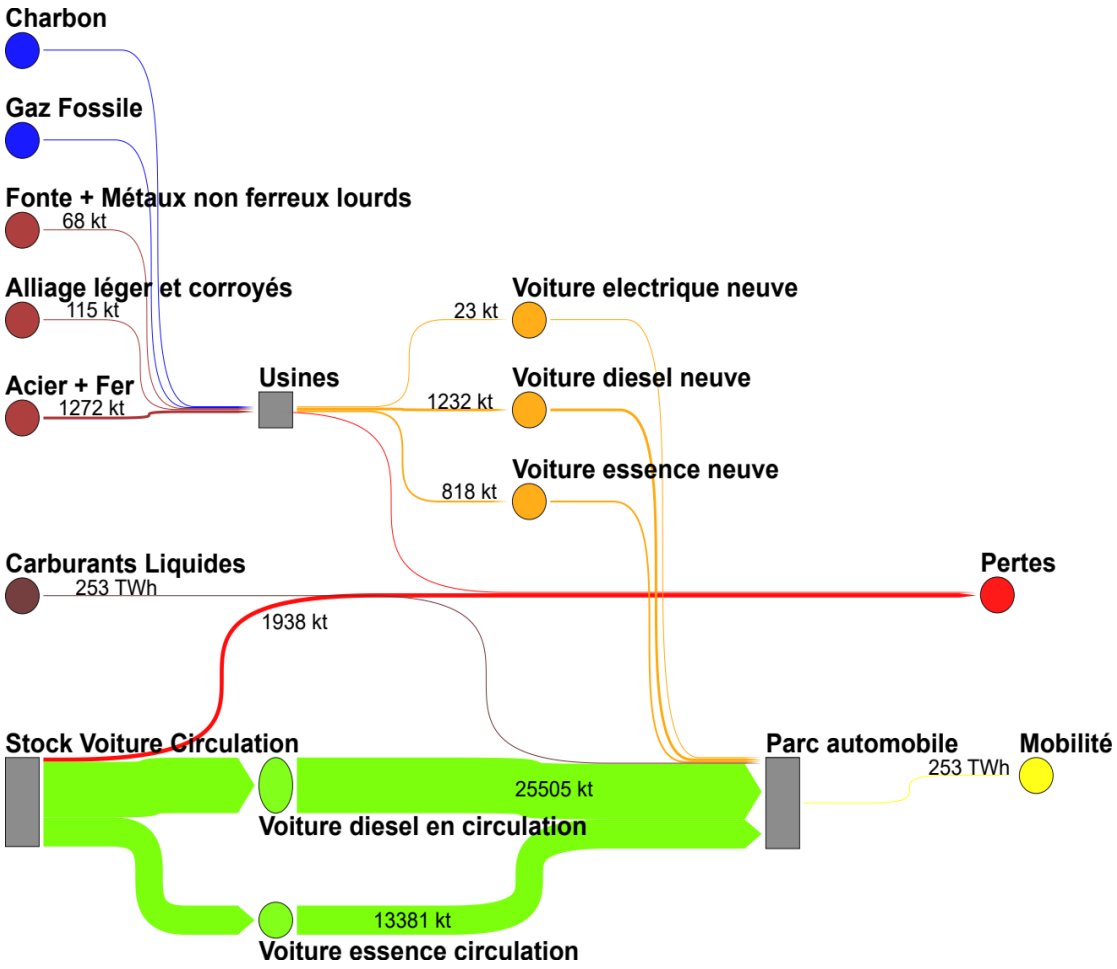
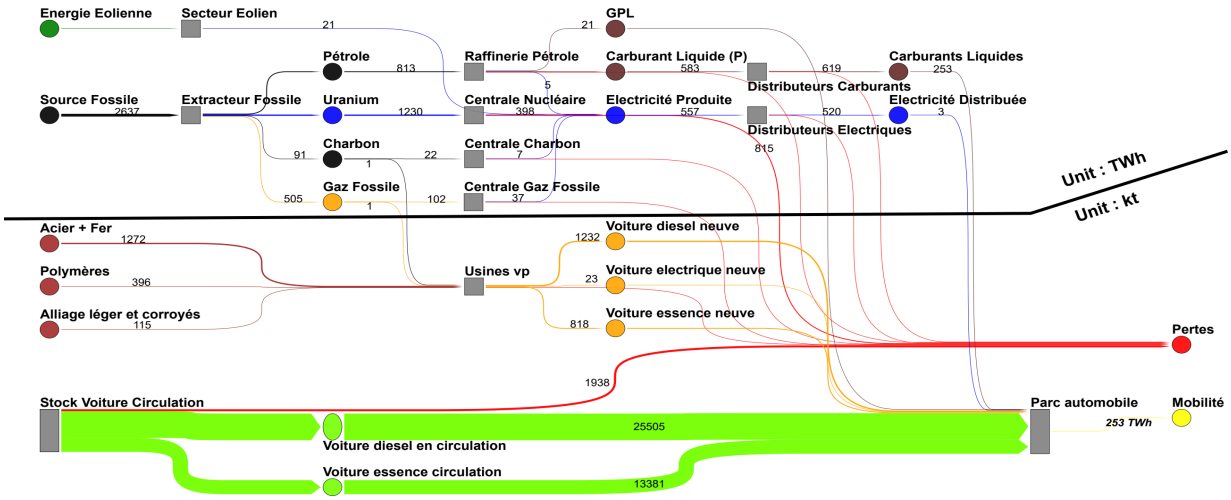


Figure 10. FUSION ÉNERGIE-MOBILITÉ 2015



Remarque : Certains nœuds ne respectent pas le bilan matière, cela vient du fait que tous les flux et nœuds ne sont pas affichés pour une meilleure visibilité mais ils existent dans nos données. De plus, l'épaisseur des flèches pour deux unités différentes ne peut être comparée : le facteur de taille entre unités est arbitraire.

La customization de masse, est-elle une approche de production durable ?

Clément Noël, Mathieu Meaude
Université de technologie de Compiègne, département ingénierie mécanique, Centre de recherche Royallieu - CS 60 319 - 60 203 Compiègne Cedex
clement.noel@etu.utc.fr, mathieu.meaude@etu.utc.fr

Joanna Daaboul
Université de technologie de Compiègne, CNRS, Roberval (Mechanics energy and electricity), Centre de recherche Royallieu - CS 60 319 - 60 203 Compiègne Cedex
Joanna.daaboul@utc.fr

Résumé— La customisation de masse est de nos jours, une stratégie appliquée dans plusieurs industries. Elle permet d'offrir des produits customisables par le client à un prix raisonnable comparé à celui de la production de masse. Cette stratégie vise à éliminer la surproduction et les déchets. Elle vise à produire uniquement ce qui sera vendu et ce qui est commandé par le client. La question qui se pose, est-elle vraiment une stratégie durable ? ce papier essaye de répondre à cette question en combinant une analyse de la littérature avec une analyse qualitative et en présentant une analyse environnementale sur un étude de cas. L'étude de cas a permis de comparer l'impact environnementale obtenu à travers une analyse de cycle de vie d'une approche production de masse et de celui d'une approche de customisation de masse. Les résultats du cas d'étude confirment les conclusions de la revue bibliographique. L'impact environnemental d'une production de masse à spécifications équivalentes est beaucoup plus élevé qu'une customisation de masse.

Mots-clés— customization de masse, analyse cycle de vie, dévelopment durable

I. INTRODUCTION

Aujourd'hui, la demande croissante pour des produits d'une grande diversité est une réalité. Les clients sont de plus en plus exigeants et demandent des produits customisables et uniques, mais ils ne sont pas prêts à payer beaucoup plus cher. La production de masse laisse peu à peu place à la customisation de masse (MC). Celle-ci permet à un client de concevoir sur mesure certaines fonctionnalités d'un produit tout en maintenant les coûts proches de ceux des produits fabriqués en série [1]. La MC repose sur la modularité du produit. Celle-ci permet au client de combiner différents modules du produit pour créer un produit final personnalisé. Néanmoins, il en existe différents types de MC qui diffèrent principalement selon le niveau d'inclusion du client dans la conception des produits MC.

Dans une époque où les enjeux environnementaux et durables sont omniprésents, la question de l'impact des choix de développement en production mérite d'être posée. Il est donc pertinent d'étudier si la customisation de masse est vraiment durable ou d'analyser comment elle pourrait l'être. Il est également important d'identifier ses faiblesses en termes d'impact durable pour mieux concevoir des produits mass customisés et la supply chain qui livrerait ces produits.

Cet article vise à analyser la durabilité des différents types de MC en se basant sur trois études : étude bibliographique, étude qualitative, étude de cas. La section 2 de cet article présente l'étude bibliographique et l'analyse qualitative pour évaluer la durabilité de la MC et la comparer à celle de la production de masse. Section 3 présente une analyse environnementale réalisée à l'aide du logiciel Simapro sur un cas d'étude pour comparer deux scénarios de MC et un scénario de production de masse. Section 4 présente une conclusion et les limites de ses travaux.

II. DEFINITIONS ET REVUE DE LA LITERATURE

A. Customization de masse

La MC consiste à réaliser et fournir un produit personnalisé (customisé) mais à un prix proche de celui de la production de masse [1]. Elle nécessite, entre autres, une architecture modulaire du produit et un système de production flexible [1]. En effet, cette modularité permet d'utiliser les modules sur différents produits. Ces modules sont généralement fournis avec différentes variantes : couleur, forme, taille, matériau. Cette modularité engendre donc une flexibilité au niveau du système de production.

Il existe plusieurs types de MC. Ceux-ci dépendent de deux facteurs principaux : l'offre de customisation et le point d'intégration de l'ordre du client dans les processus (Customer Order Decoupling Point - CODP) [2]. Il existe donc quatre typologies de MC. Le client peut être impliqué dans la customisation en phase de conception, fabrication, assemblage ou distribution.

B. Dévelopment durable

Le développement durable est un terme avec lequel nous sommes de plus en plus familier. Néanmoins, les définitions sont diverses et variées. Nous nous sommes arrêtés sur celle de l'Organisation des Nations Unies publiée en 1987 qui stipule le développement durable doit concilier le progrès économique et social avec la préservation de l'environnement. La durabilité est une approche tridimensionnelle qui ne doit pas se résumer qu'à l'aspect environnemental.

Pour comprendre l'opportunité que représente la MC pour produire des produits plus durables nous allons utiliser l'approche du Product Lifecycle Management (PLM).

L'analyse du cycle de vie (ACV) est l'outil le plus abouti en matière d'évaluation globale et multicritère des impacts environnementaux [3]. Cette méthode normalisée permet de mesurer les effets quantifiables de produits ou de services sur l'environnement.

L'ACV recense et quantifie, tout au long de la vie des produits, de l'extraction des matières premières énergétiques et non énergétiques nécessaires à la fabrication du produit, distribution, utilisation, collecte et élimination vers les filières de fin de vie ainsi que toutes les phases de transport. Elle en évalue les impacts potentiels puis interprète les résultats obtenus en fonction de ses objectifs initiaux [4]. Dans cet article, l'approche ACV sera divisée en cinq parties : conception, production, distribution, utilisation, et fin de vie.

Bien que l'ACV ait été qualifiée d'expérimentale, voire de partiale au début des années 1990, sa pratique, sa diffusion et, surtout, sa normalisation au niveau international en font aujourd'hui un outil performant et reconnu [4]. La normalisation internationale ISO (14040 à 14043), développée à partir de 1994, a fixé les bases méthodologiques et déontologiques de ce type d'évaluation, favorisant une harmonisation de la méthodologie employée, davantage de robustesse et de fiabilité des résultats et une communication plus formalisée D'après la norme ISO 14040, l'ACV est une « compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie ».

C. Analyse de durabilité de la customization de masse

Cette partie synthétise l'analyse de la littérature sur la durabilité de la stratégie de MC. Cette analyse est présentée par phase de cycle de vie et est synthétisée dans le tableau 2 présenté à la fin de cet article.

Facteurs d'impact en phase de conception

Les décisions qui seront prises pendant cette phase affecteront les performances finales du produit [5]. Sa conception est également un élément déterminant de la fin de son cycle de vie.

Premièrement, dans le cadre de la MC, le client contribue à la conception de son produit à des niveaux déférents selon le type de MC. Ceci permet de le sensibiliser sur les impacts de ses choix de conception, non seulement économiques mais également sociaux et environnementaux. A noter que pour cela, il faut que l'entreprise soit capable de fournir des informations à son client sur l'impact environnemental de ses choix [6].

Deuxièmement, l'aspect modularité inhérent à la MC permet aux entreprises de produire une large variété de produit avec la même base, entrainant ainsi des économies d'échelles [7]. Mais cette conception modulaire a l'inconvénient d'être moins performante énergétiquement, plus lourde et nécessite davantage de matière que d'autres architectures utilisées en MP, ce qui a un effet négatif sur l'environnement [8].

Troisièmement, l'implication du client dans cette phase de design permet de créer davantage de valeur à ses yeux, améliorant ainsi la performance sociale de la MC.

Facteurs d'impact en phase de fabrication

LA MC permet aux entreprises de produire uniquement des produits dont les consommateurs ont besoin. Elle permet ainsi une nette diminution des déchets, mais aussi une diminution de la consommation d'énergie pour la production. Selon une estimation de 2009, 300 millions de paires de chaussures sont détruites chaque année pour cause d'invendu. En considérant l'énergie nécessaire à leur production, cela correspond à 14 % de la consommation annuelle d'énergie finale de la Suisse [9].

La MC nécessite une production plus robuste en faisant appelle à des systèmes de production flexibles ou reconfigurables et à des technologies de production rapide comme l'impression 3D qui sont des structures très économes [10].

Facteurs d'impacts de la phase de distribution

Les produits hautement personnalisés demandent une réponse plus rapide et une chaîne de distribution plus locale que la MP [10]. La phase de distribution en MC est bien différente de celle de la MP. La production et l'assemblage ne démarrant qu'au moment de la commande, il n'est pas possible de distribuer les produits dans les étales d'un magasin. La majorité de la distribution de ce type de produit à lieu directement au domicile du client. Ce type de livraison individuel a pour conséquence de consommer une plus grande quantité de ressource contrairement à des livraisons en lot dans des magasins classique. D'un autre côté, le client n'ayant pas à se déplacer dans un magasin, cela permet d'économiser le déplacement ainsi que la création de grands centres commerciaux, ce qui est un atout d'un point de vue environnemental [11].

De plus, l'impact environnemental de la distribution dépend en très grande partie des distances parcourues entre le lieu de production et le lieu de distribution. Par exemple, pour les chaussures, la distribution individuelle a un effet considérable sur l'empreinte carbone de ce produit vue que la production n'est pas locale [12].

En outre, il y a un débat sur les retours des produits issu de la MC. Étant personnalisé, le taux de retour y est bien moins élevé que des produits venants de la MP. Cela permet de gagner en efficacité énergétique et de diminuer les déchets issus de la logistique. En revanche, en cas de retour de produit, il devient beaucoup compliqué de mettre en vente ce produit au risque d'augmenter la quantité de déchets [13].

Facteurs d'impact sur la phase d'utilisation

Il est bon de noter que l'impact environnemental de cette phase correspond en grande partie à la durée de celle-ci. Un produit issu de la MC possède dans la majorité des cas une plus grande durée d'utilisation qu'un produit issu de la MP. Cette augmentation de durée d'utilisation a plusieurs raisons.

Pour une partie des produits issus de la MP, les prix étant bas ils ne constituent pas de frein à l'achat. Même s'ils ne correspondent que partiellement aux attentes du consommateur, le prix étant tellement bas, le consommateur l'achètera malgré tout [14].

Les prix pratiqués dans le MC étant supérieurs à ceux de la MP, ils constituent un frein à l'achat compulsif. De plus, la personnalisation permet de répondre au mieux aux attentes du

client et les produits personnalisés sont susceptibles d'être utilisé plus longtemps [11].

De surcroît, l'aspect modulaire des produits MC facilite son amélioration au cours du temps. Elle facilite la maintenance, la réparation ainsi que son évolution contrairement au produit à l'architecture intégré.

Facteurs d'impact sur la fin de vie du produit

Les décisions prisent en fin de cycle ont une influence significative sur l'impact environnemental du produit. Il existe plusieurs méthodologies pour boucler le cycle de vie d'un produit. Le concept des 3R (Reduce, Reuse, Recycle) ou la méthodologie du 6R (Reduce, Reuse, Recover, Redesign, Remanufacture, Recycle). La partie Reduce prend son sens dans les quatre premières phases du produit. En revanche, les autres stratégies ont lieu lors de la phase de fin de vie.

La stratégie de Reuse est une des faiblesses du MC. Car le produit étant personnalisé, il est très difficile de trouver une seconde vie au produit étant donné l'hétérogénéité des besoins des consommateurs. Cette stratégie est donc difficilement applicable à la MC et représente un point négatif pour l'environnement. Les stratégies de Redesign et Remanufacture sont les points forts de la MC. En effet, de par l'architecture modulaire, il est assez aisé d'y effectuer des modifications. Même argument s'applique pour la stratégie de recyclage. L'architecture modulaire permet de séparer aisément les parties recyclables de celles non-recyclables [15].

D. Analyse de durabilité de la MC selon sa typologie

Les différents types de MC n'ont pas le même impact durable. La MC en phase de conception est celle qui apporte le plus de valeur aux yeux du client mais c'est aussi celle qui présente la plus grosse difficulté de mise en place en termes de faisabilité ou de planification car c'est la customisation où le client a le plus grand degré de liberté.

Pour la MC en conception, fabrication et assemblage la réduction des invendus permet de réduire les déchets grâce à la production tirée. Mais les coûts énergétiques et financiers des équipements nécessaires à cette customisation peuvent s'avérer relativement conséquents. Enfin, la MC en phase de distribution est relativement similaire à la production de masse. Elle se différencie par la possibilité de customisation du packaging ou de l'ajout d'un élément supplémentaire.

III. CAS D'ETUDE

L'analyse qualitative et la revue bibliographique résumées en tableau 2, montrent que la MC est plus durable que la MP. Cette conclusion est testée par un cas d'étude présenté ci-dessous. Cette étude se restreint à l'impact environnementale.

A. Présentation du cas d'étude

Le cas d'étude se focalise sur un produit relativement standard qui est la chaise. La chaise sera composée d'une armature standard en bois (traverse, pieds, ceinture, montants et barreaux) et de deux pièces modulaires (assise et dossier). Le client pourra donc personnaliser ces deux sous-ensembles selon le type de matériau ou de revêtement désiré.

Une ACV a été réalisée sur trois scénarios :

1) MP : Production de masse avec une usine située à Taishan en Chine ce qui permet de réduire les coûts de main d'œuvre et qui représentatif d'un cas MP. Livraison des produits par bateau jusqu'au port du Havre puis achememinement par camion jusqu'aux centres commerciaux de Bordeaux.

2) MC1 : MC avec une usine située à Strasbourg en France. Livraison des produits par camion jusqu'à un entrepôt de Bordeaux puis distribution à domicile dans les foyers autour de Bordeaux. Ce scénario se base sur une nécessité de production plus locale pour proposer de la MC [10].

3) MC2 : Scénario 2 avec comme différence les matières premières utilisées pour le dossier et l'assise de la chaise.

4) MC3 : Scénario 2 avec comme différence une distribution Click&Collect autour de Bordeaux.

B. Modélisation sur Simapro

Pour la modélisation de nos scénarios, le logiciel d'ACV Simapro a été utilisé. La modélisation des différents scénarios est présentée dans le tableau 1.

	MP	MC1 (Livraison à domicile)	MC2 (Livraison à domicile)	MC3 (Livraison à domicile)	MC4 (Livraison points relais)
Traverse	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)
Dossier	Jute	Croix Acier	Bois (hêtre)	Jute	Jute
Assise	Simili cuir	Viscose	Bois (hêtre)	Simili cuir	Simili cuir
Montant	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)
Pied arrière	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)
Barreau	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)
Ceinture	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)
Pied avant	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)
Plaque contre plaquée	Bois (hêtre)	Bois (hêtre)		Bois (hêtre)	Bois (hêtre)
Mousse Assise	Mousse (Polyéther)	Mousse (Polyéther)		Mousse (Polyéther)	Mousse (Polyéther)
Mousse Dossier	Mousse (Polyéther)	Mousse (Polyéther)		Mousse (Polyéther)	Mousse (Polyéther)
Poids (kg)	6,49	7,16	7,60	6,49	6,49
Poids x Distance (kgkm)	5 924 562	322 245	342 000	291 946	192 684

TABLEAU 1 MODELISATION DES DIFFERENTS SCENARIOS SUR SIMAPRO

Grâce aux mesures de temps requis pour la fabrication, le logiciel Simapro peut quantifier l'impact écologique de ces processus. Il est nécessaire de préciser que nous avons utilisé comme principale source d'énergie l'électricité. Mais pour le scénario 1 la norme était celle prise pour l'électricité chinoise

et pour les scénarios 2, 3 et 4 la norme étant celle pour l'électricité française.

En ce qui concerne les scénarios, nous avons également fait les hypothèses que les volumes produits en production de masse sont plus importants que ceux produits en customisation de masse. Pour cela, nous sommes partis du fait que nous voulons satisfaire 30 clients. En MC, il y aura donc 30 chaises de produites. En revanche en MP, les erreurs de prévisions des ventes et la production en lots engendrera des invendus donc pour satisfaire 30 clients on devra produire 50 chaises. Cette estimation est faire pour un réapprovisionnement chaque semaine.

C. Analyse des résultats

L'impact environnementale a été évalué selon différents indicateurs de performance : « Human health », « Ecosystem quality », « Climate change » et « Ressources ».

La première comparaison a été faite entre la MP et la MC3. L'objectif était de montrer que pour une chaise avec les mêmes caractéristiques, les impacts pouvaient être différents selon le mode de production.

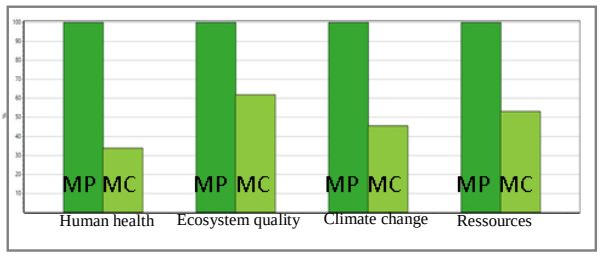


Figure 1. COMPARAISON IMPACT ENVIRONNEMENTAL MP et MC3

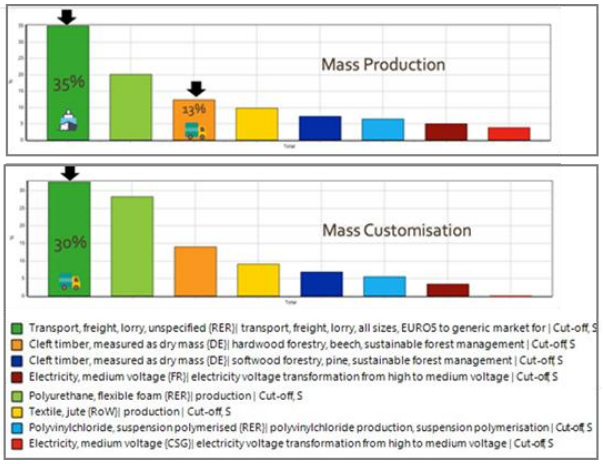


Figure 2. DETAIL IMPACT ENVIRONNEMENTAL MP ET MC3

Comme montré dans la figure 1, la MP a un impact plus conséquent sur l'environnement que la MC. Cela est en parti dû au transport. En MP, et due à une production non locale, le transport représente à lui tout seul quasiment 48% de l'impact total de la chaise (35% avec le bateau et 13% avec les camions). Le transport en MC ne représente quant à lui que 30% de l'impact total de la chaise (voir figure 2).

Les deux comparaisons qui suivent sont là pour mettre en exergue les disparités qui peuvent exister au sein de la MC selon la typologie que nous avons pu voir précédemment.

La première comparaison présentée en figure 3, souligne l'impact de la customisation en phase de conception. On s'aperçoit que le choix de matériau en phase de conception est primordial sur l'impact écologique du cycle de vie de la chaise. Une chaise avec un dossier en acier aura un impact relativement important comparé aux deux autres scénarios de chaise. L'acier est un matériau qui nécessite beaucoup d'énergies pour son extraction et sa mise en forme. Ainsi, si le client a au moment de la conception de sa chaise customisable un retour sur l'impact environnementale de ses choix, il pourrait opter pour des choix plus écologiques.

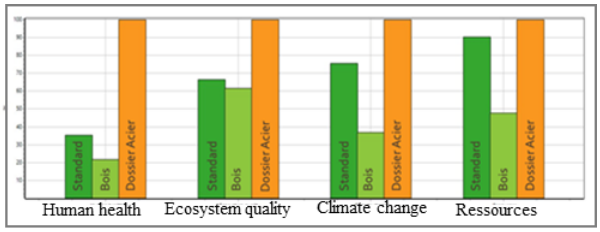


Figure 3 : IMPACT ENVIRONNEMENTAL MC1 MC2 MC3

La deuxième comparaison présentée en figure 4, souligne l'impact de la customisation en phase de distribution. En effet, si l'on compare MC3 et MC4, qui ont des caractéristiques similaires, on s'aperçoit que le choix du mode de livraison est primordial sur l'impact écologique du cycle de vie de la chaise. Une chaise qui sera livrée à domicile aura un impact écologique beaucoup plus important à cause de la distance parcourue par le livreur qui est plus important qu'avec la distribution Click & Collect. La distribution Click & Collect permet une mutualisation du transport et qui réduit donc l'impact écologique global de la chaise.

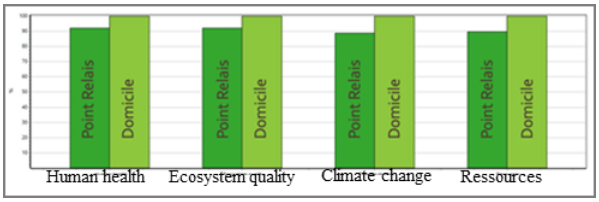


Figure 4 : IMPACT ENVIRONNEMENTAL MC3 MC4

Enfin, la dernière analyse réalisée traitait du processus de traitement des déchets qui est un point clé du PLM car c'est à partir de ce traitement des déchets que les matériaux pourront être réutilisé pour fabriquer d'autres produits.

L'étude a été menée sur MC1 et MC3 et les résultats sont présentés en figure 5. Le choix de matériaux en conception est décisif car pour MC3 le processus de traitement des déchets aura un impact plus important sur la santé humaine et sur le changement climatique.

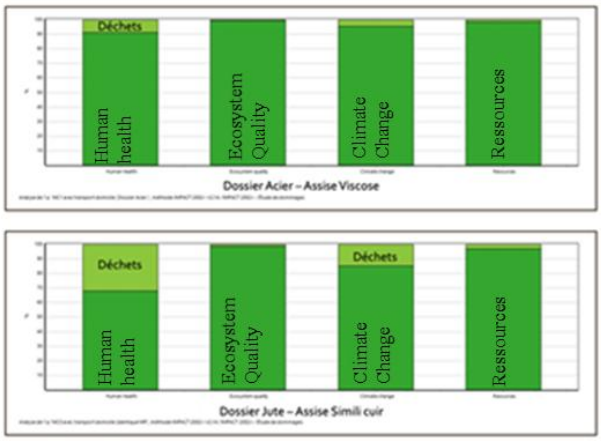


Figure 5 : Impact environnemental MC1 MC3

IV. CONCLUSION

La demande grandissante des clients pour des produits divers et variés pousse les systèmes de production à s'adapter. Le concept de customisation de masse est donc apparu au cours du XXème siècle. Cet article étudie les différentes performances durables entre la MP et la MC. Enfin, grâce à une étude de cas plus pratique nous avons pu comprendre les différents enjeux et les difficultés que peuvent engendrées ces deux modes de production. Cette étude conclue que la MC peut être plus durable que la MP.

Bien que nos conclusions de l'étude de cas semblent pertinentes et justifiées, l'étude expérimentale présente quelques limites. Premièrement, l'étude d'impact qui a été menée s'est focalisée sur les parties prenantes : production et distribution. Elle ne considère pas la partie approvisionnement en matériaux nécessaire à la production des chaises. Deuxièmement, une simplification a été adoptée, certains choix de matériaux et de processus ont été faits par défaut.

Cette étude de cas et sa modélisation sur Simapro ne mettent pas en valeur l'aspect modulaire des produits de MC, permettant de ne recycler qu'un certain pourcentage de la chaise et non l'ensemble de celle-ci.

Enfin, une autre question se pose quant au bénéficiaire de ce recyclage : le produit recyclé ou le produit réalisé à partir des matériaux recyclés ?

Pour conclure, nous avons constaté que la partie expérimentale confirme les conclusions de la revue bibliographique. L'impact environnemental d'une production de type MP à spécifications équivalentes est beaucoup plus élevé qu'un produit de MC. D'autre part, nous avons remarqué qu'au sein même d'une production de type MC des disparités existaient. Ces disparités pouvant être imputées au choix de matériaux, mais également au mode de livraison utilisé.

Il est important de noter que cette étude n'est qu'une première étape pour étudier la durabilité de la MC. Le tableau comparatif présenté se base sur une recherche bibliographique et une analyse qualitative. Cette première analyse doit être consolidée par une étude qualitative plus poussée, ainsi qu'une étude empirique. Le cas d'étude est relativement simple et des cas plus complexes devraient être étudiés.

V. REFERENCES

[1] B. Pine II, B. Victor, A. Boynton, A.. "Making mass customization work," Harvard Business Review , 1993, pp. 108–119.

[2] J. Daaboul, A. Bernard, F. Laroche. "Extended value network modeling and simulation for mass customization implementation," Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 23 N°6, 2012, pp. 2427- 2439.

[3] J. Glasson, R. Therivel, R., A. Chadwick. "Introduction to Environmental Impact Assessment", 4th. ed. UCL Press, London, 2013.

[4] Ademe 2018. https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-laction/dossier/lanalyse-cycle-vie/a-quoi-sert-ac.

[5] P. G. Maropoulos, D. Ceglarek. "Design verification and validation in product lifecycle," CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 59 No. 2, 2010, pp. 740-759.

[6] F. Badurdeen, J.P. Liyanage. "Sustainable value co-creation through mass customisation: a framework", International Journal of Sustainable Manufacturing Vo.l 2 N° 2/3, 2011, pp. 180–203.

[7] T. Blecker, G. Friedrich. "*Mass Customization: Challenges and Solutions"*, Springer, Boston, USA, 2006.

[8] K.T. Ulrich, S.D. Eppinger. "Product design and development". McGraw-Hill, New York, 2004.

[9] C. R. Boër. "International cooperation on sustainable manufacturing," proceedings of ICT for Energy Efficiency Conference, Brussels, 2009.

[10] G. Pourabdollahian, M. Taisch, F. T. Piller. "Is Sustainable Mass Customization an Oxymoron? An Empirical Study to Analyze the Environmental Impacts of a MC Business Model", in Proceedings of the 7th World Conference on Mass Customization, Personalization, and Co-Creation MCPC 2014, pp. 301-310, Aalborg, 2014.

[11] T. D. Brunø, K. Nielsen, S. B. Taps, K. A. Jørgensen. "Sustainability Evaluation of Mass Customization," in Advances in Production Management Systems - Sustainable Production and Service Supply Chains, ed Berlin: Springer, 2013, pp. 175-182.

[12] R. Kleer, F. Steiner. "Mass Customization: Bridging Customer Integration and Sustainability". Kleer, Robin and Steiner, Frank, Mass Customization: Bridging Customer Integration and Sustainability?", http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2245622, 2013.

[13] G. Pourabdollahian, M. Taisch, G. Tepe. "Exploring Different Faces of Mass Customization in Manufacturing", in Advances in Production Management Systems. Sustainable Production and Service Supply Chains, V. Prabhu, M. Taisch, and D. Kiritsis, Eds., ed Berlin: Springer, 2013, pp. 13-20.

[14] J. Hethorn, C. Ulasewicz. "Sustainable fashion: Why now? A conversation exploring issues, practices, and possibilities". New York: Fairchild Books, 2008.

[15] F. Badurdeen,D. Iyengar, T.J. Goldsby, H. Metta, S. Gupta, I.S. Jawahir. "Extending total life-cycle thinking to sustainable supply chain design," International Journal of Product Lifecycle Management, vol. 4, 2009, pp. 49-67.

[16] R. Reichwald, C. M. Stotko, F. T. Piller. "Distributed mini-factory networks as a form of real-time enterprise: concept, flexibility potential and case studies", in The Practical Real-Time Enterprise, B. Kuhlin and H. Thielmann, Eds., ed Berlin: Springer, 2005, pp. 403-434.

	Production de Masse (MP)			Customisation de Masse (MC)		
	Environnemental	Économique	Social	Environnemental	Économique	Social
Phase de conception	+ Architecture produit moins lourde et qui nécessité moins de matières qu'n MC [9]	+ Designer pour pouvoir offrir des produits à des prix abordables + Produit moins onéreux que ceux produits en MC - Produit non personnalisé donc risque de pertes économiques	+ Designer pour plaire à tout le monde. - Risque de ne répondre que partiellement aux besoins du client	+ Eco-design [9] + le client peut choisir des options ayant un meilleur impact environnemental.	+ Économie d'échelle avec les conceptions modulaires (même base pour différents produits) [7] + Pas de production de produits sans intérêts [8]. Économie en heures d'ingénierie	+ Implication du client au design crée de la valeur à ses yeux [8] + Sensibiliser les consommateurs aux enjeux environnementaux de notre époque [8] + Répond au mieux aux besoins du client [8]
Phase de fabrication	- Destruction des invendus	+Production localisée dans pays à faibles coûts donc moins chère à produire - Créer immobilisation financière - Perte de capitaux avec la destruction des invendus et obsolètes	- Délocalisation dans pays à faibles coûts	+ Réduction des invendus [9] + Réduction consommations énergétiques [9] + systèmes de production flexibles et procédés économes [10] - la grande diversité des produits augmente la complexité en fabrication et le besoin en ressources [8]	+ Réduction des factures énergétiques [8] [9] - Plus gourmande en investissement [11] - Achat de davantage de matière, composant pour répondre à la pluralité des besoins du client [11]	+ la MC nécessite une production locale avec des usines de taille plus petite [10]
Phase de distribution	+Mutualisation des livraisons - Plus de retours en SAV donc plus d'empreinte écologiques - Artificialisation des sols dû au développement des centres commerciaux	+ Économie d'échelle sur l'approvisionnement, la production et les livraisons	+ Satisfaction de la demande plus rapide	+ Pas de déplacements des clients en magasin [11] [12] + Moins de création de centres commerciaux [11] [12] + Réduction de distance production-distribution [11] + Réduction des émissions issues du transport entre la production et la distribution [11] [12] - En cas d'absence de politique de retour, création de déchet [13] - Livraison unique qui est plus polluante [12]	- Si retour du produit, difficilement revendable [13]	+ Pas de distribution en magasin [11] (12] + Relocalisation des usines sur des territoires locaux et réduire la délocalisation dans des pays à faible cout de main d'œuvre [16]
Utilisation	- Temps d'utilisation aléatoire car ne convient pas aux attentes spécifiques du consommateur	- Faible coût pousse à la surconsommation [14]	- Peut ne pas répondre à 100% au besoin de l'utilisateur	+ Utilisation du produit plus longue avant d'être mis au rebut donc moins de consommation [11] - Consommation énergétique plus élevée qu'un produit MP	+ Prix d'achat plus élevé mais utilisation plus longue qu'un produit issus de MP. Rapport qualité-prix supérieur à celui de MP [11]	+ Prix d'achat frein à la surconsommation [11] + Correspond aux attentes du consommateur [11] + Aspect modulaire facilite l'amélioration continue [11]
Fin de vie du produit	- Conception vise à réduire les prix des produits et non leur impact environnemental - Produits difficilement recyclable - En cas d'absence de modularité la séparation des composants trop complexe	- Réparation complexe, plus coûteuse. Peut nécessiter le rachat du produit	+ Seconde vie facilitée par sa forte standardisation	+ Réparation, maintenance et évolution permis grâce à la modularité du produit [15] + Difficulté de réutiliser le produit étant donné qu'il est personnalisé [15] + Les parties recyclables peuvent être récupérés facilement [15]	+ Réparation possible due à la modularité donc ne nécessite pas le rachat complet de l'objet [15]	- Seconde vie rendue difficile par le degré élevé de personnalisation qui correspond difficilement aux attentes d'un autre.

Tableau 2. IMPACT ENVIRONNEMENTAL, ECONOMIQUE ET SOCIALE DE LA PRODUCTION DE MASSE VERSUR LA CUSTOMISATION DE MASSE

Session 2-A : Réalité virtuelle et réalité augmentée

Réalité augmentée en enseignement : l'outil ou la science ?

Philippe SEITIER
INSA de Toulouse
135, Avenue de Rangueil
31077 Toulouse Cedex 4
philippe.seitier@insa-toulouse.fr

Patrick GILLES
INSA de Toulouse
135, Avenue de Rangueil
31077 Toulouse Cedex 4
patrick.gilles@insa-toulouse.fr

Résumé *— La réalité augmentée (RA) est un atout pour l'enseignement des technologies utilisant des matériels dont la mise en œuvre n'est pas directe. Elle permet une superposition dynamique du virtuel et du réel qui facilite le repérage dans l'espace. Ainsi l'information interactive décuple l'efficacité d'un mode d'emploi au sens large du terme. L'intérêt pour la prise en mains d'équipement complexes lors de travaux pratiques ou l'étude des opérations d'assemblage est alors évident mais la réalité augmentée en elle-même constitue également un sujet de formation pour les technicien et ingénieurs de demain. Une même manipulation de TP peut être envisagée pour être à la fois, utilisatrice de la réalité augmentée, et à la fois servir à l'enseigner. Dans ce dernier cas, l'apprentissage peut consister à développer des scénarii de réalité augmentée qui peuvent être testés directement sur la manipulation de TP. Pour répondre à cette double attente, l'environnement doit donc être conçu spécifiquement et le recours à l'impression 3D est judicieux. L'étude proposée porte sur la mise en place d'un TP d'assemblage d'un petit dispositif mécanique et présente un poste de travail conçu pour atteindre ce double objectif. L'ensemble du travail présenté est le résultat du stage M2 de Mina GHOBRIAL au sein du pôle mécanique de l'antenne S-mart de Toulouse qui l'a financé.*

Mots-clés— Réalité augmenté, pédagogie, conception.

I. INTRODUCTION.

La source utilisée dans cette introduction est le manuscrit de thèse d'Hamdi BEN ABDALLAH [1]. Son travail remarquable nous a beaucoup aidé, d'abord à mettre notre étude en situation et ensuite à la développer.

L'industrie du futur s'appuiera fortement sur des outils numériques principalement pour gagner en agilité et en flexibilité. Les principales finalités envisagées aujourd'hui sont :

- simplifier des tâches ou augmenter la productivité,
- accompagner les tâches humaines complexes,
- déployer des systèmes robotisés pour réduire les efforts physiques.

Ces trois points sont les enjeux des travaux sur l'assemblage de systèmes complexes particulièrement ceux du secteur aéronautique et spatial. Ce domaine connaît un essor considérable puisque le trafic aérien a été multiplié par 6 au cours des 35 dernières années. Par voie de conséquence, les cadences de production augmentent et elles sont accompagnées par l'évolution naturelle de la technologie qui conduit à des systèmes toujours plus complexes. L'assemblage aéronautique et spatial est donc un secteur dans lequel la réalité augmentée (RA) peut apporter beaucoup. Les applications particulières sont :

- l'aide à l'assemblage l'indication à l'opérateur de l'emplacement de l'élément à installer,

- l'inspection automatique, c'est-à-dire la détection de la présence du bon composant à la bonne place.

L'assemblage d'un moteur d'avion (Figure 1) est un parfait exemple de système complexe, son assemblage est manuel et la RA peut apporter une aide considérable.

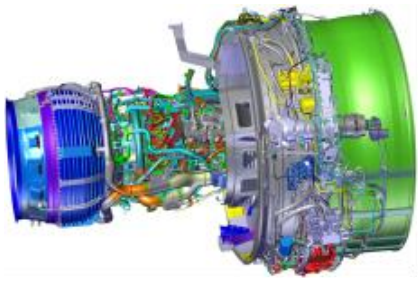


Figure 1. SUPPORT D'ETUDE – MOTEUR D'AVION LEAP [1]

L'inspection automatique est importante pour ce type d'assemblage et elle s'appuie essentiellement sur de la vision 2D et 3D. Il est à noter que qu'une inspection peut aussi être réalisée à l'aide d'images thermiques [2] mais cela concerne d'avantage la détection de défauts. L'inspection peut être effectuée sans ou avec l'aide d'un modèle CAO. La détection sans modèle CAO concerne davantage les défauts, par exemple ceux de la surface d'un fuselage d'avion à l'aide d'un drone

[3]. La détection avec modèle CAO s'applique plutôt à l'inspection lors d'opération d'assemblage. Il peut s'agir de la détection d'erreur d'assemblage [4] ou la détection automatique des éléments d'un montage d'usinage [5].

II. CONTEXTE DE L'ETUDE ET PARTENARIATS.

L'enseignement de la RA est en cours de développement au sein du département de Génie Mécanique de l'INSA de Toulouse. A l'heure actuelle il s'agit essentiellement de projets menés dans le cadre d'une initiation à la recherche que les élèves suivent au cours de la 4ème et de la 5ème année Génie Mécanique. Les sujets portent sur le développement de mode opératoires pour l'utilisation de matériel (imprimantes FDM).

Ce développement est accompagné par une relation avec la Société Thales Alenia Space (site de Toulouse) par l'intermédiaire de Pierre Besancenot qui accueille et encadre des stagiaires et des apprentis pour travailler sur des problématiques de déploiement RA. Il s'accompagne également, depuis peu, d'un partenariat avec L'Université Champollion d'Albi au travers d'encadrement de projets communs. Les étudiants d'Albi sont spécialisés en « Gamification, Apprentissages, iMmersion et ingEnierie de conception » alors que les élèves de l'INSA sont spécialisés en Génie Mécanique. Cette différence et cette complémentarité sont une force pour l'avancée de ces projets.

L'antenne S-Mart de Toulouse soutien le déploiement de la RA sur le pôle Toulousain. Elle a accepté de financer le stage M2 de M. Ghobrial et les apports produits pourront, à terme, être déployés au sein de la structure MFJA [6]. L'étude présentée ici est le fruit du travail de M. Mina Ghobrial.

La société ROBOCORTEX a généreusement mis à disposition la solution AUGMENTED PRO [7]. Cette solution logicielle utilisée par les élèves est composée :

- d'un « « créateur sur lequel les scénarii de RA sont développés,
- d'un « player » pour l'utilisation concrète de la RA, (validation des développements des élèves).

L'installation est complétée par un ordinateur portable, une tablette et des caméras.

Le déploiement de la RA en enseignement est envisagé à la fois comme un outil pour accompagner et enrichir des activités existantes et à la fois pour enseigner la RA. Les actions visées sont les suivantes :

- utiliser la RA pour rendre les élèves de 1ère année autonomes sur l'utilisation de matériel (imprimantes à fil 3D -FDM),
- utiliser la RA comme outil pour un TP de 3ème année autour de l'assemblage,
- enseigner la RA dans le cursus ingénieur Génie Mécanique à l'INSA de Toulouse 4ème et 5ème année.

L'étude présentée ici concerne les deux derniers points, en particulier le développement du TP autour de l'assemblage. Ce TP sera réalisé par les élèves de 3ème année. Les objectifs de ce TP sont de montrer l'intérêt d'une gamme d'assemblage, de formaliser qu'un poste d'assemblage est utilisateur d'outillages spécifiques et d'utiliser un système automatisé interfacé avec la RA.

III. MECANISME ETUDIE.

Le mécanisme assemblé est un porte stylos (Figure 2) fabriqué par les élèves au cours des divers TP (durée totale de 40h). La séquence comporte des activités de fabrication et de gestion de la production.

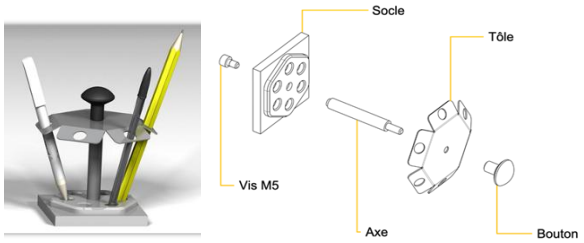


Figure 2. PORTE STYLOS ETUDIE

Les activités de fabrication s'attachent à diversifier les techniques (usinage, mise en forme, impression 3D, moulage) alors que les activités de production concernent plutôt l'organisation et la gestion de la production (méthodes PERT et MRP, gestion des flux).

IV. ASSEMBLAGE ET SCENARIO RA.

A. Assemblage du porte stylos.

Bien que le mécanisme soit simple il a fallu définir sa gamme d'assemblage. L'ordre et la nature des opérations sont détaillés Figure 3.

PHASE 10	1 - Assembler l'axe avec le socle dans l'alésage,	
	2 - Placer la vis dans le trou central et amorcer le serrage,	
	3 - Serrer à l'aide de la clé de 5,	
PHASE 20	1 - Placer le guide en tôle 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 l'arbre à la main.	

Figure 3. GAMME D'ASSEMBLAGE DU PORTE STYLO

L'identification des opérations d'assemblage a permis de définir les actions à traiter à l'aide de la réalité augmentée. Cette étape peut paraître évidente mais elle nécessite

d'identifier le rôle exact de l'opérateur et l'aide qu'il est possible d'amener avec la RA. Ainsi il a été mis en évidence la nécessité d'utiliser un poste de travail spécifique dont les fonctionnalités premières sont de disposer :

- d'un plan de travail pouvant recevoir un stockage des éléments à assembler, ici un carrousel équipé de bacs,
- des équipements nécessaires à la RA c'est-à-dire un PC, une caméra et un écran tous intégrés au poste de travail.

L'ensemble des actions à produire à l'aide de la RA a ensuite été développé à l'aide de la solution Augmented Pro déjà présentée. Elles sont synthétisées dans le Tableau 1. Ces actions de réalité augmentée sont appelées « augmentations » et sont principalement dans le cas traité :

- l'incrustation d'un objet virtuel ou d'une indication sur une image filmée,
- une inspection, c'est-à-dire, la détection de la présence d'un objet défini à la bonne place et dans la bonne position [1].

Etape-Augmentation	Visualisation
Étape 0 : une augmentation de l'assemblage final est affichée. Le carrousel distribue le socle.	
Étape 1 : le carrousel distribue l'axe. L'augmentation illustre une main gauche qui tient l'axe	
Étape 2 : le carrousel distribue la vis. L'augmentation illustre une main gauche qui tient l'axe. L'instruction spécifie de faire un premier tour de la vis à la main	
Étape 3 : l'augmentation illustre l'utilisation de la clé fournie pour serrer la vis	
Étape 4 : l'augmentation suggère de retourner le pied assemblé, et de le poser droit sur le poste	
Étape 5 : l'augmentation suggère le bon positionnement de la tôle et réalise une inspection	
Étape 5 bis : inspection de la position de la tôle	
Étape 6: l'augmentation suggère de poser le bouton sur le bout fileté de l'axe et de commencer à visser	
Étape 6 bis : l'augmentation suggère de visser le bouton jusqu'à la fin de sa course. Inspection de la position du bouton	

Tableau 1. RÉALITE AUGMENTÉE AU COURS DE L'ASSEMBLAGE

V. CONCEPTION DU POSTE DE TRAVAIL

A. *Architecture générale*

La nécessité d'un poste d'assemblage spécifique est apparue lors de la scénarisation de l'assemblage et des augmentations détaillées précédemment (§ IV). En plus d'un plan de travail et d'équipements nécessaires à la la RA, il a été choisi de structurer le poste sous la forme d'une table dont les différentes zones sont affectées à des fonctions définies (Figure 4-a).

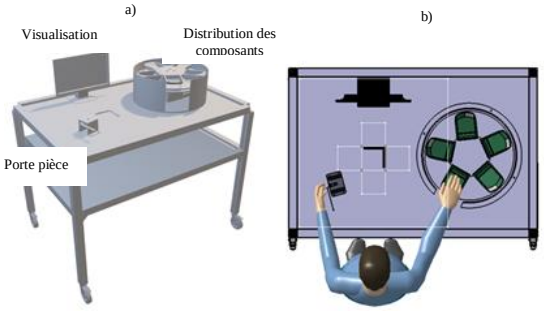


Figure 4. ARCHITECTURE GENERALE DU POSTE DE TRAVAIL

La structure portante est constituée de profilés NORCAN. L'ensemble est mobile grâce à des roues orientables qui permettent une manipulation aisée. De cette façon l'installation peut, à la fois être utilisée (Figure 4-b) dans une salle pour l'étude de la RA en 4ème ou 5ème année en développant ou modifiant un scenarii de RA, et, à la fois sur la plateforme de Fabrication pour un TP d'assemblage en 3ème année. Le double plateau permet les manipulations d'assemblage à l'aide de celui du dessus tandis que celui du dessous reçoit l'unité centrale, le clavier et la souris de la partie informatique.

B. *Le porte pièce*

Le porte pièce (Figure 5-a) est destiné à maintenir l'axe lors de l'assemblage avec le socle au cours des étapes 2 et 3 (Tableau 1). Il est constitué d'un réceptacle et d'un dispositif à vis permettant un serrage rapide grâce à une manette (Figure 5-b). Le choix d'une réalisation par impression 3D FDM a permis de limiter le nombre de pièces et de simplifier leur

forme. Une encoche non fonctionnelle permet de rendre l'ensemble dissymétrique afin de rendre la forme détectable (tracking) au cours des actions de RA mais elle permet aussi d'envisager l'ajout de module pour faciliter la détection en RA.

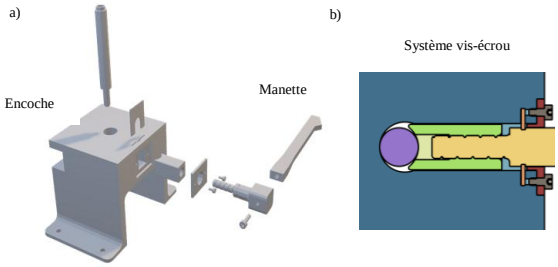


Figure 5. PORTE PIECE A SERRAGE RAPIDE

C. *Le carrousel et son pilotage*

Le carrousel (Figure 6-a) est un magasin tournant équipé de casiers contenant les pièces du mécanisme. Ce carrousel va être fabriqué par impression 3d et découpage de plaque en vue d'illustrer la fabrication d'un outillage en prototypage rapide. Sa rotation est assurée par un moteur pas-à-pas (Figure 6-c) piloté par un microcontrôleur Arduino mega 2560 (Figure 6-c). La position angulaire est gérée à l'aide d'un aimant et de 3 capteurs à effet hall (Figure 6-d). L'ensemble est piloté par le programme de réalité augmenté, cela signifie qu'une des sorties du scénario de RA n'est ni une image en incrustation, ni une instruction écrite mais un ordre de rotation adressé au moteur. La mise au point du programme ainsi que le prototypage de la solution a été réalisée très astucieusement (Figure 6-d) par le stagiaire, Mina Ghobrial, pendant la période de confinement.

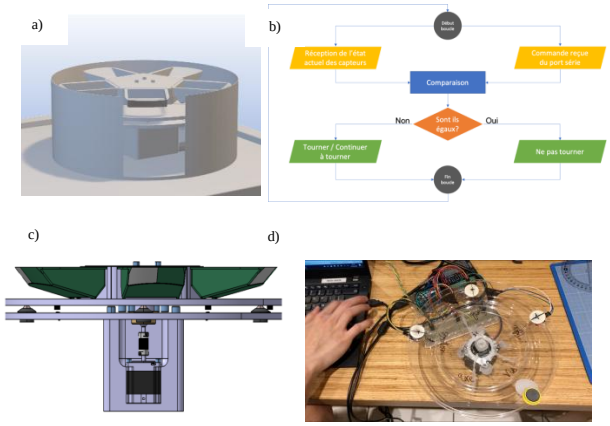


Figure 6. PROTOTYPAGE DU CARROUSEL

VI. RESULTATS ET DISCUSSIONS

A. *Résultat global et état d'avancement du projet*

Avant toute chose, il convient de rappeler que les confinements successifs ont fortement limité l'avancement du projet. Malgré beaucoup de bonne volonté il a été impossible de débuter la réalisation du poste d'assemblage au cours du stage de M. Ghobrial. C'est regrettable car en tant que stagiaire très impliqué, M. Ghobrial aurait réellement souhaité pouvoir le réaliser.

Le projet a été poursuivi à la rentrée 2020. Les principales pièces du poste d'assemblage ont été réalisées et la structure a été assemblée. Au jour d'aujourd'hui, le carrousel est en cours de finalisation et de mise au point (Figure 7). Les premiers essais sont prometteurs et nous estimons pouvoir finaliser l'installation pour la fin de l'année scolaire 2020-2021. Les différentes manipulations devraient être effectuées au cours de cette même année.



Figure 7. POSTE D'ASSEMBLAGE EN COURS DE REALISATION

Comme précisé au chapitre II, les applications envisagées initialement sont un TP d'assemblage en 3ème année et le développement de scénarii de RA avec les élèves de 4ème ou 5ème année.

B. *Nouvelles perspectives*

Un projet récent autour de la réalité augmentée avec les collègues et élèves de l'INU Champollion d'Albi donne une nouvelle perspective de développement et d'activité pédagogique.

Du côté INSA, la RA est articulée autour d'écran, de caméra et bientôt de projecteurs. Les scénarii sont implémentés à l'aide de la solution AUGMENTED PRO déjà présentée au chapitre II.

Du côté INU, la RA est développée davantage autour de l'informatique et les élèves développent des utilisations en utilisant les briques de la bibliothèque Hololens.

Il s'agit là de deux aspects différents et complémentaires de la même problématique. Dans un premier temps, un mode d'emploi d'une imprimante Ultimaker 3E a été demandé à un groupe d'élèves INSA et un groupe d'élèves INU. Ils travailleront ensemble sur cet équipement qu'ils connaissent tous afin de traiter le même problème avec les outils et leurs connaissances respectives. L'idée globale est d'exploiter la complémentarité des points de vue afin de faire ressortir les domaines d'emploi des approches et technologies.

Il serait bien que, dans un second temps, les élèves puissent appliquer une approche similaire à l'utilisation du poste d'assemblage. Il est certain que cette étude génèrera des

activités intéressantes à aborder par nos élèves. Ils les utiliseront prochainement au sein du tissu industriel afin de faciliter et rationnaliser des tâches complexes.

C. *La RA tantôt l'outil et tantôt la science*

Les principaux résultats du travail entrepris concernent *l'outil réalité augmentée*. La finalisation du poste d'assemblage concrétisera l'intégration de la réalité augmentée au sein des activités d'enseignement au travers de la manipulation d'assemblage prévue en 3IC. Les élèves se pencheront sur la problématique d'un ordre d'assemblage et la nécessité d'un mode opératoire. La réalité augmentée permettra de tester divers scénarii sans que la présentation de ceux-ci soit longue et complexe. Ils exécuteront des assemblages en étant guidés par des scénarii indiqués par la RA et pourront à ce titre se pencher sur la quantification de l'efficacité des différentes solutions. *La RA sera leur outil pour l'études des gammes d'assemblage*.

Le développement de solutions utilisant la réalité augmentée passe par l'identification d'actions RA comme l'a montré le stage de M. Ghobrial (Tableau 1). Cette scénarisation est une étape délicate car elle nécessite la connaissance du problème, des objectifs visés par la démarche et la connaissance des possibilités des outils utilisés (technologie des capteurs et logiciel RA). Il s'agit là d'une activité de synthèse qui ne peut être abordée que par des élèves en fin de formation. Au cours des activités associées, la réalité augmentée est alors l'objet de l'étude, la science abordée.

VII. Conclusion

L'étude présentée a permis de décrire la mise en place d'un enseignement de réalité augmentée au Département de Génie Mécanique de l'INSA de Toulouse. Cette activité est articulée autour d'un poste d'assemblage développé spécialement pour elle. Ce poste, qui est actuellement en cours de réalisation, permettra d'utiliser la réalité augmentée (aspect applicatif) et de développer des scenarii (aspect prospectif). De façon marginale l'aspect technique du « trackage » des objets sera abordé et il est envisagé de le connecter avec l'impression 3D FDM afin de produire des « cibles » dont l'efficacité de repérage sera testée.

Cette étude s'appuie sur le résultat du stage de M. Mina Ghobrial et il est important de rappeler que la quasi-totalité du stage a été réalisée en situation de confinement. Malgré cela, le travail réalisé est conséquent et d'une qualité qui révèle clairement l'implication de M. Ghobrial dans son travail.

Cette approche a donné lieu à des échanges et à un début de collaboration avec les collègues de l'INU Champollion d'Albi afin de progresser sur la maîtrise des technologies. Elle permet, outre une synergie spécifique, de compléter les points de vue de chacun sur un sujet commun. Dans ce cadre une étude RA sur l'utilisation d'une imprimante 3D Ultimaker 3^E débute dès la fin janvier. Les élèves devront produire une partie de travail commune et une partie de travail indépendant.

D'un point de vue industriel, l'accompagnement des sociétés Thales Alenia Space (site de Toulouse) et ROBOCORTEX respectivement pour les applications à l'assemblage et le développement de RA confortent l'intérêt de notre démarche.

Quelques idées sont apparues au fil du stage et du projet. La première est le développement d'une formation d'enseignant à de nouveaux matériels en utilisant la RA et la réalité virtuelle. La deuxième est un travail de thèse sur les méthodes d'apprentissage, au sein du Génie Mécanique, utilisant la RA. Dans cette dernière étude une comparaison des technologies et des méthodes associées est envisagée et le critère d'efficacité associé devra être créé.

VIII. References

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte au moyen de leur identifiant entre crochets [1], [2], … Les numéros, croissants, correspondent à l'ordre de citation. [références_biblio]

[1] Hamdi BEN ABDALLAH. "Inspection d'assemblages aéronautiques par vision 2D/3D, en exploitant la maquette numérique et la pose estimée en temps réel", Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, 2020.

[2] T. Herrmann, C. Migniot, and O. Aubreton. "Cracks detection on glass object based on active thermography approach." In: 14th International Conference on Quality Control by Artificial Vision (QCAV). Vol. 11172. Mulhouse, France: SPIE, 2019

[3] J. Miranda, J. Veith, S. Larnier, A. Herbulot, and M. Devy. "Machine learning approaches for defect classification on aircraft fuselage images aquired by an UAV." In: 14th International Conference on Quality Control by Artificial Vision (QCAV). Vol. 11172. Mulhouse, France, 2019, pp. 49–56

[4] D. Berndt. Digital Assembly Inspection: Automatic Quality Control Even for Small Quantities. 2013. url: https://idw-online.de/en/news532655 (visited on 12/15/2020)

[5] B. Karabagli. "Vérification automatique des montages d'usinage par vision - Application à la sécurisation de l'usinage." Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, 2013.

[6] MFJA : « Maison de la Formation Jacqueline Auriol », structure regroupant des établissements toulousains de la mécanique, https://www.mfja.fr/.

[7] Robocortex : "AugmentedPro", https:\\www.augmentedpro.com

Formation à la réalité virtuelle pour l'industrie 4.0

Frédéric Noël
Grenoble-INP UGA, G-SCOP
46, avenue Felix Viallet
Grenoble, France
frederic.noel@grenoble-inp.fr

Romain Pinquié
Grenoble-INP UGA, G-SCOP
46, avenue Felix Viallet
Grenoble, France
romain.pinquie@grenoble-inp.fr

Résumé.

Dans cet article, nous présentons une unité d'enseignement visant la formation d'étudiants d'écoles d'ingénieurs aux usages des technologies de réalité virtuelle et augmentée pour l'industrie 4.0. Ces technologies ne sont pas récentes mais sont en pleine évolution. Il y a lieu de trouver un équilibre entre concepts techniques et solutions commerciales qui ont une pérennité réduite. Il ne s'agit pas d'enseigner un environnement logiciel ou un périphérique, mais d'utiliser des périphériques pour percevoir les opportunités d'usage dans les processus industriels. Nous optons donc sur l'enseignement de la mise en place d'une chaîne numérique qui intègre des technologies de réalité virtuelle ou de réalité augmentée.

Mots-clés — Enseignement, Réalité Virtuelle, Réalité Augmentée, Industrie 4.0, Chaîne numérique.

I. INTRODUCTION

La réalité virtuelle et la réalité augmentée, la réalité étendue (XR), sont des concepts et des technologies qui ne peuvent être considérés comme récents. Cependant, ces technologies restaient essentiellement des objets d'études en laboratoire spécialisé et, plus rarement, dans des équipes R&D de grands groupes industriels. L'apparition de casques de réalité virtuelle très bon marché au milieu de la décennie passée ont permis d'envisager un déploiement extensif dans divers domaines – artistique, patrimoine numérique, jeu vidéo, etc. –, dont des applications professionnelles pour le bureau d'études, la formation aux postes de travail [1, 2].

La formation présentée ici est dédiée aux élèves ingénieurs de Grenoble-INP génie industriel. Le développement d'une vision de l'usine du futur et sa déclinaison technique via le concept de l'industrie 4.0 [3] promeut le dépassement d'une fracture numérique que subit encore aujourd'hui une grande partie du secteur industriel. Les technologies mises en avant allient cobotique, internet des objets, fabrication additive, intelligence artificielle, mais aussi réalité virtuelle et réalité augmentée [4].

Certaines grandes entreprises notamment du secteur automobile et de l'aéronautique ont construit des protocoles d'usages de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée pour des processus métiers : étude ergonomique, analyse de design, aide à l'assemblage, formation à des procédures de travail en environnement dangereux, etc. Cependant, la plupart des industriels restent dubitatifs sur les possibilités de déploiement de ces technologies pour leurs processus métiers.

Quels processus transformer en priorité ? Quel périphérique installer ? Quelle pérennité ? Quelle gestion du changement ? Quel risque hygiène et sécurité pour les personnels ? La maturité des technologies n'est sans doute pas encore parfaite mais compte tenu de la rapidité d'évolution actuelle, la génération d'ingénieurs formés dans la décennie 2020 sera confrontée et actrice du déploiement de ces technologies. L'unité d'enseignement créée au sein de Grenoble-INP génie industriel a pour objectif de préparer des étudiants spécialistes du développement ou de l'industrialisation de produits mais aussi de la gestion d'atelier ou de logistique, à l'usage et au déploiement de ces technologies en environnement industriel.

II. DIFFÉRENTES FORMES D'USAGE DES DISPOSITIFS XR EN ENSEIGNEMENT

L'enseignement de XR en génie industriel consiste à former des étudiants non informaticiens à des technologies essentiellement perçues comme des outils informatiques même si les compétences sous-jacentes sont en fait interdisciplinaires [5,6]. Nous dégageons plusieurs niveaux de compétences pour la conception d'environnement de réalité virtuelle :

- l'information sur les technologies. Les étudiants doivent être conscients de l'existence des technologies, des opportunités qu'elles offrent, mais aussi de leurs limites,
- l'usage de solutions expertes dédiées à des tâches spécialisées sont un moyen d'appréhender par l'usage l'intérêt de ces outils mais cela requière d'accéder à des solutions clé en main. Cela signifie des solutions d'ingénierie adaptées à des interfaces de réalité virtuelle ou augmentée ce qui encore assez rare,
- la création d'environnements virtuels est une autre compétence nécessaire dès que l'on sort des applications clé en main. Elle requière la manipulation de modèles géométriques, en particulier leurs conversions en modèles polyédriques, ainsi que la définition de comportements plus ou moins complexes. Ces comportements font en général l'objet de développements de scripts, lesquels sont au premier abord assez simples, mais mobilisent rapidement des compétences en génie logiciel.
- dans les cas les plus avancés, les étudiants développent des preuves de concepts, en construisant des applications dédiées à des usages. Cela a lieu dans le

cadre de projets purement orientés réalité virtuelle ou dans des projets de développements de produit intégrant une interaction de réalité virtuelle ou augmentée. On est alors dans une compétence de conception d'un produit qui intègre des périphériques de XR et du développement logiciel, mais qui doit être adapté à des spécifications et usages métiers. Dans ce cadre, il est souvent nécessaire de maîtriser les concepts, méthodes et outils de rendu graphique, mais aussi la communication multi-process pour créer des applications de faible latence. Par ailleurs, il est pertinent de développer des compétences sur les capteurs et actionneurs des systèmes d'interaction (tactile, vocale, audio, etc.).

Ces degrés de compétences vont de l'usage de base au développement approfondi dans une optique de développement ou déploiement de solutions associées aux tâches expertes. La compétence de développement est souvent discutable pour des ingénieurs non informaticiens, mais il apparaît que dans le monde industriel ce sont encore aujourd'hui des experts métiers qui tentent de développer les premières preuves de concept avant de les industrialiser avec leur service informatique ou via des sous-traitants. A ce stade, la situation est analogue au développement des outils de CAO puis d'applications métiers durant les années 90. On peut supposer qu'en réalité virtuelle ou augmentée, on se trouve dans un niveau de maturité équivalent, même si l'évolution semble s'accélérer.

Il existe d'autres usages de la réalité virtuelle ou augmentée pour les formations. En effet, des environnements virtuels peuvent participer à la formation aux expertises métiers. Par exemple, il est possible de former des étudiants à l'usage d'une machine-outil ou à l'assemblage et désassemblage de systèmes mécatroniques. Cette virtualisation de la formation a des avantages indéniables, car elle permet de laisser les étudiants pratiquer là où des travaux pratiques traditionnels restent limités. Cependant, cela nécessite une force d'ingénierie pédagogique pour développer les modèles virtuels. Nous pouvons faire le constat qu'une école ou une UFR dispose rarement de cette compétence. Elle peut initier ce type de solution dans le cadre de projets mais l'effet boule de neige n'est atteint que par la volonté d'enseignants passionnés. De plus, il est évident que la formation en environnement virtuel ne peut être que complémentaire de TP physiques où, par exemple, les sensations d'efforts de montage et démontage, les degrés de précisions et d'imperfection font partis des perceptions à expérimenter.

Par ailleurs, il existe un champ plus confidentiel : la formation énactive [7]. Une formation énactive considère que l'apprentissage par le geste ou par la perception sensorielle est complémentaire de l'enseignement traditionnel des concepts. Ainsi, les environnements de réalité virtuels permettent de percevoir des concepts complexes à appréhender. Par exemple, les forces de van der Waals qui caractérisent l'interaction interatomique et qui ne sont pas perceptibles à l'échelle humaine peuvent être ressenties au moyen d'un environnement virtuel couplé à un système haptique. Le test en réalité virtuelle permet de faire comprendre le concept en quelques secondes.

Au sein de Grenoble-INP génie industriel nous travaillons dans ces différentes directions de formation et d'usage de la réalité virtuelle et augmentée, mais cet article témoigne d'une unité d'enseignement, centrée sur la conception et le déploiement d'environnements de réalité virtuelle ou augmentée.

III. Chaînage numérique pour l'industrie 4.0 intégrant la réalité virtuelle

La conception et le déploiement d'environnement de réalité virtuelle ou augmentée pour des expertises métier ne conduit à des résultats utiles que si elle correspond à un besoin pour l'expertise. Elle ne peut donc pas se traiter isolément sans évoquer l'analyse du contexte métier. Les compétences de base de nos élèves ingénieurs sont alors directement mobilisées. Même si ces compétences ne sont pas encore aguerries, il s'agit du domaine qu'ils maîtrisent le mieux.

A. Analyse du contexte de mise en œuvre

On ne déploie pas un environnement virtuel efficace sans une analyse du contexte. Il est donc nécessaire pour les étudiants de formaliser une démarche d'analyse et de restitution de ce contexte. Ainsi, nous préconisons une méthodologie basée sur l'expérience des projets de recherche vécus par les auteurs. Il s'agit d'appréhender le contexte en modélisant le processus métier existant en commençant par répondre à des questions simples :

- Quelles sont les parties prenantes et leur rôle ?
- Quelles sont leurs tâches ?
- Quelles sont les données d'entrée et de sortie de ces tâches ?
- Quelles ressources sont nécessaires et à disposition ?
- Quelles sources d'informations existent dans l'entreprise ? quel est leur niveau de cohérence ? Sont-elles utilisées ou négligées ? Renseignées automatiquement ou manuellement ?
- Quelles sont les sources d'erreurs et d'inefficacité ?

De fait, nous sommes convaincus que revisiter les processus existant en améliorant l'interaction sur les données en évitant autant que faire se peut les doubles saisies est un vecteur pour promouvoir intelligemment de nouvelles solutions technologiques.

B. Système d'information pour la chaîne numérique

Le problème de fond n'est plus le dispositif de réalité virtuel ou augmenté mais la maîtrise du système d'information de l'entreprise, lequel est souvent complexe. La réalité virtuelle ou augmentée est alors l'outil de simplification de l'interaction entre l'homme et l'information. Cette simplification a pour objectif essentiel de redonner le contrôle de « l'intelligence artificielle » à l'opérateur humain. Ainsi, l'unité d'enseignement doit insister sur le développement d'une chaîne numérique d'informations :

- par la modélisation d'un système d'information intégrateur des sources existantes : dans ce cadre le choix est de former les étudiants à de la modélisation de système d'information au travers de diagrammes de modélisation de données tels que UML,

- par le développement de bases de données. Nous avons opté sur des solutions NoSQL à base de graphes. Ils pratiquent cela via la technologie Neo4J. L'utilisation d'une base de données NoSQL est particulièrement adaptée aux Big Data et, *ipso facto*, à l'implémentation de « Digital Thread » [8,9].
- en parallèle, un cours synthétise les sources d'informations traditionnelles de l'entreprise. Celles-ci incluent les solutions présentes du côté des études (CAO, SGDT, PLM) et de la production (ERP, MES, SCADA). Analyser les failles de l'usage pratique de ces outils est un élément majeur pour la conception d'une chaîne numérique adaptée.

C. *Infrastructure*

Dès que la chaîne numérique est modélisée dans son contexte actuel, il est nécessaire de spécifier la chaîne numérique souhaitée. Distribuer l'information requière des réseaux mais ne doit pas perturber la production existante. Le déploiement de nouvelles solutions technologiques passe souvent par le déploiement d'un réseau informatique, nouveau, doublant éventuellement celui qui gère la production.

Les étudiants doivent être informés des capacités de solutions réseaux existantes, des contraintes qu'elles imposent en terme de flux de données, et en particulier la latence qu'elle introduit dans les dispositifs de réalité virtuelle ou augmentée.

Par ailleurs, même si nous ne développons pas cet aspect par manque de compétence dans le domaine, il est nécessaire de sensibiliser les étudiants aux problèmes de cyber-sécurité engendrés par ces réseaux.

D. *Spécifier un environnement virtuel*

Une fois le système d'information établi et l'infrastructure spécifiée, on peut imaginer interagir avec l'information via des environnements virtuels. Nous reprenons ici les niveaux de compétences développés à la section précédente. Les étudiants sont d'abord informés de l'ensemble des solutions techniques existantes par la présentation des briques de réalité virtuelle et de réalité augmentée.

Ils sont ensuite formés à la création d'environnements virtuels par transferts de géométrie depuis les environnements CAO ou les solutions de scan et l'import dans des outils dédiés à la création d'environnement immersif du type Unity3D ou Unreal. En pratique, les étudiants sont invités à se former aux bases de la modélisation dans Unity3D.

Enfin, ils mettent en pratique la connexion de l'environnement 3D avec le système d'information en développant des requêtes au système d'information depuis l'environnement 3D via une API Neo4J. Ainsi, des requêtes Neo4j sont exécutées selon les interactions dans les scènes Unity3D. Les applications étant principalement vouées à l'industrie, on attache donc également une importance significative à la modélisation des comportements des systèmes dynamiques avec les capacités de base de Unity mais aussi avec l'intégration de logiciels de simulation multiphysique et les stratégies d'interopérabilité associées [10].

Ces activités pratiques démystifient la phase de développement d'une application de XR sans pour autant transformer les étudiants en développeurs. Néanmoins, ceux-ci sont alors à même d'imaginer les conséquences en terme de développement de ce qu'ils spécifient au regard d'un processus métier. Cependant, ils doivent encore percevoir l'intérêt d'utiliser des périphériques de réalité virtuelle ou augmentée.



Figure 1. LA PLATEFORME VISION-R (VUE D'ENSEMBLE)

IV. DES TRAVAUX PRATIQUES EN RÉALITÉ VIRTUELLE OU AUGMENTÉE

La perception des capacités des périphériques de réalité virtuelle ou augmentée est fortement empreinte de la communication commerciale autour de ces technologies. Rares sont les étudiants qui, par expérience, ont conscience des avantages et des inconvénients de ces technologies. Il est évidemment possible de présenter des taxonomies de systèmes et ceci est réalisé en cours mais une fois ces taxonomies établies, il est très important de percevoir les effets induits. Quelle différence entre une immersion dans un CAVE et un casque ? entre un système holographique et des lunettes stéréoscopiques « see-through » ? Pour cela, des travaux pratiques nous paraissent être les meilleurs vecteurs de perception de l'intérêt d'une technologie.



Figure 2. LE CAVE MIHRIAD

A. *La plateforme VISION-R*

Nous disposons d'un environnement complet de mise en œuvre des différentes fonctions de réalité virtuelle et augmentée. La plateforme VISION-R (Figure 1) a été initiée par le

laboratoire G-SCOP, l'école Grenoble-INP Génie Industriel et le pôle AIP-Primeca Dauphiné Savoie. Le laboratoire G-SCOP ait fortement investi dans le développement de cette plateforme technique au travers du projet d'infrastructure européenne VISIONAIR (piloté par G-SCOP) et enfin via différents projets industriels et académiques. D'ailleurs, cet investissement continue avec la labellisation récente par l'ANR de l'EQUIPEX+ CONTINUUM. La plateforme consiste en deux espaces et sera, d'ici quelques mois, étendue à un troisième espace.



Figure 3. MUR D'IMAGE STEREOSCOPIQUE ET BRAS HAPTIQUE



Figure 4. POWER WALL ET TABLE TACTILE 4K

Ainsi la plateforme dispose :

- d'un cave 5 faces avec solution de tracking (Figure 2)
- d'un écran holographique,
- d'un mur stéréoscopique Full HD (Figure 3)
- de 5 postes HMDs
- de 3 casques Hololens 1 et 2
- d'une zone de tracking
- d'un bras haptique Haption (Figure 3)
- d'un système de type fantôme de Pepper superposés
- de deux tables tactiles (Figure 4)
- d'un espace de video-mapping pour de la RA 3D
- de solutions de type tablettes pour la RA 2D
- d'un mur d'image UHD (6K) (Figure 4)

Il est donc possible de tester divers périphériques et quasiment toutes les fonctions d'immersion visuelle et d'augmentation du réel.

B. Le développement de Travaux pratiques

Les travaux pratiques proposés aux étudiants sont directement tirés de preuves de concepts développés dans le cadre des travaux du G-SCOP. Ainsi nous proposons 10 sujets de travaux pratiques. L'objectif de ces travaux pratiques est de laisser les étudiants percevoir l'usage de chaque dispositif :

1. Import de modèle CAO en réalité virtuelle
2. Séquence de désassemblage dans un CAVE
3. Séquence de désassemblage dans un casque
4. Simulation du comportement d'un système multiphysique en interaction avec un opérateur humain dans un casque de réalité virtuelle
5. Analyse des rendus holographiques ou type fantôme de Pepper
6. Manipulation collaborative d'un jumeau numérique [9] d'usine sur table tactile [11,12,13]
7. Dépose précise (sans mesure) de capteurs sur un bâtiment pour de l'analyse non destructive par réalité augmentée.
8. Formation autonome au poste de travail industriel via support SeeThrough (Hololens) et comparaison avec un support sur tablette tactile [14].
9. Revue de projet sur CAVE, HMD ou Powerwall
10. Utilisation de la réalité augmentée pour simuler le déplacement d'un système encombrant dans les couloirs du bâtiment.

Cette liste de TP est étendue à d'autres usages en fonction des développements par le laboratoire et les étudiants. Nous tentons notamment de mettre en place un TP impliquant de la synthèse sonore dans l'environnement virtuel.

Il est indéniable que la perception de l'intérêt des outils de réalité virtuelle ou augmentée évolue de manière très concrète au travers de ces travaux pratiques.

V. ÉVALUATION DE L'UNITÉ D'ENSEIGNEMENT

L'évaluation de l'enseignement n'est pas directement liée à l'achèvement des travaux pratiques ou des TDs, et ce, même si

cela est prise en compte. La part majeure de l'évaluation porte sur un projet individuel développé par chaque étudiant.

A. Étude de cas personnelle

En début de semestre, il est demandé à chaque étudiant de rapporter une situation de travail qu'ils ont vécu lors d'un stage antérieur. La description de leur activité fait l'objet d'un premier livrable.

A partir de cette description, les étudiants sont invités à spécifier une évolution de l'activité pour la simplifier ou l'optimiser via, d'une part, une chaîne numérique intégrée et, d'autre part, la mise en œuvre d'un environnement virtuel. Ils sont alors libres de choisir le scénario de leur choix à condition que celui-ci soit supportés par des arguments convaincants.

Tout au long du semestre, ils sont accompagnés par les enseignants pour réfléchir à la mise en place d'un système d'information adéquat qui se matérialise d'un modèle de données et d'une implémentation dans la base de données Neo4J. Il leur est aussi demandé de spécifier une interface homme-machine pour les opérateurs en se basant sur l'ergonomie attendue et la précision en tenant compte de la valeur ajoutée finale pour les opérateurs.

A la fin du semestre, chaque étudiant présente à l'ensemble de la promotion sa solution et cela fait l'objet d'un rapide débat. Il est à noter que certaines solutions sont parfois surprenantes. On relève une évolution forte de la justification des solutions proposées qui deviennent des spécifications très pragmatiques et pourraient être retravaillées pour des études de déploiements industriels. Quels étudiants en filière d'apprentissage on d'ailleurs directement travaillé sur des solutions dont ils avaient la responsabilité du déploiement chez leur employeur.

B. Études de cas 2020

Les cas d'études dépendent directement des étudiants. Sur la session 2020, avec 28 étudiants inscrits, nous rencontrons des sujets liés à leurs stages récents. L'école formant des ingénieurs en développement de produit et des ingénieurs pour la chaîne logistique, nous rencontrons forcément des cas d'études dans ces deux domaines :

- des études de process métiers : assistance aux opérateurs. Les solutions de réalité augmentée sont en général privilégiées (assemblage de grands ensembles aéronautique, finition de chaussures, de ski, etc.),
- des études de gestion des stocks où les solutions de réalité augmentée pour suivre des pièces ou des équipements de transports sont souvent proposées,
- des scénarios de collaborations multi-site, entre bureaux d'études et production, où la mise à disposition d'informations à jour sont primordiales,
- du support à la formation au poste de travail ou à des équipements complexes,
- et des cas d'études moins attendus comme la gestion des files d'attentes pour les repas étudiants du CROUS.

De fait ces cas d'études mettent clairement en évidence que la clé de voûte pour le déploiement de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée est avant tout la maîtrise du process et sa numérisation au moyen d'un système d'information. La connexion à des interfaces plus ou moins évoluées, elle, n'est pas secondaire, mais n'est possible et ne fait sens que lorsque la chaîne numérique associée à un processus métier est bien formalisée. Certaines solutions débouchent alors sur des interfaces hommes machines relativement traditionnelles sans équipement de RV ou RA usuellement attendus : de bons capteurs et des solutions de notification d'informations plus ou moins évolués.

Les principales difficultés rencontrées par les étudiants sont une méconnaissance du potentiel des technologies. Il est rapide d'imaginer disposer d'une information en réalité augmentée 3D sans maîtriser la tolérance de positionnement des informations. L'expérience en TP est alors fondamentale pour démystifiées les informations grand public et les promesses commerciales des vendeurs de périphériques.

VI. Conclusion

Cet article présente une unité d'enseignement récemment développée à Grenoble-INP génie industriel. Elle s'adresse aux étudiants en 3ème année de l'école et aux étudiants en master 2. Cette Unité d'enseignement est opérée par les deux auteurs de l'articles et correspond à 54h équivalent TD en présentiel (enfin en temps normal hors crise sanitaire) et valident 6 ECTS pour les étudiants.

L'originalité de cette UE est de ne pas focaliser uniquement sur les technologies de réalité virtuelle mais de les positionner dans un processus d'amélioration des activités expertes en contexte industriel. Notre recul est encore limité puisque cette unité d'enseignement a été initiée en 2019-2020 et malheureusement la seconde session a été amputée sur le présentiel et bien malheureusement sur les TPs proposés.

Nous ne visons pas à une analyse pédagogique ou didactique de la forme donnée à cette UE mais souhaitons la présenter en témoignage de ce qui peut être fait, certes avec les moyens importants qui sont à notre disposition, afin de pouvoir débattre et partager dans la communauté des solutions pour former nos étudiants à ces nouvelles technologies.

Nous souhaitons évidemment continuer à développer cette démarche en augmentant le nombre de travaux pratiques et en développant les activités de projets pour étendre les démonstrateurs d'usage de ces moyens. Nous souhaitons aussi l'adoption de ces outils dans des activités d'expertises traditionnelles (bureau d'études, conception de layout, gestion de flux de production, etc) en relation avec les autres plateformes du site grenoblois. Enfin, il sera aussi pertinent d'utiliser ce type de moyen pour virtualiser une partie de la formation à l'école.

VII. Références

[1] A. SETH , J. M. VANCE , and J. H. OLIVER , "Virtual reality for assembly methods prototyping: A review," Virtual Real., vol. 15, no. 1, pp. 5–20, Mar. 2011.

[2] L. P. BERG and J. M. VANCE , "Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: a survey," Virtual Real., vol. 21, no. 1, pp. 1–17, Mar. 2017.

[3] H. KAGERMANN, W. WAHLSTERr, J HELBIG. Recommendations for implementing the strategic initiative , Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group, Working Group, 2013.
[4] Alliance Industrie du Futur, “Guide des technologies de l’Industrie du Futur,” 2018.
[5] P. FUCHS. Les interfaces de la réalité virtuelle. P. Fuchs. Les Presses de l'École des Mines de Paris (1996)
[6] P. FUCHS. Théorie de la réalité virtuelle - Les véritables usages. Les Presses des MINES, 2018.
[7] M. CHRISTOU , “Enaction, interaction multisensorielle : théorie, technologie et expériences pour les arts numériques,” Université de Grenoble, 2014.
[8] T. D. HEDBERG , M. BAJAJ , and J. A. CAMELIO , “Using Graphs to Link Data Across the Product Lifecycle for Enabling Smart Manufacturing Digital Threads,” J. Comput. Inf. Sci. Eng., vol. 20, no. 1, 2020.
[9] M. BAJAJ and T. HEDBERG , “System Lifecycle Handler - Spinning a Digital Thread for Manufacturing,” INCOSE Int. Symp., vol. 28, no. 1, pp. 1636–1650, 2018.
[10] V. ROMERO, R. PINQUIÉ , and F. NOËL , “A computer-aided verification process for engineered systems,” in Conférence International Génie Industriel QUALITA, 2021, p. (in press).
[11] M GRIEVES.. Virtually perfect: Driving innovative and lean products through product lifecycle management Space Coast Press, 2011
[12] F. NOËL, G. ALPAN, F. MANGIONNE, A Complete Digital Chain to Enable the Digital Twin of a Shop Floor. IFIP International Conference on Product Lifecycle Management 2020, p 128--138. Springer,
[13] L. GUITARD, F. NOEL, D. BRISSAUD, Implementation of a Digital Twin Starting with a Simulator, IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, 2020, pp 139--149, Springer.
[14] A. PUSCH, F. NOËL, Augmented Reality for Operator Training on Industrial Workplaces – Comparing the Microsoft HoloLens vs. Small and Big Screen Tactile Devices, Conference PLM2019, 2019, Springer.

Détection d'Intention dans un Environnement de Conception en Réalité Virtuelle

R. Guillaume, X. Laville, Y. Baudin
Airbus Operations SAS
316 route de Bayonne
31060 Toulouse – France
romain.r.guillaume@airbus.com

R. Guillaume, J. Pailhès, E. Gruhier
I2M ENSAM Bordeaux
Esplanade d'Arts et Métiers
33400 Talence – France
romain.guillaume@ensam.eu

R. Lou
Arts et Métiers Institute of Technology
LISPEN, HESAM Université, UBFC
71100 Chalon-Sur-Saône, France

Résumé— Ce papier présente une méthode qui devra être capable de traduire les intentions de concepteurs appartenant à différents corps de métier en instructions pour un système immersif basé sur la réalité virtuelle. Ce dernier sera utilisé pour les phases d'allocation d'espace et d'architecture. La méthode est développée dans le cadre de la conception préliminaire d'avions chez l'avionneur Airbus durant les phases d'allocation d'espace et de création d'exigences techniques. Pour répondre à la complexité et la diversité des intentions pouvant être traduites dans le logiciel, nous proposons un modèle en quatre parties (adaptation, extraction d'intentions, extraction de paramètres et traduction en instructions) ainsi que la logique de construction et les différentes difficultés à prendre en compte pour répondre aux besoins de l'outil notamment en termes de performance en temps réel.

Mots-clés— conception, réalité virtuelle, machine learning, intention, langage corporel

I. INTRODUCTION

L'optimisation des processus de conception est au cœur de nombreuses recherches de par la volonté de l'industrie aéronautique de réduire au maximum le nombre et la durée de leurs cycles de production. Ceux-ci souhaitent rester compétitifs sur le marché en proposant des produits en phase avec les derniers progrès technologiques tout en intégrant au plus tôt un maximum de problématiques liées au développement du produit comme les problématiques d'industrialisation ou de maintenance par exemple. Cette constatation est d'autant plus vraie que les produits deviennent de plus en plus complexes, avec des durées de développement qui peuvent parfois dépasser la décennie. La collaboration entre les différents corps de métiers et la simplicité d'utilisation des outils de conception sont des axes de recherches privilégiés qui ont poussé des entreprises comme Airbus à proposer des outils de conception en réalité virtuelle pour les phases d'architecture et d'allocation d'espace de leurs projets [1]. L'utilisation de cette interface immersive sur des cas d'étude a permis de réduire significativement le temps de cycle de conception, faisant par exemple passer la durée de définition d'un harnais électrique de six mois à trois semaines.

L'immersion à échelle 1:1 permet d'avoir une meilleure appréhension des produits, concepts, instructions représentés, en permettant au besoin une superposition entre le réel et cette représentation. Cependant, la mise en place de ces dispositifs nécessite souvent un équipement spécial (casque, lunettes, manettes…) et/ou un apprentissage du langage et de l'ergonomie de l'outil (organisation des menus, commandes boutons et joysticks de la manette…) pour traduire convenablement les intentions de conception des acteurs. Ainsi, l'intermédiation d'un contrôleur est très souvent nécessaire pour traduire les intentions en actions, d'autant plus lorsque celles-ci deviennent diversifiées et complexes. Il existe aujourd'hui différentes manières d'opérer la réalité virtuelle [2] comme les casques de réalité virtuelle ou les salles dotées de larges écrans stéréoscopiques.

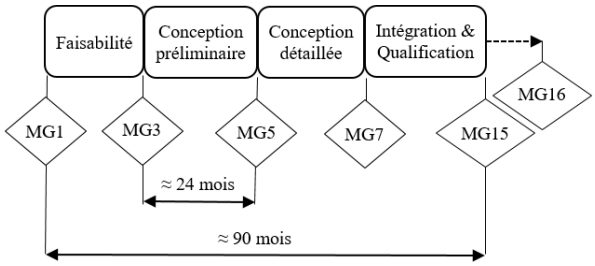


Figure 1. PLANNING DE DEVELOPPEMENT DE PRODUIT AIRBUS

Un programme Airbus est planifié sur 90 mois répartis en 16 "Maturity Gates" (MG) allant de MG1 à MG16 (Figure 1). Notre étude se focalise ainsi sur la période entre MG3 et MG5 correspondant à la phase d'architecture et qui dure environ 24 mois. Cette phase a pour but de générer les différentes allocations d'espace et exigences pour chacun des groupes fonctionnels du produit (électrique, pneumatique…) à partir des objectifs du programme ou "Top Program Objectives" (TPO) livrés à la fin de MG3. La vue du produit passe alors progressivement d'une vue fonctionnelle à une vue physique.

Nous cherchons ainsi à mettre au point un outil de détection d'intentions de conception pour les opérations d'architecture et d'allocation d'espace ne nécessitant pas d'équipement ni d'apprentissage de l'outil par l'utilisateur. Il devra répondre aux besoins des architectes et permettre de renforcer la collaboration des différents acteurs (structure, hydraulique, pneumatique, électrique, système…) dans une même scène de réalité virtuelle. Un exemple de scène serait deux architectes système et structure collaborant des emplacements et dimensions des meubles pour optimiser la répartition des masses de la structure de l'avion. Chacun manipulerait la ou les pièces avec des gestes, en assignant des fonctions à chaque

sous-ensemble notamment grâce à l'interprétation des paroles des architectes.

L'état de l'art autour de la détection d'intentions et des technologies fréquemment rencontrées pour y parvenir est détaillé dans la Section (II), nous proposerons une méthodologie de recherche développée dans la Section (III).

II. ÉTAT DE L'ART

Dans cette section, nous verrons d'abord les techniques couramment employées pour catégoriser de l'information en général (A), puis sur les tentatives empiriques de classification du langage corporel (B) et enfin sur les méthodes utilisées pour détecter l'intention sans intervention humaine (C).

A. Catégorisation

Par définition, la catégorisation est l'action d'organiser des choses par groupes de mêmes caractéristiques [3]. Par exemple, on peut catégoriser arbitrairement les nombres entiers en multiples de 2 et multiples de 3. On notera que suivant nos choix de catégories, certaines données n'appartiennent à aucune catégorie (par exemple le chiffre 5) tandis que d'autres appartiennent à plusieurs d'entre elles (par exemple le chiffre 6). Par ailleurs, l'extraction de certaines caractéristiques peut se réduire à un test de divisibilité, là où d'autres (détection de sourire) nécessitent généralement des outils d'apprentissage pour réussir correctement leur détection. La première catégorie ne nécessitant pas d'outil particulier pour organiser les données, nous nous intéresserons ici plus à la seconde. En effet, la résolution des problèmes avec de l'apprentissage induit des incertitudes sur les résultats qu'il faut pouvoir exploiter. Par exemple, un algorithme ayant appris à détecter si une critique de film est positive en étudiant la distribution des mots dans un message peut se tromper si la tournure est ironique.

Certains algorithmes d'apprentissage ont été pensés pour faire de la classification. Dans le cas des arbres de décisions, les comparaisons faites au niveau des nœuds aiguillent l'objet à classer vers une certaine catégorie, là où les machines à vecteur support segmentent l'espace des caractéristiques en deux (ou plus) catégories avec des frontières (ou marges). D'autres techniques conçues pour s'adapter à une plus grande variété de problème comme les réseaux de neurones ont nécessité la création de technique particulière pour ce type de problème. La plus utilisée d'entre elle étant le "one-hot-encoding" [4]. Cela consiste à obtenir un vecteur de probabilité en sortie de notre réseau afin de choisir la classe la plus probable. Il est également d'usage de prévoir une composante qui n'appartient à aucune classe. On notera également le "ordinal encoding" [4] qui consiste à faire correspondre chaque classe à un entier. Cette méthode induits une relation d'ordre entre les classes rarement désirée. Cependant, ces techniques ne sont pas suffisantes pour traiter les données appartenant à plusieurs classes.

Plusieurs stratégies existent pour résoudre le problème des données à plusieurs classes ou "multi-label" [5]. Les deux grandes familles de stratégie consistent à adapter quand cela est possible un algorithme existant (comme la technique des k voisins les plus proches), ou de transformer le problème "multi-label" en plusieurs problèmes "single-label" du paragraphe précédent. L'étude comparative recommande l'utilisation des algorithmes RF-PCT (Random forest of predictive clustering trees), HOMER (Hierarchy Of Multi-label ClassifiERs), BR (Binary Relevance) ou CC (Classifier Chaining).

B. Études empiriques des liens entre le langage corporel et l'intention

La plupart des études réalisées sur le langage corporel se focalisent sur la posture et la parole [6] [7] [8] [9]. On notera l'existence d'études sur les interfaces cerveau machine [10] sur lesquelles nous ne nous attarderons pas ici, celles-ci traitant souvent plus de la prédiction de mouvement (d'un membre manquant par exemple), que de la prédiction d'intention.

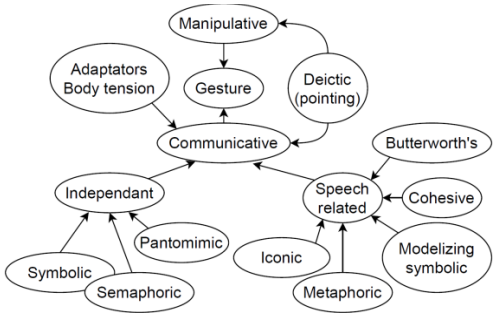


Figure 2. CATEGORISATION DES MOUVEMENTS (VULETIC ET AL., 2019)

Une revue systématique de la littérature sur la classification des mouvements [8] permet de dresser une ontologie des gestes (Catégorisation des mouvements (Vuletic et al., 2019)) réalisés par un humain. On distingue rapidement deux grandes catégories de gestes : les gestes de manipulation et ceux de communication, cette dernière catégorie étant elle-même subdivisée en deux autres catégories : les gestes indépendants de la parole et ceux qui y font directement référence. Hormis le couplage entre la parole et la posture de la personne qu'on retrouve souvent dans la littérature [9], on notera que la majorité des gestes répertoriés sont métaphoriques. En effet, même dans le cadre des gestes de manipulation, la personne est souvent amenée à manipuler un objet virtuel qu'elle imagine ou visualise entre ses mains. D'autre part, certains gestes du quotidien comme un "pouce vers le haut" sont directement liés à un langage gestuel appris par la personne ; certains de ces gestes peuvent être considérés comme universels (symboliques) alors que d'autres sont réservés à un groupe de personne ayant eu un apprentissage spécifique de ces gestes (sémantiques) comme par exemple le langage de communication des plongeurs. Enfin, les gestes dit "adaptateurs" ne contiennent aucun sens et ne servent qu'à relâcher les tensions musculaires.

Une autre étude a été menée sur l'élicitation de gestes et de paroles dans un contexte de conception assistée en 3D [6]. Un expert est alors chargé de réaliser l'action dans un logiciel de conception et d'évaluer à posteriori la simplicité de l'échange avec le participant pour réaliser les tâches. On notera que l'expert n'était pas perceptible par l'utilisateur afin d'éviter les échanges sociaux qui auraient pu nuire à l'étude. Par ailleurs, l'auteur insiste sur la diversité du panel de participants car les différences culturelles et de connaissances techniques pourraient influencer les résultats et mener à des conclusions non généralisables à toute la population [11]. L'expert note à

posteriori la compréhensibilité de l'interaction avec chaque participant. Les résultats montrent une meilleure compréhension avec les gestes et la parole notamment auprès des personnes n'ayant pas ou peu de connaissances en ingénierie mécanique (comme on pourrait avoir une intervention marketing dans un projet de personnalisation de cabine). De plus, les gestes sont catégorisés suivant différents critères puis croisées avec les actions auxquelles ils faisaient référence. Ces critères sont les mouvements relatifs des bras, la posture de la main, et le lexique oral. Les distributions statistiques par actions obtenues pour chacun de ces critères sont significativement différentes entre certaines actions, et en font un bon moyen de différencier l'action désirée par la personne.

C. Automatisation de la détection d'intention

1) Détection de l'intentionnalité

Les techniques les plus simples sont capables de détecter la conscience d'un évènement ou la volonté d'interaction d'une personne avec un objet particulier de la scène [12] [13]. Ces techniques ont la particularité d'être basées sur des heuristiques empiriques très simples et facilement compréhensibles.

Une étude sur la conscience partagée [12] montre que le suivi de la dilatation pupillaire d'une personne se révèle être un bon indicateur pour mesurer la concentration d'une personne sur un objet de la scène. L'expérimentation ayant traquée la dilatation pupillaire des participants s'est déroulée avec les participants assis devant un écran d'ordinateur équipé de caméras RGB et infrarouges.

D'autres études exploitent l'orientation du visage des participants. Une étude sur le partage collaboratif sur grand écran [13] monitore le temps passé à fixer une même zone de l'écran et infère une volonté d'interagir après un certain lapse de temps. Cette méthode présente l'inconvénient d'être fortement dépendante de la complexité de l'information consultée sur l'écran. Par ailleurs, la précision obtenue à partir d'une caméra stéréoscopique placée au-dessus de l'écran est limitée : un écran de 4x3m (LxH) a pu être subdivisé en 6x3 cellules au maximum avec un participant situé à 6m de l'écran. On note ainsi une meilleure précision sur l'orientation horizontale que verticale du visage. L'étude conclut aussi que l'utilisation d'un système de suivi du regard n'était pas adaptée aux écrans larges à cause de leur sensibilité à la lumière et la proximité du visage avec le capteur pour maintenir une précision acceptable. Une autre étude sur les interactions opérateur robot en atelier [14] utilise l'orientation de la tête et la direction du regard comme base de prédiction de la trajectoire d'un opérateur. La méthode décrite nécessite l'utilisation de lunettes de réalité augmentée pour les opérateurs ainsi que l'installation de caméras RGB dans l'atelier.

Ces différentes techniques parviennent à déterminer correctement l'intention des participants dans un contexte où le vocabulaire d'intention est très restreint comme prédire si un sujet a l'intention d'aller à gauche ou à droite sans plus de précisions. Elles deviennent limitées lorsque différentes intentions peuvent être portées sur un même objet ou une même région de l'espace.

2) Discriminants pour le choix de l'intention

Nous avons vu dans la partie expérimentale une étude ayant révélé en outre que la posture des mains était un bon indicateur pour le choix de l'intention du participant [6]. Plusieurs études sur la détermination automatique de la posture de la main ont été réalisées [15] [16] [17] [18]. De manière générale cette reconnaissance s'effectue en trois étapes. La première consiste à isoler la ou les mains du reste de l'image. Pour ce faire, il est possible de segmenter sémantiquement l'image [17], de détecter des points d'intérêt en lien avec la main [15], de reconstruire tout ou partie du squelette du sujet [16], ou encore de séparer l'arrière-plan du premier plan en déterminant une distance seuil puis d'étudier la répartition des points au premier plan pour deviner la position de la main [18]. Cette dernière approche, bien que rapide et transparente, suppose que la personne réalise ses gestes à une distance quasiment prédéfinie de la caméra en se tenant dans une position prédéfinie elle aussi (en l'occurrence face à la caméra). Dans un second temps, l'image de la main est traitée pour simplifier la détection de la posture. La zone d'intérêt peut ainsi être segmentée, normalisée [16] ou redressée dans le cas où celle-ci est fortement inclinée [17]. Enfin, la reconnaissance de la posture se fait généralement directement à partir de l'image traitée, soit en utilisant un réseau de neurone de convolution [16] ou dense [18] soit en utilisant la classification par plus proche voisin [7] [17]. Par ailleurs, une de ces études [17] montre une limite liée à la dynamique de la main. En effet, certains mouvements de main sont très rapides (salutations par exemple), et il n'est pas toujours simple de suivre la main et d'étudier convenablement sa posture.

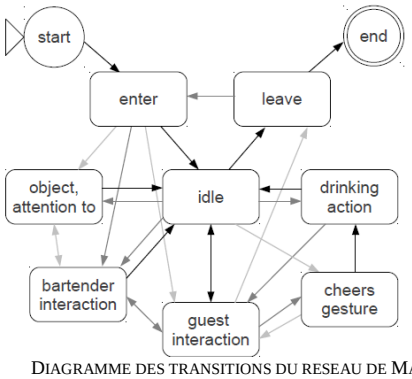


Figure 3. DIAGRAMME DES TRANSITIONS DU RESEAU DE MARKOV CACHE (GASHLER ET AL., 2012)

Une autre étude sur la reconnaissance du comportement en société pour un robot barman [19] propose de se baser sur trois critères pour déterminer l'intention. Premièrement, comme vu précédemment, le modèle va analyser l'orientation du visage du sujet. Puis, un second modèle étudie la posture du sujet. En effet, à l'instar de la pupillométrie vue plus haut, Gashler suggère qu'une personne penchée vers l'objet qu'elle regarde sera plus encline à vouloir interagir avec lui. Plus précisément, la configuration de cette inclinaison vis-à-vis des autres sujets est un indicateur de cette intentionnalité. Enfin, la concaténation des données précédentes est ingérée par un modèle de Markov caché (Diagramme des transitions du réseau de Markov caché (Gashler et al., 2012)) afin de prendre en compte l'historique des dernières intentions du sujet. Comme

pour les solutions précédentes, le vocabulaire des différentes intentions ou des états à repérer est supposé connu.

La détection du squelette d'une ou plusieurs personnes a connu de nombreux progrès notamment en termes d'acuité et de performances [20] [21]. La plupart des méthodes modernes consistent à repérer les articulations puis à chercher à y faire correspondre un modèle cinématique. Ces méthodes ont une bonne résistance à l'occlusion et offrent des performances compatibles avec le temps réel notamment grâce à l'accélération matérielle.

3) Le traitement du langage parlé

Le traitement du langage parlé s'est surtout développé à partir de la fin des années 90 [22] avec l'avènement de l'apprentissage par ordinateur. En effet, les précédentes tentatives de compréhension du langage étaient uniquement basées sur un couplage entre l'analyse grammaticale et lexicale du langage [22] [23]. Cette dernière approche avait l'inconvénient d'être souvent spécifique à une langue ou famille de langue et leurs logiques souvent complexes étaient difficiles à implémenter dans un programme informatique.

Ce secteur de recherche souvent appelé NLP pour "Natural Language Processing" regroupe l'ensemble des traitements de la langue et pas seulement la recherche d'une interprétation précise d'une phrase [24]. On citera par exemple les utilisations suivantes :

- Détection de la langue ;
- Détection du thème ;
- Détection de l'auteur ;
- Etiquetage grammatical d'une partie d'un discours (nature et fonction des mots de la phrase) ;
- Reconnaissance d'entités propres (noms propres, nom de ville, de sociétés…) ;
- Désambiguïsation : certaines tournures de phrase peuvent facilement être mal interprétées comme la phrase type en anglais : "One morning I shot an elephant in my pajamas" ;
- Extraction de l'arbre syntaxique d'une phrase ;
- Traduction automatique.

Ces différentes utilisations du NLP ont été rendues possibles grâce à la réduction de la complexité de programmation d'une part car la grammaire et le lexique de la langue sont (si nécessaires) directement contenus et appris dans les paramètres du modèle, mais aussi grâce au développement de nouvelles capacités de calculs des ordinateurs et plus précisément l'accélération matérielle. D'autre part, les données d'entrée de la plupart des algorithmes de NLP actuels sont sous forme de texte, les entrées sonores étant généralement converties en texte avant leur exploitation.

Des algorithmes de NLP plus complexes combinent plusieurs de ces disciplines ainsi que des mécanismes de "deep-learning" pour extraire des caractéristiques plus complexes comme l'intention de l'utilisateur dans le cas d'une interaction avec un assistant vocal par exemple [25] [26]. Certaines plateformes mettent à disposition des solutions intégrant plusieurs outils de compréhension du langage [27]. Ces outils permettent d'extraire une intention parmi un vocabulaire choisi, de prendre en compte l'historique des derniers messages en décrivant des scénarii possibles et enfin d'extraire les entités liées à cette intention. Il suffit ensuite de faire correspondre les actions correspondantes à l'intention et aux paramètres détectés.

D. Conclusion

Les méthodes de traitement des entrées vidéo et son décrites dans cette partie nous permettront d'extraire les caractéristiques pertinentes pour notre détection d'intention. Les méthodes de catégorisation nous permettront de même de traiter certains problèmes inhérents à notre étude comme la détection d'une ou plusieurs intentions. Cependant, elles restent encore incapables de prédire une ou plusieurs intentions dans un vocabulaire complexe tout en conservant une précision acceptable sans l'utilisation de contrôleurs supplémentaires.

III. METHODOLOGIE

Cette section détaille les étapes de conception de l'outil. Nous nous attarderons d'abord sur la définition de ses entrées et sortie, puis nous détaillerons dans l'ordre les différentes étapes pour concevoir les quatre composants de l'outil (adaptation, extraction d'intentions, extraction de paramètres et traduction en instruction).

A. Boîte noire

Tout d'abord nous allons chercher à représenter l'outil dans son environnement sous la forme d'une boîte noire (Le modèle boîte noire avec les entrées et sorties identifiées), avec des flux entrants et sortants correspondant aux informations utilisées et délivrées par l'outil. Nous commençons par les sorties qui découlent directement des attendus de l'outil. Dans notre cas, il s'agit d'une liste d'opérations paramétrables (par exemple "Déplacer l'objet X de Y mètres dans la direction Z". La construction du vocabulaire qui sera employé par l'outil est effectuée grâce à différentes interviews avec les opérateurs de la solution actuelle de conception en réalité virtuelle mais aussi avec les différents corps d'architecte qui seront les principaux utilisateurs de l'outil.

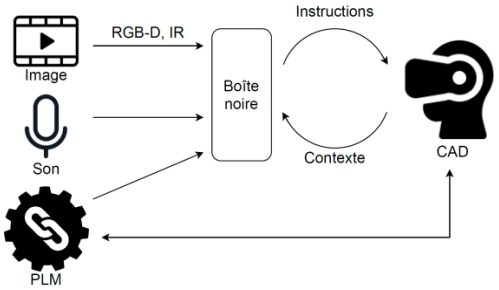


Figure 4. LE MODELE BOITE NOIRE AVEC LES ENTREES ET SORTIES IDENTIFIEES

L'analyse sémantique du vocabulaire ainsi obtenu permettra alors de mettre en évidence les différentes entrées supplémentaires à prévoir en plus des entrées vidéo et son pour notre modèle. Dans l'exemple précédent, le déplacement de "l'objet X" suppose d'avoir une connaissance de cet objet. L'outil devra alors recevoir en entrée la position et certaines métadonnées des différents objets dans l'environnement direct de l'utilisateur.

Les caméras envisagées pour la capture vidéo sont une GoPro Hero 5 qui offre un champ large et une résolution 4K et/ou les caméras de profondeur Intel Realsense d415i et d435i permettant d'obtenir une carte de profondeur jusqu'à une douzaine de mètres ainsi que de capturer des images infrarouges, et sont disponibles au laboratoire Airbus IdLab.

B. *Structure interne*

Dans cette partie, nous détaillerons les différentes étapes proposées pour le développement de notre outil (Figure 5). Nous analyserons alors pour chacune leurs rôles, leurs problématiques respectives et les différentes idées ou concepts pressentis pour y répondre. L'ordre des étapes correspond à l'ordre d'élaboration des parties.

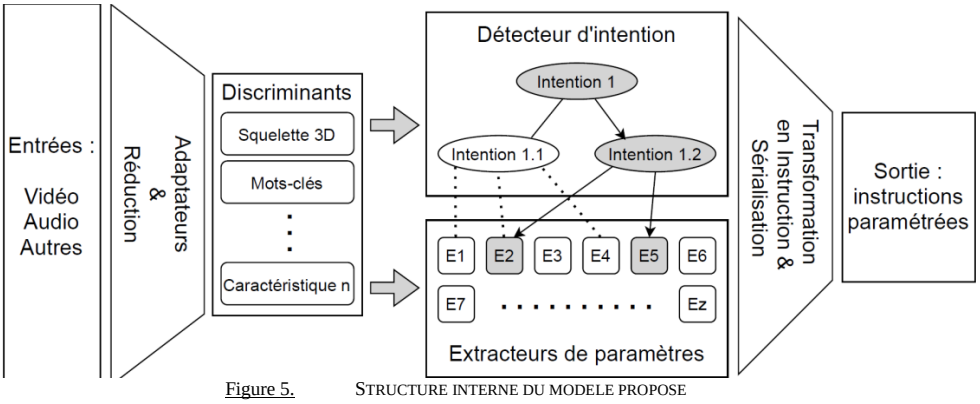


Figure 5. STRUCTURE INTERNE DU MODELE PROPOSE

1) Étape 1 : Vocabulaire d'intention

Cet élément de la solution aura pour objectif de déterminer la ou les intentions de l'utilisateur à partir d'un tenseur de caractéristiques que nous détaillerons dans l'étape 3. Nous proposons tout d'abord de nous concentrer sur les sorties de cet élément, les entrées seront alors déduites de l'étape 3. A l'instar de l'étude des sorties du paragraphe précédent, nous possédons à ce stade de l'étude un vocabulaire d'intention connu. Cette étape définit ainsi la liste des différentes intentions et les paramètres qui y sont associés.

Voici les difficultés identifiées pour cette étape :

- La hiérarchisation et la granularité des intentions : "Dessiner une forme" et "Dessiner un cube" ;
- La combinaison des intentions : on peut assigner une fonction à un objet qu'on est en train de dessiner ;
- La stabilité temporelle de l'intention : une intention choisie doit pouvoir être corrigée sans changer constamment ;
- Le temps réel : la fréquence de calcul doit être limitée.

2) Étape 2 : extraction des paramètres

À partir de la liste des paramètres obtenue à l'étape précédente, des modules seront chargés d'extraire les différents paramètres nécessaires pour chaque intention. Compte tenu de la redondance de paramètres qu'il peut y avoir entre plusieurs intentions comme l'extraction d'une distance par exemple, cette étape est considérée comme étant séparée de la détection d'intention.

Les différentes difficultés répertoriées sont listées ci-après :

- Gérer la diversité de réalisation d'une même intention : on peut par exemple manipuler un objet à une ou deux mains. Dans le premier cas l'orientation sera reliée à celui du poignet de la main alors que dans le second cela sera plus la direction entre les deux paumes de main ;
- Certains paramètres sont en temps réel : à minima la fréquence de calcul de ces derniers devra être limitée ;
- Limiter le nombre d'extracteurs : il faut éviter le recours systématique à la création d'extracteurs de paramètres spécifiques.

3) Étape 3 : adaptateurs et réduction de dimensions

À partir des contraintes des extracteurs de l'étape précédentes, et en s'appuyant sur la littérature pour la détection d'intentions, il devrait être possible à ce stade de lister l'ensemble des signaux faibles et/ou caractéristiques nécessaires pour réaliser les deux premières étapes. Par exemple, dans le cas de l'intention de me déplacer dans la scène, nous aurons besoin de connaître la vitesse et l'orientation de ce déplacement. Dans le cas d'un avatar virtuel, l'intention (implicite) de bouger l'avatar nécessite de connaître les positions et orientations des articulations de l'avatar (à partir de celles de l'utilisateur).

Voici les spécificités techniques trouvées pour cette étape :

- Actualisation des données : des données d'entrée pourront être mises à jour en temps réel comme dans notre exemple tandis que d'autres ne le seront que sous certaines conditions (une position enregistrée par un utilisateur) ou jamais (règle de conception d'un câblage électrique) ;
- Différents modes de fonctionnement de l'outil : la donnée produite doit être agnostique du mode de fonctionnement de l'outil (casque de réalité virtuelle ou PowerWall) ;
- Synchronisation par utilisateur : pour une utilisation sur PowerWall où plusieurs personnes sont amenées à évoluer sous le champ des caméras et des micros, les entrées vidéo et son devront concorder pour les différents utilisateurs.

4) Étape 4 : traduction en suite d'opérations

Enfin, il faudra traduire l'ensemble des intentions paramétrées que nous aurons identifié en instructions compréhensibles par le logiciel de conception en réalité virtuelle. Cette opération peut être vue comme une opération de sérialisation/analyse. À ce titre, à minima une partie de cette brique fonctionnelle sera spécifique au logiciel, c'est pourquoi

séparer cette brique en deux semble être la meilleure approche en termes d'adaptabilité.

C. *Entraînement*

Compte tenu de la plasticité et la complexité de la tâche, une partie des modules reposera vraisemblablement sur de l'apprentissage par ordinateur. Le découpage en organes de fonctionnement spécifique laisse cependant espérer des modules de complexité localement limitée permettant ainsi un entraînement plus rapide à partir de données d'entraînement restreintes. Par ailleurs, la transparence du modèle permise par cette répartition devrait être suffisante pour entraîner la majeure partie des modules individuellement au travers d'exercices spécifiques. Par exemple, le module d'extraction de dimensions pourra être entraîné séparément de celui d'extraction du squelette de l'utilisateur par exemple.

IV. Conclusion

Ce papier présente la méthode de détection d'intention proposée pour la conception préliminaire en réalité virtuelle qui sera développée dans les prochains mois. Cette méthode est innovante car elle permet d'utiliser une plus grande diversité d'entrées et ainsi de déterminer un panel d'intention beaucoup plus large que ce qu'il est théoriquement faisable avec les entrées vidéo ou son uniquement. Par ailleurs, les acteurs du projet pourront collaborer sans apprentissage des commandes de l'outil en utilisant uniquement leurs voix et gestes. Dans le cadre de l'industrie 4.0, on pourrait imaginer appliquer cette méthodologie à l'analyse de performance ou l'aide à la production en atelier, en prédisant les intentions des différents opérateurs sur place pour leur offrir une expérience de production améliorée et optimisée.

V. Bibliographie

[1] J. BERGOUNHOUX, "La réalité virtuelle se déploie chez Safran et Daher", L'Usine Nouvelle, avr. 2020.

[2] C. TREILLES, "SkyReal équipe les industriels d'une solution VR Cave", ZDNet France, sept. 21, 2020.

[3] C. MCINTOCH, "Cambridge Advanced Learner's Dictionary", 4th éd. Cambridge University Press, 2013.

[4] J. BROWNLEE, "Ordinal and One-Hot Encodings for Categorical Data", Machine Learning Mastery, 2020.

[5] G. MADJAROV, D. KOCEV, D. GJORGJEVIKJ, ET S. DZEROSKI, "An extensive experimental comparison of methods for multi-label learning", Pattern Recognition, vol. 45, no 9, p. 3084 3104, sept. 2012.

[6] S. KHAN ET B. TUNÇER, "Gesture and speech elicitation for 3D CAD modeling in conceptual design", Automation in Construction, vol. 106, p. 102847, 2019.

[7] G. KUTLIROFF ET A. BLEIWEISS, "Method and System for Gesture Classification", US 7,970,176 B2, juin 28, 2011.

[8] T. VULETIC, A. DUFFY, L. HAY, C. MCTEAGUE, G. CAMPBELL, ET M. GREALY, "Systematic literature review of hand gestures used in human computer interaction interfaces", International Journal of Human-Computer Studies, vol. 129, p. 74 94, sept. 2019.

[9] J. EISENSTEIN ET R. DAVIS, "Visual and Linguistic Information in Gesture Classification", ACM international conference on multimodal interfaces, p. 8, oct. 2004.

[10] B. BIOULAC, B. JARRY, ET R. ARDAILLOU, "Rapport 20-06 – Interfaces cerveau-machine : essais d'applications médicales, technologie et questions éthiques", Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine, p. 12, nov. 2020.

[11] H. WU ET AL., "Influence of cultural factors on freehand gesture design", International Journal of Human-Computer Studies, vol. 143, p. 102502, nov. 2020.

[12] B. PREBOT, "Représentation partagée et travail collaboratif en contexte C2 : monitoring d'opérateurs en situation simulée de command and control. ", Université de Bordeaux, France, 2020.

[13] D. MARION, "Sharing big display: développement des technologies et métaphores d'interactions nouvelles pour le partage collaboratif d'affichage en groupe ouvert", Université de Bordeaux, France, 2018.

[14] R. T. CHADALAVADA, H. ANDREASSON, M. SCHINDLER, R. PALM, ET A. J. LILIENTHAL, "Bi-directional navigation intent communication using spatial augmented reality and eye-tracking glasses for improved safety in human–robot interaction", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 61, p. 101830, févr. 2020.

[15] W. ZHAO, Y. BAO, ET H. QU, "Hand gesture understanding by weakly-supervised fusing shallow/deep image attributes", Signal Processing: Image Communication, vol. 82, p. 115760, mars 2020.

[16] J. WANG, T. LIU, ET X. WANG, "Human hand gesture recognition with convolutional neural networks for K-12 double-teachers instruction mode classroom", Infrared Physics & Technology, vol. 111, p. 103464, déc. 2020.

[17] H. LAHAMY, "Real-Time Hand Posture Recognition Using a Range Camera", University Of Calgary, Calgary, 2013.

[18] S. MARCEL, O. BERNIER, ET D. COLLOBERT, "Reconnaisance de la Main pour les Interfaces Gestuelles", COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels, juin 1999.

[19] A. GASCHLER, S. JENTZSCH, M. GIULIANI, K. HUTH, J. DE RUITER, ET A. KNOLL, "Social behavior recognition using body posture and head pose for human-robot interaction", in 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura-Algarve, Portugal, oct. 2012.

[20] Z. CAO, G. HIDALGO, T. SIMON, S.-E. WEI, ET Y. SHEIKH, "OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, mai 2019.

[21] G. PAPANDREOU, T. ZHU, L.-C. CHEN, S. GIDARIS, J. TOMPSON, ET K. MURPHY, "PersonLab: Person Pose Estimation and Instance Segmentation with a Bottom-Up, Part-Based, Geometric Embedding Model", European Conference on Computer Vision, mars 2018.

[22] G. G. CHOWDHURY, "Natural Language Processing", The Annual Review of Information Science and Technology, p. 39, 2003.
[23] R. E. LONGACRE, "The Grammar of Discourse", 1983e éd. Plenum Press New York, 1996.
[24] Y. GOLDBERG, "Neural Network Methods for Natural Language Processing", Synthesis Lectures on Human Language Technologies, vol. 10, no 1, p. 1 309, avr. 2017.
[25] Y. WANG ET AL., "Stacking-Based Ensemble Learning of Self-Media Data for Marketing Intention Detection", Future Internet, vol. 11, no 7, p. 155, juill. 2019.
[26] M. TIWARI, M. MATHIHALLI, K. RANGADURAI, Q. VOHRA, S. DARURU, ET R. N. RAJ, "Natural Language Processing systems and methods", US 2019/0103111 A1, avr. 04, 2019.
[27] T. BOCKLISCH, J. FAULKNER, N. PAWLOWSKI, ET A. NICHOL, "Rasa: Open Source Language Understanding and Dialogue Management", Conference on Neural Information Processing Systems, déc. 2017.

Co-manipulation robotique transparente pour l'assistance à l'examen échographique

Irmella Moutsinga
Institut Pascal UMR 6602
Université Clermont Auvergne/CNRS/SIGMA
irmella.moutsinga@sigma-clermont.fr

Hélène Chanal
Institut Pascal UMR 6602
Université Clermont Auvergne/CNRS/SIGMA
helene.chanal@sigma-clermont.fr

Flavien Paccot
Institut Pascal UMR 6602
Université Clermont Auvergne/CNRS/IUT
flavien.paccot@uca.fr

Nicolas Bouton
Institut Pascal UMR 6602
Université Clermont Auvergne/CNRS/SIGMA
nicolas.bouton@sigma-clermont.fr

Résumé— Les travaux de cet article portent sur l'élaboration d'une assistance robotisée pour l'examen échographique permettant de réduire les Troubles Musculosquelettiques (TMS) auxquels peuvent être soumis les médecins échographistes. La stratégie repose sur une co-manipulation clinicien/robot de la sonde échographique pour sa mise en place sur le patient; le maintien de la sonde sur le patient est alors assuré par le robot. L'objectif de cet article est de définir une stratégie de génération de mouvement « par guidage manuel » favorisant une conservation du geste par le clinicien. Ainsi en fonction des efforts appliqués par le clinicien sur la sonde, le robot qui porte la sonde doit générer un mouvement cohérent de manière à être transparent dans la réalisation de l'examen. Afin de définir cette stratégie, nous nous appuyons sur les principes de la mécanique Newtonienne. L'application du principe fondamental de la dynamique permet alors de calculer et planifier la trajectoire en fonction des efforts et des moments appliqués par le clinicien. Ainsi, la trajectoire suivie par le robot correspond à la trajectoire d'un solide virtuel dans l'espace sollicité par un effort. Ce solide virtuel, est caractérisé par une masse virtuelle et une inertie virtuelle. Notre méthode de génération de mouvement par solide virtuel est comparée en simulation à la méthode de co-manipulation classique en impédance. La comparaison montre que le guidage du solide virtuel est plus souple que celui de système en raideur et génère moins de sensation de choc améliorant ainsi la transparence du système global.

Mots-clés—robot ; co-manipulation ; assistance ; échographie ; hand-guidance

I. INTRODUCTION

L'échographie est un examen pratiqué dans plusieurs secteurs de la santé. Cet examen nécessite d'être réalisé par un clinicien expérimenté pour l'acquisition et l'interprétation d'image, afin d'intégrer les résultats échographiques obtenus de manière appropriée dans la prise en charge du patient [1].

La réalisation de l'examen nécessite que le clinicien adopte des postures inconfortables telles que, des positions du poignet et de l'avant-bras souvent délicates, des postures en abduction de l'épaule, d'inclinaison ou de torsion du rachis (Figure 1) [2][3]. Le maintien statique de la sonde sur le patient demande au clinicien d'appliquer des efforts axiaux pouvant atteindre 15N dans le cadre d'un suivi de grossesse pour des patientes non obèses [4]. Dans le cas des patientes obèses les efforts appliqués augmentent d'environ 40% (Figure 2). Couplées à des temps de pratique également allongés (Figure 2), ces postures sont à l'origine des TMS développés par les cliniciens. Une étude faite en 2009 aux États-Unis stipule que 90% des cliniciens effectuant des échographies se plaignaient de douleurs [3]. Ces TMS peuvent rendre difficile l'examen en créant un geste non contrôlé qui entraîne un effet « sorti de plan » et crée l'illusion d'un mouvement ce qui peut conduire à des erreurs de diagnostic [5].

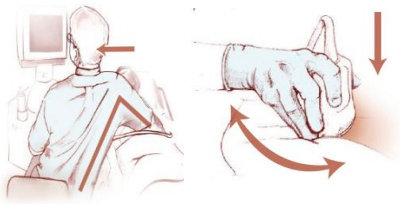


Figure 1. EXEMPLES DE POSTURES INCONFORTABLES ADOPTEES PAR LES CLINICIENS [3]

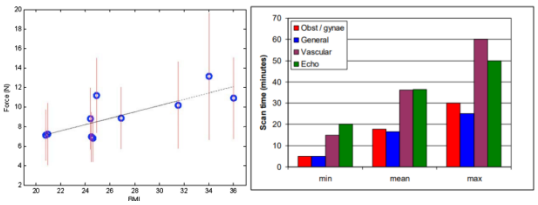


Figure 2. FORCE DE CONTACT MOYENNE PAR IMC (GAUCHE) [4] ; TEMPS MOYEN DE PRATIQUE PAR TYPE D'EXAMEN ECHOGRAPHIQUE (DROITE) [2]

Afin d'améliorer l'ergonomie de l'examen pour le clinicien et de remédier aux TMS qu'ils rencontrent, nous proposons de développer un système d'assistance robotisée à l'échographie externe.

Dans la littérature, différents travaux s'intéressent à l'utilisation des robots pour l'examen échographique suivant trois approches. Pour la première, l'examen échographique est automatique et s'appuie sur une commande en asservissement visuel du robot porte-sonde compensant les mouvements physiologiques du patient afin que l'expert analyse une région d'intérêt [6]. La deuxième repose sur l'utilisation d'un robot téléopéré [7]. La troisième approche repose sur une coopération humain-robot, i.e. l'humain « partage la maîtrise » de l'examen avec le robot. L'effecteur du robot est alors positionné par le clinicien sur le patient ; les mouvements du robot sont ensuite soit téléopérés par le clinicien, soit gérés de façon autonome si ce dernier doit réaliser une tâche en parallèle (Figure 3).

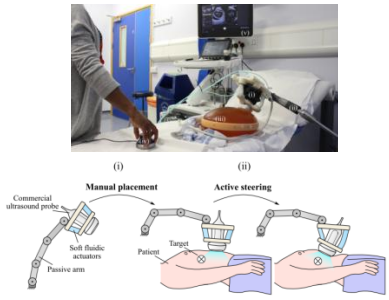


Figure 3. EXEMPLES DE SYSTEME DE COOPERATION HUMAIN-ROBOT [8]

Au vu des besoins médicaux exprimés, nous avons choisi de focaliser nos travaux sur la troisième approche afin que le clinicien puisse conserver son geste d'examen. Ainsi, nos travaux portent sur la co-manipulation homme-robot dans le but de positionner une sonde sur un corps humain. Dans un premier, temps nos travaux se concentrent sur le déplacement d'une sonde montée au niveau de l'effecteur d'un robot dans l'espace (sans contact). Le but est de développer une méthode de génération de mouvement temps réel pour que le robot suive une trajectoire opérationnelle générée par les forces et les moments appliqués par le médecin sur la sonde échographique tout en étant transparent à la manipulation.

Dans une première partie, nous introduisons la méthodologie de guidage proposée avant de comparer en simulation et en expérimentation ses performances vis-à-vis d'un guidage en raideur.

II. METHOLOGIE DU GUIDAGE

La trajectoire opérationnelle d'un robot est une suite de positions et d'orientations prise par son effecteur dans l'espace cartésien en fonction du temps.

Cette partie introduit la stratégie de guidage manuel classique en impédance et la stratégie développée par solide virtuel.

A. *Définition*

Le guidage manuel est une fonctionnalité des robots collaboratifs qui permet de mettre en mouvement un robot de façon rapide et intuitive. En robotique industrielle, la fonction de guidage manuel ou hand-guidance est présente afin de faciliter la phase de programmation par apprentissage d'un robot.

La génération de mouvement par hand-guidance se fait en trois étapes (Figure 4). La première étape est la détermination des efforts extérieurs régissant le mouvement. Elle peut se faire soit en utilisant une prédiction basée sur la mesure des couples moteurs [9], soit en utilisant un capteur au niveau de l'effecteur final [10]. Dans notre cas d'application, la mise en place d'un capteur est nécessaire vu la faible valeur des efforts mis en jeu vis-à-vis des efforts d'inertie générés par le mouvement du robot. La deuxième étape consiste à transformer ces efforts en déplacements, c'est cette étape qui correspond à la génération de trajectoire sur laquelle nous apportons notre contribution. La dernière étape consiste à mettre en mouvement le robot. Dans notre cas, nous choisissons de mettre en mouvement le robot à l'aide d'envoi à la baie de commande du robot des consignes exprimées dans l'espace articulaire.

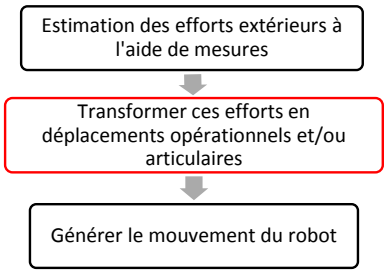


Figure 4. ETAPES D'ELABORATION DU GUIDAGE MANUEL

Lors du guidage, le robot doit suivre les mouvements imposés par l'opérateur sans aucun ressenti des efforts dynamiques liés à la mise en mouvement du robot : on parle de manipulation transparente. L'évaluation de la transparence basée sur l'analyse des vitesses et des accélérations du système durant la manipulation est une méthode qui permet d'évaluer les performances du guidage manuel [11]. A noter que les robots collaboratifs industriels actuels sont co-manipulés généralement grâce à une commande en impédance qui peut être source de TMS ce qui explique les activités de recherche actuelle sur cette problématique de transparence.

B. *Stratégie de génération de la trajectoire*

L'élaboration de la trajectoire pour le guidage manuel a fait l'objet de travaux de recherche basée sur la notion d'impédance [12][13][14] [15].

La commande en impédance a été introduite par Hagan [16] pour répondre au nombre grandissant d'application nécessitant l'interaction du robot avec son environnement. Alors qu'une loi de compliance par raideur active est liée à un comportement statique désiré, la commande en impédance impose une relation dynamique entre la position commandée et les efforts appliqués sur l'environnement. L'idée consiste à modifier la dynamique apparente d'un robot au point d'interaction en régulant son impédance mécanique suivant un modèle de type masse-ressort-amortisseur. L'impédance se traduit par l'équation (1).

$$\mathbb{f}_{ext} = \mathbf{\Lambda}\ddot{\mathbf{x}}_e + \mathbf{B}\dot{\mathbf{x}}_e + \mathbf{K}\mathbf{x}_e \qquad (1)$$

Où $\mathbf{\Lambda}$, $\mathbf{B}$ et $\mathbf{K}$ sont respectivement les matrices d'inertie, d'amortissement et de raideur désirées; $\mathbf{x}_e$, $\dot{\mathbf{x}}_e$ et $\ddot{\mathbf{x}}_e$ sont les

erreurs de position, de vitesse et d'accélération, avec $\mathbf{x}_e$=$\mathbf{x}_d$-$\mathbf{x}$, $\mathbf{x}$ le vecteur des positions mesurées ou estimées et $\mathbf{x}_d$ le vecteur des positions désirées. $\mathbb{f}_{ext}$ represente le vecteur des actions extérieures.

L'accélération commandée $\ddot{\mathbf{x}}_c$ se définit comme suit:

$$\ddot{\mathbf{x}}_c = \ddot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{\Lambda^{-1}}\left((\mathbf{B}\dot{\mathbf{x}}_e + \mathbf{K}\mathbf{x}_e) - \mathbb{f}_{ext}\right) \quad (2)$$

Alors que les précédentes approches de guidage manuel sont basées sur le contrôle de l'impédance du robot, notre approche s'appuie sur la mise en place d'un comportement représentatif des lois de la mécanique. Ainsi, notre proposition se base sur le principe fondamental de la dynamique de sorte que le robot ait un comportement transparent au cours de la manipulation.

En s'appuyant sur le principe fondamental de la dynamique, le robot doit suivre la trajectoire d'un solide dans l'espace lorsqu'il est soumis à des actions extérieurs. Ainsi, la génération de trajectoire se fait à partir de la mise en mouvement d'un solide virtuel, dont les caractéristiques sont une masse virtuelle et une inertie virtuelle. Zhang [9] utilise un système de masse et d'inertie virtuelles afin de limiter la vitesse et l'accélération des robots industriels gros porteurs n'utilisant pas de capteur d'éffort. La problématique de Zhang est caractérisée par la conservation d'un contact avec un solide à faible vitesse induisant un comportement du robot qui n'est pas transparent pour l'utilisateur.

La comparaison d'une génération de mouvement par solide virtuel avec une génération par impédance montre les limites du modèle en impédance sur la transparence du robot et l'assistance au geste.

C. Présentation du principe de génération de mouvement par solide virtuel

Dans ces travaux, le robot d'application est le robot collaboratif Staubli TX2 60, équipé avec un capteur d'effort six axes Schunk FTN GAMMA 65-5 (Figure 5). La mise en œuvre du robot à travers sa baie de commande nous permet de nous affranchir de développement supplémentaire pour gérer la sécurité. De plus, ces travaux pourront alors s'appliquer à n'importe quel robot industriel.

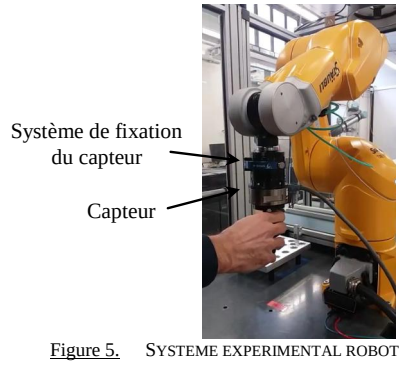


Figure 5. SYSTEME EXPERIMENTAL ROBOT STAUBLI TX2 60

Pour une manipulation intuitive de la sonde, la trajectoire suivie par le robot doit être celle d'un solide dans l'espace lorsqu'il est soumis à des efforts et/ou des moments dont les résultantes sont non nulles.

Selon le principe fondamental de la dynamique, dans un référentiel galiléen des forces de résultante non nulle engendrent une accélération du système, soit une modification de son vecteur vitesse et donc de sa trajectoire. Pour déterminer la trajectoire que doit suivre le robot en fonction du temps, il faut considérer un solide virtuel (Figure 6) qui est mis en mouvement sous l'action des efforts $\mathbf{f}_m$ et des couples $\mathbf{C}_m$ exercés par le médecin au point O_m.

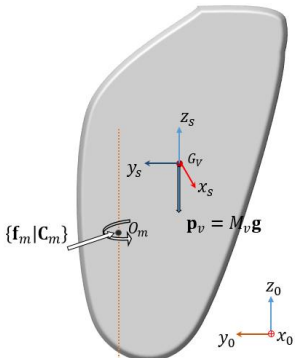


Figure 6. SOLIDE VIRTUEL

Le solide virtuel est caractérisé par une masse virtuelle M_v, une matrice d'inertie virtuelle $\mathbf{I_v}$ et son centre de gravité virtuel G_v. Le torseur d'actions extérieurs appliquées sur le solide est défini par l'équation (3) et son torseur dynamique par l'équation (4).

$$\{\mathbf{T}_{ext/S_v}\} = \begin{Bmatrix} \overrightarrow{\mathbf{f}_m} + \overrightarrow{\mathbf{p}_v} \\ \overrightarrow{\mathbf{C}_m} + \overrightarrow{O_mG_v} \wedge \overrightarrow{\mathbf{p}_v} \end{Bmatrix}_{\substack{O_m \\ R_0}} \quad (3)$$

$$\{\mathbf{D}_{S_v/R_0}\} = \begin{Bmatrix} M_v.\vec{\mathbf{\Gamma}}_{G_v,S/R_0} \\ \vec{\boldsymbol{\delta}}_{G_v,S/R_0} + M_v.\overrightarrow{O_mG_v} \wedge \vec{\mathbf{\Gamma}}_{G_v,S/R_0} \end{Bmatrix}_{\substack{O_m \\ R_0}} \quad (4)$$

Avec $\mathbf{p}_v$ qui correspond au poids du solide virtuel et O_m le point d'application des efforts exercés par le médecin. $\mathbf{\Gamma}_{G_v,S/R_0}$ est l'accélération du centre de masse virtuel et $\boldsymbol{\delta}_{G_v,S/R_0}$ est le moment dynamique du système virtuel en son centre de masse exprimés dans R_0.

Les efforts $\mathbf{f}_m$ et les couples $\mathbf{C}_m$ exercés par le médecin sont estimés grâce aux mesures du capteur d'effort positionné entre la sonde et le corps terminal du robot (équation (5)).

$$\begin{cases} \overrightarrow{\mathbf{f}_m} = \vec{\mathbf{f}}_{C/R_0} - \overrightarrow{\mathbf{p}_{Gs}} \\ \overrightarrow{\mathbf{C}_m} = \vec{\mathbf{M}}_{C/R_0} - \overrightarrow{O_cO_m}_{/R_0} \wedge \overrightarrow{\mathbf{f}_m} - \overrightarrow{O_cG_s}_{/R_0} \wedge \overrightarrow{\mathbf{p}_{Gs}} \end{cases} \quad (5)$$

Avec $\mathbf{f}_{C/R_0}$ et $\mathbf{M}_{C/R_0}$ les forces et les moments mesurés par le capteur exprimés dans R_0. O_C est le centre du capteur, G_s le centre de masse de la sonde et du système de fixation et $\mathbf{p}_{Gs}$ leur poids.

Le principe fondamental de la dynamique, appliqué au solide virtuel permet de dire que le torseur d'actions extérieurs est égal au torseur dynamique. Ainsi l'accélération de trajectoire du solide virtuel est déduite de l'équation (6).

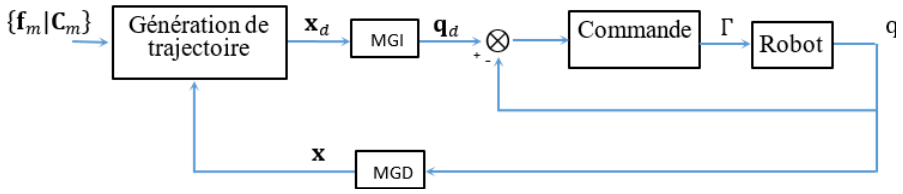


Figure 7. SCHEMA CLASSIQUE DE GENERATION DE MOUVEMENT DANS L'ESPACE OPERATIONNEL

$$\begin{cases} \vec{\Gamma}_{G_v,S/R_0} = \frac{\overrightarrow{\mathbf{f}_m}+\overrightarrow{\mathbf{p}_v}}{M_v} \\ \vec{\Omega}_{R_v/R_0} = \left(\overrightarrow{\mathbf{C}_m} + \overrightarrow{G_vO_m} \wedge \vec{\mathbf{f}}_m\right).\bar{\bar{\mathbf{I}}}_{\mathbf{v}}^{-1} \end{cases} \quad (6)$$

Afin que la trajectoire ne dépende que des efforts du médecin, la gravité virtuelle est nulle et le poids du solide virtuel est alors nul. Des frottements virtuels $\mathbf{f}_{fv}$ et $\mathbf{M}_{fv}$ sont ajoutés pour réaliser le seuillage mécanique des paramètres mesurés par le capteur et pour freiner le robot.

$$\begin{cases} \vec{\Gamma}_{G_v,S/R_0} = \frac{\overrightarrow{\mathbf{F}_m}-\overrightarrow{\mathbf{F}_{fv}}}{M_v} \\ \vec{\Omega}_{R_v/R_0} = \left(\overrightarrow{\mathbf{C}_m} + \overrightarrow{G_vO_m} \wedge \vec{\mathbf{f}}_m - \overrightarrow{\mathbf{M}_{fv}}\right).\bar{\bar{\mathbf{I}}}_{\mathbf{v}}^{-1} \end{cases} \quad (7)$$

Nous en déduisons la trajectoire pilotée du robot par intégration continue de l'accélération.

Dans la suite, la méthode génération de trajectoire utilisant le solide virtuel est comparée en simulation à la méthode en impédance en considérant uniquement la raideur.

III. SIMULATIONS ET DISCUSSIONS

Conformément au schéma classique de génération de mouvement dans l'espace opérationnel présenté sur la Figure 7, nous avons implémenté en simulation la génération de trajectoire par solide virtuel et la génération de trajectoire en impédance en considérant uniquement une raideur afin de les comparer.

A. Guidage manuel du robot basé sur le mouvement d'un solide virtuel dans un référentiel galiléen

L'équation (11) donne l'accélération que doit avoir la sonde dans l'espace sous l'action du clinicien. De sorte que $\mathbf{\Gamma}_{G_v,S/R_0} = [\ddot{x}\ \ddot{y}\ \ddot{z}]$ soient les paramètres du mouvement en translation et $\dot{\mathbf{\Omega}}_{R_v/R_0} = [\ddot{\psi}\ \ddot{\theta}\ \ddot{\phi}]$ ceux en rotation. Dans cette simulation, la masse du système virtuel M_v a été prise proche de celle de la sonde échographique, $M_s = 200g$. En considérant le solide virtuel comme un cylindre de rayon $R = 30mm$ et de longueur $l = 150mm$ nous calculons le tenseur d'inertie du solide virtuel.

Paramètres	x	y	z
Inertie ($\mathbf{Kg.m^2}$)	$4.2\ 10^{-4}$	$4.2\ 10^{-4}$	$9\ 10^{-5}$
Frottements virtuels $\mathbf{f_{fv}}$ ($\mathbf{N}$)	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}
Frottements virtuels $\mathbf{M_{fv}}$ ($\mathbf{N.m}$)	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}

Tableau 1. PARAMETRES D'INERTIE VIRTUEL ET DE FROTTEMENTS VIRTUELS

Les valeurs considérées pour les simulations sont données dans le Tableau 1.

Afin de réglementer les interactions de contact humain-robot, la norme ISO-10218:2006 définit la vitesse maximale de l'organe terminal d'un robot à $0.25m/s$. Ainsi, en fonction des dimensions du robot, nous limitons la vitesse maximale de rotation égale à $0.3rad/s$ et le temps minimum d'accélération est pris égal à $0.5s$, d'où l'accélération maximale fixée à $0.5m/s^2$ et $0.6rad/s^2$.

Ces paramètres sont alors intégrés à notre simulateur pour calculer la trajectoire suivie par un effort ou un couple pur. Les simulations sont présentées dans la section *C.* qui suit.

B. Guidage manuel du robot basé sur la commande en raideur

La commande en raideur est une particularité de la commande en impédance. Elle donne au robot le comportement d'un ressort à raideur. Elle consiste à contrôler la raideur apparente de l'effecteur en réglant une matrice de raideur désirée. La relation entre les déformations $\Delta\mathbf{x}$ et les efforts de contact $\mathbb{f}_{ext}$ est donnée par l'équation ci-dessous où $\mathbf{K}$ est la matrice de raideur du robot:

$$\mathbb{f}_{ext} = \mathbf{K}\Delta\mathbf{x} \quad (8)$$

Nous considérons que l'effort et le couple maximum appliqués pour déplacer la sonde à vitesses maximales dans l'espace sont de $0.1N$ et de $0.001N.m$, pour une vitesse maximale de $0.25m/s$ en translation et $0.3rad/s$ en rotation avec une période d'échantillonnage fixée à $\Delta t = 10ms$. Ainsi la raideur maximale paramétrée pour les translations est de $40N/m$ et en rotation $0.33N.m/rad$.

La section suivante présente à l'aide de simulation la comparaison des trajectoires calculées avec les deux approches précédentes.

C. Analyse des trajectoires générées et étude la transparence des guidages

L'objectif de nos travaux est que le robot suive les mouvements imposés par l'opérateur sans aucune force de résistance perceptible : soit une manipulation transparente. Sous Simulink nous avons implémenté deux types de sollicitations : une force unique et un couple pur. Avec pour configuration articulaire initiale $\mathbf{q} = [0; pi/4; pi/2; 0; pi/4; 0]$ (Figure 8). Cette configuration verticale de la sonde est celle qui est généralement rencontrée pour les examens échographiques externes. A noter que dans le cas de la mise en mouvement d'un solide, un effort est nécessaire uniquement pour faire varier l'accélération et/ou contrer les frottements

pendant un mouvement établi. Les exemples suivants servent à comparer les comportements des deux familles de génération de trajectoire lors de l'application d'un effort ou d'un couple.

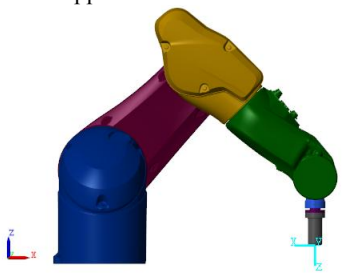


Figure 8. CONFIGURATION INITIALE DU ROBOT

- Pour générer un mouvement de translation. Un effort constant est appliqué pendant un temps $t = 0.5s$ tel que $\overrightarrow{\mathbf{f}_m} = [0.1 \quad 0 \quad 0]^T$, exprimé dans le repère fixe R_0.

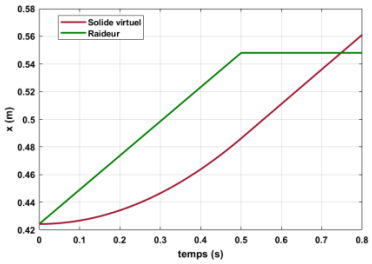


Figure 9. POSITIONS CARTESIENNES X GENEREES PAR LA METHODE DU SOLIDE VIRTUEL ET PAR LA METHODE EN RAIDEUR SUIVANT LA DIRECTION DE L'EFFORT APPLIQUE

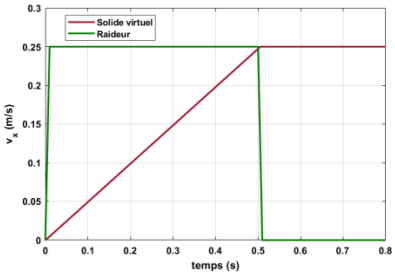


Figure 10. COURBES DE VITESSES V_X SUIVANT LA DIRECTION DE L'EFFORT APPLIQUE

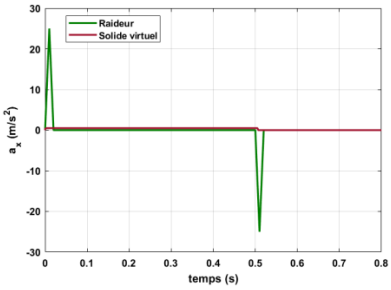


Figure 11. COURBES D'ACCELERATIONS A_X DE L'EFFECTEUR SUIVANT LA DIRECTION DE L'EFFORT APPLIQUE

- Pour générer un mouvement de rotation. Un couple constant est appliqué pendant un temps $t = 1s$ tel que $\overrightarrow{\mathbf{C}_m} = [0 \quad 1.6 \times 10^{-4} \quad 0]^T$ exercé dans R_0.

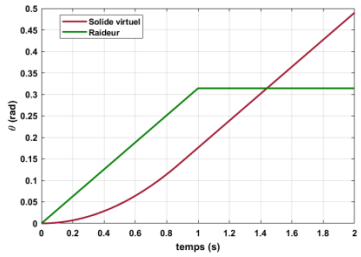


Figure 12. COURBES DE POSITION ANGULAIRE θ GENEREES PAR LA METHODE DU SOLIDE VIRTUEL ET PAR LA METHODE EN RAIDEUR SUIVANT LA DIRECTION DU COUPLE APPLIQUE

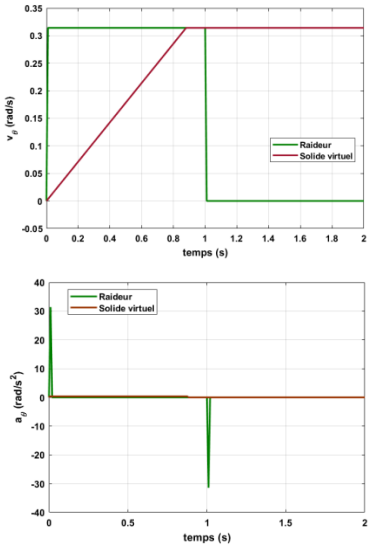


Figure 13. COURBES DE VITESSE ANGULAIRE V_θ ET ACCELERATION ANGULAIRE A_θ DU REPERE LIE A L'EFFECTEUR SELON LA DIRECTION DU COUPLE APPLIQUE, AVEC UN GENERATEUR DE TRAJECTOIRE DE TYPE SOLIDE VIRTUEL ET RAIDEUR.

En translation comme en rotation, la trajectoire suivie par le robot en raideur et en masse virtuelle ne sont pas les mêmes (Figure 9 et Figure 12). Nous pouvons constater que lorsque l'effort ou le couple cessent d'être appliqué le mouvement est conservé dans le cas d'une génération de trajectoire par solide virtuel ce qui est cohérent avec les principes de la mécanique. Ces différences expliquent pourquoi le pilotage d'un robot avec une génération de trajectoire en raideur génère un comportement qui n'est pas intuitif et nous oblige à constamment exercer un effort de réaction qui peut générer des TMS.

La génération de trajectoire en raideur génère des pics d'accélération plus importants que pour celle en solide virtuel (Figure 11 et Figure 13). Nous constatons des pics élevés d'accélération au démarrage et à l'arrêt du système en raideur pouvant atteindre près de $30rad/s^2$ en rotation et $25m/s^2$ en

translation, alors que la trajectoire générée par le solide virtuel est contrainte en accélération par la limite naturelle imposée au système grâce aux limites des efforts et des couples appliqués. Ces pics d'accélération provoquent des à-coups qui entravent le guidage. Pour atténuer ces à-coups, un filtrage peut être mis en place pour maîtriser l'accélération de la trajectoire dans la méthode en raideur mais l'opérateur doit tout de même exercer un effort permanent pour faire bouger le robot.

Cette analyse des trajectoires des vitesses et des accélérations donne l'aperçu de la transparence du robot lors de la manipulation.

IV. CONCLUSION

Afin de réduire les TMS auxquels peuvent être soumis les médecins échographistes, cet article propose l'élaboration d'une assistance robotisée. Ainsi une stratégie de génération de mouvement par hand-guidance favorisant une conservation du geste par le clinicien est élaborée. Celle-ci s'appuie sur les principes de la mécanique Newtonienne. L'application du principe fondamental de la dynamique permet alors de calculer et planifier la trajectoire en fonction des efforts et des moments appliqués par le clinicien. Ainsi, la trajectoire suivie par le robot correspond à la trajectoire d'un solide virtuel dans l'espace, sollicité par un effort.

Pour évaluer la stratégie de génération de trajectoire par solide virtuel, une étude de la transparence du guidage a été faite et comparée à la méthode classique en impédance. Les résultats montrent que le guidage du solide virtuel est plus souple que celui de système en raideur et génère moins de sensation de choc améliorant ainsi la transparence du système global.

La suite de ces travaux consiste à confirmer ces résultats de simulations par des résultats expérimentaux avant d'aborder la gestion du contact sonde/patient et la compensation des mouvements involontaires du médecin et les mouvements physiologiques du patient.

V. REMERCIEMENTS

Nous remercions l'Agence Nationale des Bourses du Gabon (ANBG) qui nous soutient tout au long de cette thèse en la finançant. De même, nous remercions le programme CRI de CAP2025 et chèque Hub Innovergne qui nous a financièrement accompagné et nous a permis de faire l'acquisition du capteur d'effort indispensable pour nos expérimentations.

VI. REFERENCES

[1] A. Guerraz, « Etude du télégeste médical non invasif utilisant un transducteur gestuel à retour d ' efforts », *HAL Id tel-00005360 https//tel.archives-ouvertes.fr/tel-00005360v1*, 2005.

[2] S. C. Monningtom, K. Dodd-Hughes, E. Milnes, et Y. Ahmad, « Risk Management of Musculoskeletal Disorders in », n° March, 2012.

[3] S. Murphey, « Work Related Musculoskeletal Disorders in Sonography », *J. Diagnostic Med. Sonogr.*, vol. 33, n° 5, p. 356‑ 369, 2017.

[4] M. Dhyani *et al.*, « A pilot study to precisely quantify forces applied by sonographers while scanning: A step toward reducing ergonomic injury », *Work*, vol. 58, n° 2, p. 241‑ 247, 2017.

[5] D. A. Lichtenstein, *L'échographie générale en réanimation*, 2ème éditi. 2002.

[6] R. Monfaredi *et al.*, « Robot-assisted ultrasound imaging : Overview and development of a parallel telerobotic system », p. 54‑ 62, 2015.

[7] P. Vieyres, G. Poisson, F. Courrèges, O. Mérigeaux, et P. Arbeille, « The TERESA project: From space research to ground tele-echography », *Ind. Rob.*, vol. 30, n° 1, p. 77‑ 82, 2003.

[8] L. Lindenroth, R. J. Housden, S. Wang, J. Back, K. Rhode, et H. Liu, « Design and Integration of a Parallel, Soft Robotic End-Effector for Extracorporeal Ultrasound », *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 67, n° 8, p. 2215‑ 2229, 2020.

[9] S. Zhang, S. Wang, F. Jing, et M. Tan, « A Sensorless Hand Guiding Scheme Based on Model Identification and Control for Industrial Robot », *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 15, n° 9, p. 5204‑ 5213, 2019.

[10] D. Kushida, M. Nakamura, S. Goto, et N. Kyura, « Human direct teaching of industrial articulated robot arms based on force-free control », *Artif. Life Robot.*, vol. 5, n° 1, p. 26‑ 32, 2001.

[11] J. Fong, V. Crocher, Y. Tan, D. Oetomo, et I. Mareels, « EMU: A transparent 3D robotic manipulandum for upper-limb rehabilitation », *IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot.*, p. 771‑ 776, 2017.

[12] G. Raiola *et al.*, « Co-manipulation with a Library of Virtual Guiding Fixtures To cite this version : HAL Id : hal-01663467 Co-manipulation with a Library of Virtual Guiding Fixtures », 2017.

[13] M. H. Ang, W. Lin, et S. Y. Lim, « Walk-through programmed robot for welding in shipyards », *Ind. Rob.*, vol. 26, n° 5, p. 377‑ 388, 1999.

[14] R. Ikeura, H. Monden, et H. Inooka, « Cooperative motion control of a robot and a human », *Robot Hum. Commun. - Proc. IEEE Int. Work.*, p. 112‑ 117, 1994.

[15] A. Winkler et J. Suchý, « Force-guided motions of a 6-d.o.f. industrial robot with a joint space approach », *Adv. Robot.*, vol. 20, n° 9, p. 1067‑ 1084, 2006.

[16] N. Hogan, « Impedance control: An approach to manipulation: Part I-theory », *J. Dyn. Syst. Meas. Control. Trans. ASME*, vol. 107, n° 1, p. 1‑ 7, 1985.

Simulateur d'infrastructure portuaire

Un outil de développement pour l'automatisation des platesformes de gestion de conteneurs

Blaise CONRARD, Gérald DHERBOMEZ, Rochdi MERZOUKI
Univ. Lille, UMR 9189 – CRISTAL – Centre de Recherche en Informatique Signal et Automatique de Lille,
F-59000 Lille, France
Blaise.conrard@polytech-lille.fr, gerald.dherbomez@univ-lille.fr, rochdi.merzouki@polytech-lille.fr

Résumé— Cet article présente un simulateur d'infrastructure portuaire de gestion de conteneurs. Il constitue un outil numérique permettant la conception et le développement de systèmes embarqués par une première réalisation virtualisée d'équipements automatisés en vue ou en parallèle à leur réalisation réelle. Cette technique correspond à la tendance actuelle de développement basée sur une représentation virtuelle de l'équipement en phase de développement et de mise au point. Au final, le simulateur peut alors devenir un jumeau numérique s'il modélise avec assez de finesse et de précision le comportement de l'équipement réel. C'est sur cette thématique concernant la réalisation d'un outil de simulation d'environnement virtuel que porte cet article.

Mots-clés— Simulateur de processus, commande, supervision

I. CONTEXTE DE DÉVELOPPEMENT D'UN SIMULATEUR

Le laboratoire Cristal mène depuis plus d'une décennie de nombreux travaux sur l'automatisation et la gestion des plates-formes de gestion de conteneurs. Ce fût dans le cadre de partenariats directs avec d'autres laboratoires ou d'industriels européens, ou au sein de collaboration au travers de projets européens tel que Intrade [1] et actuellement SPEED [2].

Un des résultats notables du projet Intrade fut le développement d'un véhicule autonome intelligent (ou IAV pour Intelligent Autonomous Vehicles) dont la mission est l'acheminement de conteneur. La figure 1 montre une photo de ce véhicule. Ce type de véhicule a ainsi en charge des missions comme se rendre au quai de déchargement pour y charger un conteneur afin de le déposer sur une zone de stockage, en vue de le reprendre plus tard pour l'acheminer vers les zones de départ et de chargement sur un train, un camion ou un bateau.

Plus globalement, les activités de manipulation, de tri ou de stockage de conteneurs sont des activités à faible (voire sans) valeur ajoutée. Elles n'améliorent pas la qualité d'un produit ou d'un service, excepté le fait de délivrer à moindre coût dans des délais attendus ou voulus les biens à acheminer. Ainsi, de cette constatation, ce type d'activité mérite d'être automatisé pour décharger les opérateurs de ces manipulations au profit d'activité de gestion, d'anticipation des besoins et/ou de relation client, nécessitant une intelligence relationnelle, impossible ou difficilement automatisable actuellement.



Figure 1. PHOTO DE L'AIV DEVELOPPE DANS INTRADE

Dans ce contexte, le projet SPEED cible le même domaine des plates-formes portuaires pour l'acheminement de conteneurs. Cet actuel projet est cependant, plus ambitieux en intégrant un aspect écosystem plus poussé avec la prise en compte des nombreux acteurs du domaine et leurs interactions dans un contexte de transformation numérique de l'ensemble de la chaîne logistique.

L'article présente d'abord les principes et objectifs visés dans le développement d'un simulateur ou émulateurs d'infrastructures portuaires. Il poursuit ensuite par une réflexion sur les modèles numériques pour la simulation de processus industriels et termine par les évolutions et les usages de ce simulateur tel que pour la formation et l'enseignement.

II. PRINCIPE ET OBJECTIFS DU SIMULATEUR

A. En termes de cas d'utilisation

L'équipe du laboratoire Cristal associé au projet Speed, s'intéresse principalement aux équipements portuaires et à leur possible automatisation. Il s'agit ainsi, entre autres, des équipements de type :

- grue, pour le chargement et le déchargement des bateaux de transport de conteneurs

- porte conteneur mobile ou reach-stacker, destiné à la manipulation et au déplacement de conteneurs dans l'infrastructure du port

- portique de manipulation, destiné à placer ou à extraire des conteneurs dans une zone de stockage

Les missions de développement liées à la commande et au contrôle de ces équipements en vue de leur automatisation concernent :

- le pilotage automatisé de chaque équipement (grue, AIC...) par son calculateur embarqué (ou ses calculateurs)

- la coordination ou la coopération entre équipements basée sur l'utilisation de communications numériques

- la supervision de l'ensemble portuaire où des ordres sont transmis à chacun des équipements pour la réalisation de tâches et où des comptes-rendus sont retournés suite à la réalisation effective de ces tâches. A cela, s'ajoutent des informations échangées sur l'état du système et sur les capacités individuelles des équipements à effectuer leur mission selon leurs ressources énergétiques (niveau de charge des batteries ou des réservoirs) ou selon leur état matériel suite à des défaillances ou des pannes.

- la sûreté de fonctionnement et la sécurité où malgré l'occurrence de défaillance, d'informations erronées (ou encore, éventuellement des attaques informatiques), le système doit accomplir au mieux les missions de manipulations de conteneurs demandées et ce sans risque pour les biens, les personnes et l'environnement.

B. En termes de développement de commande

Le développement de système embarqué intégré aux équipements portuaires s'appuie sur la traditionnelle et classique boucle fermée d'un système de commande. Le système de commande utilise les informations fournies par les capteurs et évalue les ordres à transmettre aux actionneurs pour permettre l'accomplissement de la mission. A cela, les aspects communication et coopération avec le reste du système s'ajoute. Ils permettent la réception des ordres et la retransmission de l'état de l'équipement ou de la réalisation des tâches confiées. La figure 2 ci-après illustre ce principe

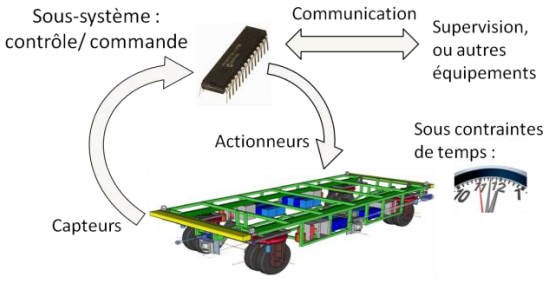


Figure 2. PHOTO DE L'AIV DEVELOPPE DANS INTRADE

Autrefois, le développement du code embarqué nécessitait la possession de l'équipement réel pour sa mise au point, avec parfois d'éventuelles modifications de l'instrumentation (capteurs et actionneurs) suite aux résultats intermédiaires obtenus lors de ce développement.

Avec l'usage d'un simulateur physique, précédent ou en parallèle à la réalisation physique d'un équipement, sa commande peut être élaborée sur un modèle virtuel. Les développements menés permettent entre autres :

- de concevoir l'algorithme de commande, c'est-à-dire un traitement d'élaboration des ordres transmis aux actionneurs selon les informations des capteurs et en fonction de la tâche ou de l'objectif transmis à l'équipement

- de valider ou d'ajuster l'instrumentation, c'est-à-dire, le nombre, la position ou la nature des capteurs et actionneurs. Le résultat de ce type d'étude participe alors à la conception ou aux améliorations de l'équipement physique réel.

- d'assurer la fiabilité et la sécurité de l'équipement, en testant son comportement dans des situations à risques comme suite à une défaillance et au mauvais comportement d'un capteur ou d'un actionneur.

C. En termes de "nouvelles" possibilités offertes

Les études précédentes sont en fait assez classiques pour le développement d'équipements automatisés et peuvent être menées à l'aide de modèles mathématiques ou informationnels traditionnels (modèle d'état, fonction de transfert, réseau de Petri...)

Le simulateur développé dans le cadre de ce projet vise cependant à obtenir une plus grande finesse du modèle comportemental de l'équipement et de son environnement.

Ainsi, le simulateur intègre un moteur physique c'est-à-dire, un moteur numérique capable de simuler le comportement physique d'objets en termes de mouvement, de trajectoire, de réaction à la collision ou aux frottements entre eux. Un tel moteur physique est une des fonctionnalités de la chaîne de développement Godot [3] choisie pour la réalisation de ce simulateur, mais d'autres outils comme Unity [4] d'usage plus professionnel offre des fonctions similaires.

Dans l'activité de conception de grue, d'AIV ou de porte-conteneur, cette fonctionnalité permet une plus grande finesse de la modélisation du comportement. Il intègre ainsi les possibilités de collisions, voulu ou non, comme la simple prise d'un conteneur sur le bateau par une grue ou le mauvais pilotage d'un équipement mobile qui viendrait heurter un autre équipement ou l'infrastructure à proximité.

A ceci, le simulateur intègre une représentation et une visualisation 3D du système. Comme le moteur physique, cette fonctionnalité provient du type de chaîne de développement choisie pour la réalisation du simulateur. Ceci permet une visualisation rapide et simple du bon ou du mauvais comportement du système. Cette fonctionnalité facilite aussi la communication autour du projet en fournissant un support de démonstration. Mais, surtout, la génération d'image 3D permet la simulation de capteurs de type caméra ou de télédétection (ex. : liddar) qui permettent des développements de traitements d'image ou de l'information que ne permettaient pas les méthodes et la modélisation traditionnel de processus et de comportement physique.

L'image suivante (figure 3) est extraite d'un film montrant les capacités de ce simulateur. Il est accessible à l'adresse suivante : https://www.youtube.com/watch?v=pNbIE76BVJM

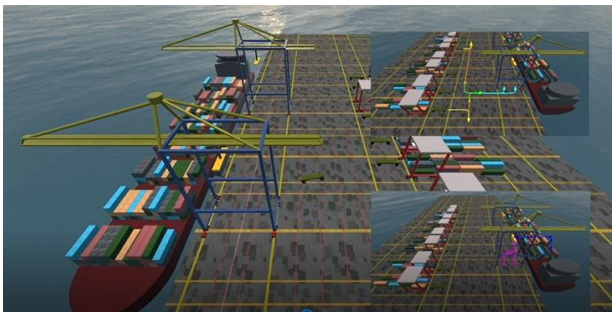


Figure 3. APERÇU DU RENDU DU SIMULATEUR

D. *En termes d'intégration de la commande*

D'un point de vue pratique, le simulateur vise à être indépendant de la partie commande et pourrait être considéré comme un émulateur de la physique du processus.

Ainsi, le simulateur a en charge :

- la visualisation 3D de l'environnement,
- le comportement physique de l'environnement, c'est-à-dire le déplacement des objets selon les forces qui leur sont appliquées,
- la gestion des ordres transmis aux actionneurs ayant un effet sur la physique des objets
- et enfin, la génération des signaux des capteurs simulés selon l'état des éléments de l'environnement simulé.

A cela, la partie commande, est complètement indépendante. Elle peut être composée de plusieurs algorithmes exécutés par des applications externes. Ceux-ci dialoguent avec le simulateur en transmettant les ordres destinés aux actionneurs simulés et, reçoivent en parallèle les mesures des capteurs, élaborées par le simulateur comme s'il s'agissait de véritable capteurs.

La figure 4 suivante illustre ce principe :

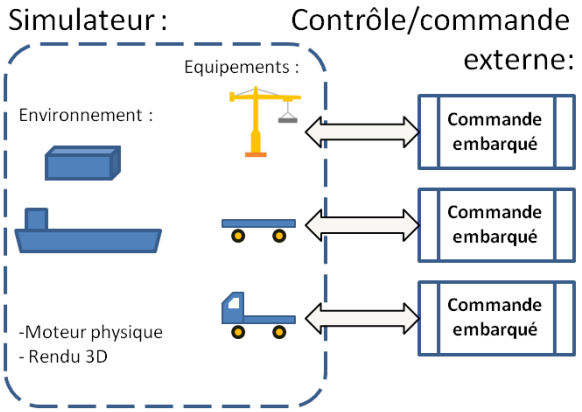


Figure 4. ARCHITECTURE AVEC SEPARATION DU PROCESSUS PHYSIQUE SIMULE DE LA COMMANDE EXTERNE

Dans ce projet, il a été choisi d'utiliser une interface réseau (de type UDP) pour effectuer l'interconnexion entre le simulateur et les applications de commande. Cette solution a l'avantage d'offrir une grande interopérabilité et de permettre l'emploi de la plupart des langages pour les applications de commande (Labview, Matlab, Python, Java, C...) voire même l'utiliser des calculateurs externes embarqués réels (DSpace, CompactRIO..). Un dernier atout est également de permettre la réalisation d'une commande distribuée grâce à l'usage de liaisons réseau Ethernet permettant de répartir les applications de commande sur plusieurs ordinateurs.

III. MODÈLES NUMÉRIQUES ET ADAPTATION À L'ECHELLE DE TEMPS

A. *Limites du simulateur choisi*

Une des volontés, mais également une des faiblesses du simulateur proposé est d'être temps-réel dans le sens qu'il simule le comportement d'un système avec le même écoulement du temps que le réel. C'est, certes, adéquat pour le développement d'algorithme de commande, mais, il limite son usage pour des études sur de longues périodes.

Ainsi, si l'on souhaite étudier l'organisation d'un stock (comme une zone de stockage de conteneurs), en tenant compte des arrivées et des sorties, ceci se fait sur de longue période de l'ordre de la semaine, du mois ou même de l'année. L'outil de simulation temps-réel ne peut pas alors plus convenir. Pour l'étude et l'optimisation de l'organisation d'une zone, d'autres outils sont à envisager, tels que basés sur l'utilisation d'événements discrets.

De même, si l'on souhaite étudier des aspects aléatoires ou non-déterministes, comme la réaction face à une défaillance, une technique classique consiste à travailler par méthode de Monte-Carlo. Avec celle-ci, on étudie un grand nombre de fois le comportement du système face à des évènements aléatoires de sorte à vérifier que dans une proportion acceptable, le système réagit correctement. A nouveau, l'aspect temps-réel interdit (sauf cas de parallélisation) de mener à bien une telle étude nécessitant de longues durées de simulation.

B. *Notion d'échelle*

Plus globalement, une notion d'échelle peut être appliquée au modélisation numérique selon la granularité temporelle des éléments pris en compte. Au plus fin, on peut être temps-réel et modéliser le système avec un écoulement du temps similaire au réel pour une étude fine du comportement de chaque objet et de chaque élément et ainsi, être proche d'un phénomène continue d'évolution des grandeurs du système. A contrario, on peut agréger et simplifier la modélisation du comportement en évènements ponctuels caractérisant le début ou la fin d'une action et permettant ainsi d'accélérer le déroulement temporel de la simulation. Des outils dédiés comme Flexim [5], permettent et sont spécialisés pour mener ce type d'études destinées à étudier un comportement sur une longue période.

IV. Evolution et usage annexe du simulateur

A. *Du simulateur vers un jumeau numérique*

Parallèlement au développement et à l'usage du simulateur d'infrastructure et d'équipements portuaires, le projet mené par le laboratoire vise à la réalisation d'une maquette physique et à échelle réduite (échelle HO ou 1/87ème) d'une telle infrastructure. Il comporte des grues, des AIV, un bateau, des zones de chargement/déchargement, des camions et un train avec sa voie ferrée. La figure 5, ci-après, est une photo des équipements utilisés dans la maquette physique en élaboration.



Figure 5. Equipements de la maquette physique, base d'un potentiel jumeau numerique

L'outil simulateur pourra alors évoluer d'un rôle de simulateur/émulateur pour la conception vers un rôle de jumeau numérique, c'est-à-dire fournir une reproduction virtuellement la maquette réelle.

L'apport de cette évolution est alors d'offrir aux développeurs un outil de test et de mise au point, plus pratique et plus rapide de mise en œuvre que le système réel physique. Les codes réalisés et mis au point avec le simulateur pourront alors au final être téléversés sur les équipements réels en vue de la validation du bon comportement de l'ensemble.

La difficulté de la transposition vers le jumeau numérique réside dans l'indentification du comportement réel des éléments physiques en vue de leur modélisation la plus précise et la plus exacte possible sur le simulateur. Une mise à jour continue et régulière du modèle jumeau est ainsi à réaliser de sorte à maintenir la justesse des caractéristiques de chaque éléments vis-à-vis du réel, malgré les évolutions naturelles (usure, vieillissement) ou volontaire ajout, modification ou déplacement de composants.

B. *Application pour l'enseignement*

Le développement d'un tel simulateur est et fut l'occasion d'accueillir des stagiaires ou des étudiants en projet de fin d'étude d'ingénieur. La diversité des compétences requises en termes de modélisation, d'automatique, d'informatique ou de design 3D, associé à la modularité du projet (une variété d'équipements, différents types de contrôle/commande, divers représentations d'objets 3D) en font un projet particulièrement intéressant pour l'apprentissage et la formation. Aux compétences techniques, ce projet permet, aussi, d'approfondir des compétences liées à la gestion de projet d'envergure vis-à-vis par exemple, de la coopération entre acteurs ou la capacité à permettre une capitalisation collective d'un savoir-faire.

Mais, à ceci, l'usage de ce type simulateur temps-réel peut également être employé dans l'enseignement pour le développement de la commande de processus. Ainsi, avec cette possibilité de remplacer une machine ou un équipement réel par une machine virtualisée, il est possible d'en faire la commande sans risque vis-à-vis d'un mauvais comportement tel que la collision d'outils, d'objets, de robots, de véhicules...

Cette technique s'associe également assez bien à un processus "Hardware in the Loop" où l'élément d'étude, tel que l'unité de commande, est réel et est alors un véritable équipement industriel, connecté à la partie physique simulée par l'intermédiaire d'une carte d'entrées/sortie servant d'interface. L'intérêt est aussi pour l'apprenant d'apprendre à utiliser un véritable équipement de commande alors que la partie annexe, c'est-à-dire, le reste de la machine n'est que virtuel et plus simple d'emploi .

A titre d'exemple, l'outil ITS-PLC [6] propose un environnement simulé de ce type où un véritable automate programmable industriel pourra contrôlé une machine virtuelle. La figure 6 suivante illustre l'interface de ce logiciel.

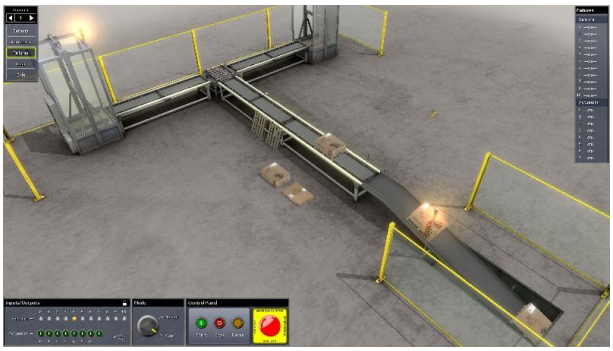


Figure 6. Une interface d'ITS-PLC

V. Conclusion ou bilan

L'usage d'un simulateur de processus industriel lors de la phase de conception peut être un outil très efficace pour les activités de développement et de mise au point d'un système à concevoir. Dans le cadre du projet SPEED, ce type de simulateur vise à permettre de faciliter et d'optimiser la réalisation, le développement et la mise au point de nouveaux algorithmes et techniques de commande et de coordination d'équipements automatisés, pour les différents acteurs du projet.

Il pourra, également, accompagner une réalisation physique et en devenir son jumeau numérique, c'est-à-dire un modèle virtuel de son comportement en vue d'étudier les améliorations, les optimisations ou les évolutions possibles à moindre effort et avec un maximum d'efficacité, avant leur mise en œuvre.

Enfin, la maîtrise de cette technique des simulateurs/émulateurs permet des applications destinées à l'enseignement où la commande d'équipements lourds et

complexes peut être réalisée de façon simple et sans risque grâce à leur virtualisation.

VI. RÉFÉRENCES

[1] "InTraDE confère un avantage concurrentiel aux ports européens", https://ec.europa.eu/regional_policy/fr/projects/france/european-ports-gain-competitive-edge-with-intrade

[2] "The Smart Ports Ecosystem of the European 2 Seas region", https://www.smartportsecosystem.com/

[3] "The game engine you waited for", https://godotengine.org/

[4] "plateforme pour la création et l'exploitation de contenu 3D interactif en temps réel.", https://unity.com/fr

[5] "Logiciel de simulation et d'analyse de flux 3D", https://www.flexsim.com/fr/

[6] " ITS PLC, Interactive Training System for PLC", https://realgames.co/its-plc/

Session 2-B : Pilotage du système de production

Retour d'expérience sur la réalisation du jumeau numérique d'une Cellule Flexible avec Emulate3D

Jules Jouffroy
ISMEP - Supméca
3 Rue Fernand Hainaut
93400 Saint-Ouen, France
jules.jouffroy@edu.supmeca.fr

Bernard Riera, Alexandre Parant, Alexandre Philippot, François Gellot, Stéphane Lecasse
CReSTIC – UFR Sciences Exactes et Naturelles
Moulin de la Housse – BP 1039
51687 Reims Cedex 2, France
bernard.riera@univ-reims.fr

Résumé— Le virtual commissioning et les jumeaux numériques sont de nos jours des enjeux importants dans le cadre de l'industrie 4.0. Dans cet article, un retour d'expérience sur la réalisation du jumeau numérique de la cellule flexible CellFlex 4.0 de l'Université de Reims-Champagne Ardenne avec le logiciel Emulate3D est proposé. L'objectif est de disposer d'un jumeau numérique pour pouvoir vérifier la partie commande de l'installation en amont (virtual commissioning) de la mise en service réelle.

Mots-clés— Virtual Commissioning, Jumeau Numérique, Emulate3D, CellFlex

I. INTRODUCTION – VIRTUAL COMMISSIONING ET JUMEAUX NUMÉRIQUES

Le monde industriel est en constante évolution, et avec l'arrivée de l'industrie 4.0, la question de l'automatisation des procédés et leur correcte réalisation constitue un véritable enjeu. C'est pourquoi l'importance des nouvelles technologies du numérique telles que la réalité augmentée, les intelligences artificielles, le virtual commissioning ou les jumeaux numériques est autant justifiée de nos jours [1, 2, 3, 4].

Un jumeau numérique est une réplique numérique d'un objet, d'un processus ou d'un système, comme par exemple un modèle CAO, qui peut être utilisé à diverses fins, comme par exemple du calcul de résistance de pièces par éléments finis, permettant de prédire si une pièce cassera ou non lors de son fonctionnement suivant le cahier des charges défini [5, 6, 7].

Une autre de ces nombreuses applications est le virtual commissioning [8, 9]. Le principe est de faire une mise en service virtuelle d'un jumeau numérique et de répliquer le comportement d'un environnement de fabrication physique avec un système logiciel afin de fournir un environnement virtuel. Ce dernier permet à l'ingénieur automaticien ou roboticien de valider leurs logiques d'automatisation et interfaces Homme-Machine avant la mise en service dans l'environnement de production.

Dans cet article, nous décrivons le travail de réalisation du jumeau numérique de la Cellule Flexible CellFlex 4.0 [10] de l'Université de Reims Champagne-Ardenne avec le logiciel Emulate3D, en vue de faire des applications pédagogiques et de recherche de vérification de la partie commande.

La réalisation du jumeau numérique a nécessité 4 mois à un stagiaire de niveau M1 de SUPMECA. Le résultat est satisfaisant et le clone virtuel obtenu correspond fonctionnellement et dynamiquement à l'installation réelle. Toutefois, la réalisation du jumeau numérique, même si l'on dispose des plans CAO, est une tâche ardue et chronophage. Le retour sur investissement n'est donc pas évident si l'on considère uniquement des applications de vérification de la commande et de mise en service virtuelle. Il convient donc d'exploiter le jumeau numérique à d'autres fins que la mise en service virtuelle et la vérification de la partie commande.

La première partie de l'article présente la cellule flexible CellFlex 4.0. La deuxième partie est consacrée au logiciel Emulate3D. Enfin, la troisième et dernière partie propose un retour d'expérience et sur les difficultés rencontrées.

II. PRÉSENTATION DE LA CELLFLEX 4.0

La cellule flexible ou CellFlex 4.0 (Figure 1.) du laboratoire CReSTIC de l'Université de Reims Champagne-Ardenne (URCA) est l'une des trois plateformes technologiques avec le supercalculateur régional ROMEO et le Centre Image. Elle consiste en une chaîne de production miniature orientée « emballage et conditionnement » comprenant nombre de matériel de contrôle et de commande, de vérins, moteurs et autres actionneurs pneumatiques ainsi que de logiciels de supervision spécialisés.

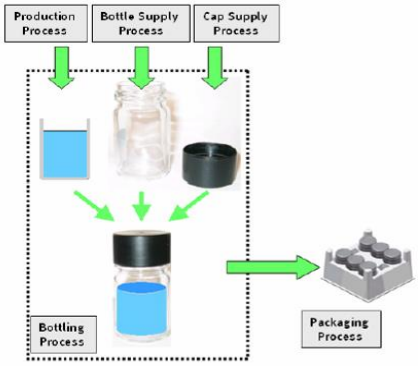


Figure 1. PROCESS DE PRODUCTION DE CELLFLEX

La CellFlex 4.0 tient son nom de cellule flexible par sa forme et sa constitution et de son intégration des technologies de l'industrie du futur. Il s'agit en effet d'une combinaison arrangeable de différentes stations modélisant chacune une étape spécifique d'un processus de production. Elle dispose d'une diversité en matière d'actionneurs, d'entrées, de sorties et de mouvements possibles. Elle est constituée de six stations articulées autour d'un convoyeur central dont les positions peuvent en théorie changer. L'étude se place dans le cas où la configuration actuelle représente une chaîne bouclée avec plusieurs entrées et sorties possibles. En effet, une reconfiguration des stations impliquerait des modifications importantes des liens dynamiques entre stations dans le jumeau numérique. C'est notamment support d'étude à de nombreuses thèses et travaux de recherches, et en particulier le projet ANR HUMANISM [11]

La chaîne commence avec la station bouchon qui représente une sortie de magasin et une mise en ligne automatisée. Des bouchons de trois couleurs différentes (rouges, blancs ou noirs) sont alors commandés et mis dans une file d'attente. On y trouve un convoyeur, une ventouse à air comprimé couplée à un vérin rotatif (Figure 2.) et un bras à pinces motorisé (Figure 3.).



Figure 2. MAGASIN DE BOUCHONS ET VERIN ROTATIF

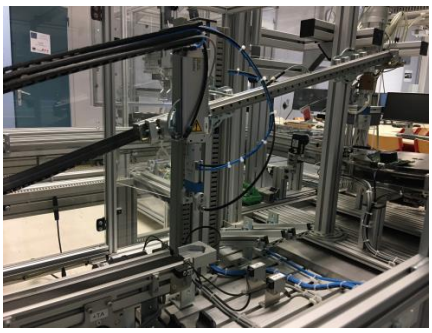


Figure 3. BRAS A PINCES MOTORISE

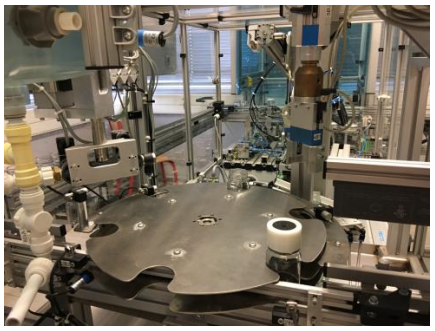


Figure 4. CARROUSEL DE LA STATION EMBOUTEILLAGE

Les bouchons sont ensuite transférés à la station suivante : embouteillage-transfert. Les bouteilles arrivent vides dans un carrousel (Figure 4.), sont remplies, bouchonnées et envoyées pour être transférées sur le convoyeur central par une pince pouvant prendre jusqu'à trois bouteilles à la fois (Figure 5.).

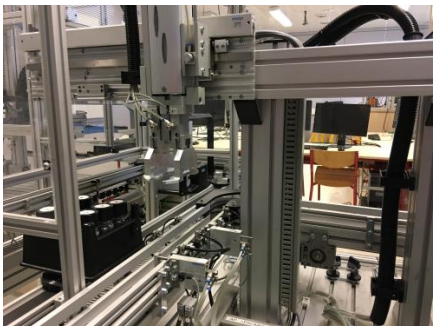


Figure 5. STATION TRANSFERT VERS LE CONVOYEUR CENTRAL

Le liquide contenu dans les bouteilles est préparé dans la station de mixage (Figure 6.) qui permet de préparer des mélanges de trois liquides différents. Elle ne contient cependant pour l'instant que de l'eau.



Figure 6. STATION MIXAGE

Le convoyeur central communique avec toutes les stations. Les bouteilles sont placées dans des six-packs, eux-mêmes disposés sur des palettes numérotées (Figure 7.). Le tout simule un système transitique interne entre les différents traitements.

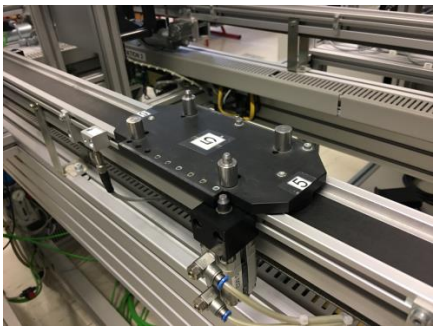


Figure 7. UNE PALETTES DU CONVOYEUR CENTRAL

La station import-export (Figure 8.) représente une interface entrée/sortie de la ligne de production avec la possibilité d'interagir avec les six-packs vides ou pleins, comme le ferait un transpalette.

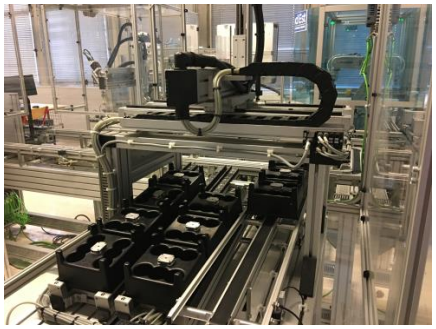


Figure 8. STATION IMPORT-EXPORT

La station de stockage (Figure 9.) représente un magasin de six-packs vides ou pleins, avec possibilité d'interagir manuellement. Sa particularité est son système de pelle permettant de déplacer les six-packs dans 17 emplacements prédéfinis.

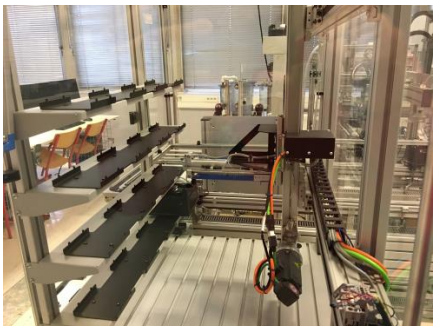


Figure 9. STATION STOCKAGE

Enfin la station robotisée (Figure 10.) fait office de retour : elle débouche les bouteilles, les vide et range les bouchons au bon endroit. Ce bras robotisé Mitsubishi est très récent, il n'a pas encore été implémenté dans le jumeau numérique.

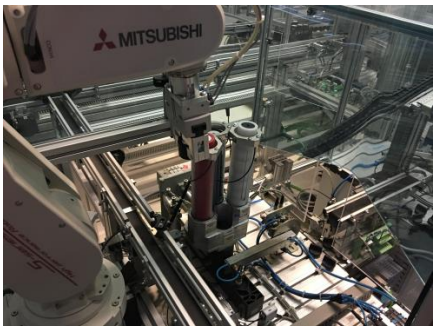


Figure 10. STATION ROBOTISEE

La CellFlex fait office de support d'étude à de nombreuses thèses et travaux de recherches, et en particulier le projet ANR HUMANISM [11]. Elle est également utilisée dans le cadre des travaux pratiques notamment pour la découverte des SAP (Systèmes Automatisés de Production), l'apprentissage de la programmation des APIs (Automates Programmables Industriels), des SCADAs (Supervisory Control And Data Acquisition) et la mise en place d'un MES (Manufacturing Execution System).

On notera que les plans CAO de la cellule flexible sont disponibles. Cela est absolument nécessaire pour pouvoir réaliser, dans un temps raisonnable, un jumeau numérique structurellement fidèle au système réel. Ce travail a été réalisé au moyen du logiciel EMULATE 3D [12].

III. PRÉSENTATION DU LOGICIEL EMULATE3D

Emulate3D développé par Rockwell Automation est un logiciel de simulation industrielle permettant de modéliser des jumeaux numériques, notamment pour du virtual commissioning, de la simulation de débit ou encore de la démonstration industrielle. Il est adapté aux chaînes de production, c'est-à-dire : des systèmes comprenant des convoyeurs, robots ou encore des zones de stockages qui sont facilement modélisables et simulables avec les moteurs physiques disponibles.

Le logiciel propose un catalogue de sous-systèmes afin de modéliser la ligne de production de notre choix. Il y a de nombreuses possibilités quant au type de convoyeur (à bande, à rouleaux, motorisé ou non), de chargements, de véhicules, de centres de stockage ou de robots pilotés. Toutes les propriétés physiques, de connectivité ou encore de représentation de chaque élément sont modifiables, permettant une grande capacité de personnalisation (Figure 11.).

Une autre possibilité est de pouvoir importer des fichiers CAO de modèles déjà existants, et de travailler avec le module CAD Is The Model (CAD.I.T.M) qui permet de convertir un modèle 3D immobile et seulement défini par sa hiérarchie de pièces en un système dynamique. Le principe est de définir des mouvements via des liaisons cinématiques pour chaque pièce, de déterminer quelle pièce est solidaire à quelle pièce, quel est le référentiel du mouvement, …

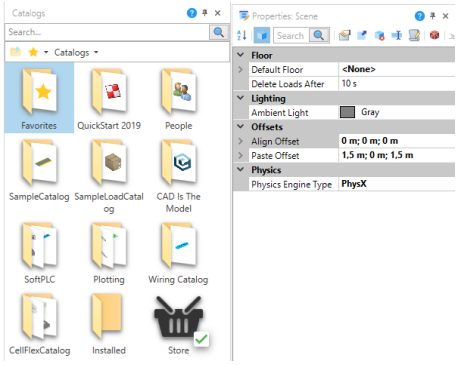


Figure 11. ONGLETS CATALOGUE (GAUCHE) ET PROPRIETES (DROITE)

On applique ensuite des propriétés de moteurs déterminant ainsi des vitesses et des accélérations de déplacement aux pièces, des propriétés d'actionneurs pour contrôler les mouvements, des propriétés de capteurs de proximité ou de fin de course, de surfaces de contact et de fixation (grappins), de surfaces mobiles ou encore de solides dynamiques (Figure 12.).

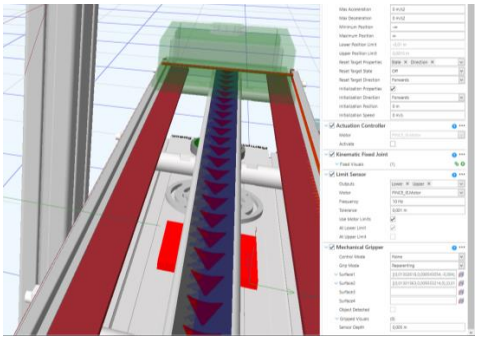


Figure 12. ONGLET DE PROPRIETES CAD.I.T.M

Quand le système est mobile et la physique modélisée, il y a la possibilité de connecter les différents actionneurs et capteurs à des automates simulés (Soft-PLC ou Soft-API) en intégrant des blocs de communication importés des catalogues disponibles tels que des automates simulés Siemens, Mitsubishi ou Rockwell, ou de simples blocs de code C#, Javascript ou de logique Ladder. Il est également possible de connecter le modèle Emulate3D à des automates simulés externes au logiciel avec une compatibilité Siemens, Beckhoff, Mitsubishi, Rockwell ou Modbus, et à des automates réels (Figure 13.).

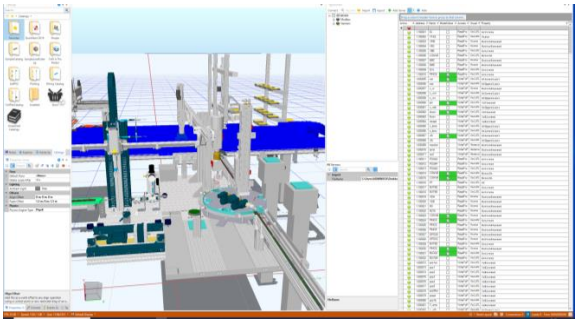


Figure 13. FENETRE DE CONNECTIVITE MODBUS

En ce qui concerne les différentes applications du jumeau numérique Emulate3D après modélisation, il est possible de l'utiliser connecté à un PLC ou Soft-PLC afin de vérifier la commande automatique du système en amont du lancement de la production (virtual commissioning). Il est également possible d'utiliser le moteur d'acquisition vidéo et image pour obtenir de belles démonstrations de systèmes industriels en utilisant la technologie Ray-Tracing (Figure 14.), d'utiliser la compatibilité du logiciel avec la VR pour faire des démonstrations immersives (Figure 15.) et enfin de procéder à de l'exploitation de données statistiques sur le système modélisé pour un grand nombre d'essais en vitesse accélérée.

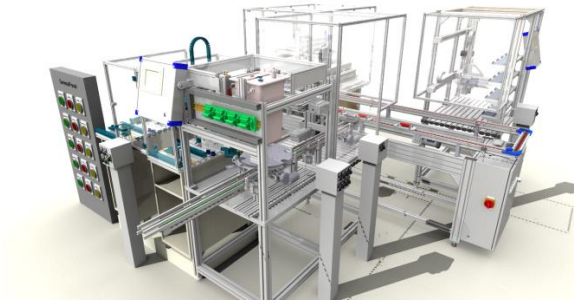


Figure 14. CAPTURE AVEC LE MOTEUR D'AFFICHAGE RAY-TRACING

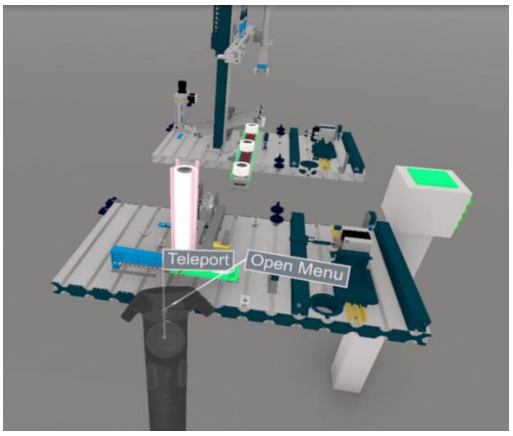


Figure 15. TEST D'EMULATE3D EN VR AVEC LE CASQUE HTC VIVE

IV. LES DIFFICULTES DE MODELISATION RENCONTREES AVEC EMULATE3D

La CellFlex est un large système comprenant un grand nombre de mouvements différents et une grande variété d'actionneurs. Certains éléments tels que les six-packs, les palettes ou encore la pince pouvant tenir trois bouteilles à la fois ont des formes inédites et complexes. C'est une des nombreuses raisons qui ont rendu la modélisation de la CellFlex sur Emulate3D plus compliquée que prévu, ces formes et mouvements inédits n'étant pas prévus initialement dans le logiciel.

Un second problème rencontré est la représentation de la bistabilité d'un actionneur. En effet dans Emulate3D, de base, tous les actionneurs sont monostables (Exemple : le bras va à gauche si son actionneur est à 0 et à droite s'il est à 1).

Cependant la plupart des mécanismes de la CellFlex fonctionnent de manière bistable (Exemple : le bras va à gauche si la commande « gauche » est à 1, et à droite si la commande « droite » est à 1, nulle part sinon). Il a donc fallu modéliser ce comportement en passant par un code spécifique en Ladder (Figure 16.). Idem pour le carrousel dont l'actionneur monostable ne permettait pas de le faire tourner d'un sixième de tour par front montant sans retour en arrière. Le problème a été corrigé cette fois-ci par quelques lignes de Javascript.

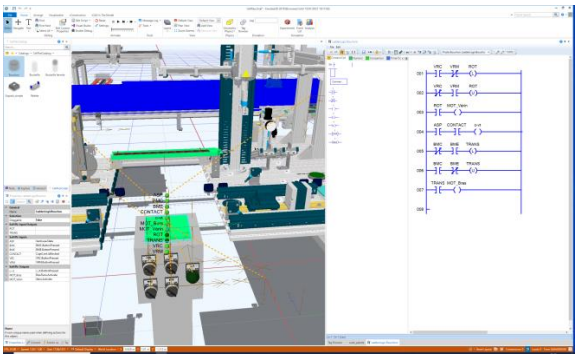


Figure 16. CODE LADDER POUR LA SIMULATION DE LA BISTABILITE

Un autre problème rencontrés concerne le choix du moteur physique. Emulate 3D a trois moteurs physiques différents au choix : Bullet, ODE ou PhysX. Les deux premiers étant très gourmands en ressources informatiques, notre choix s'est tourné vers PhysX. Le moteur physique associe à chaque objet visuel un corps physique invisible qui lui permet d'interagir avec son environnement : c'est le principe de masque de collision (ou hitbox). Cependant lorsque l'objet en question est creux ou un tant soit peu concave, le moteur physique PhysX peine à discrétiser les contours, et lorsque l'on visualise la hitbox, on se rend compte de l'ampleur du problème (Figure 17.).

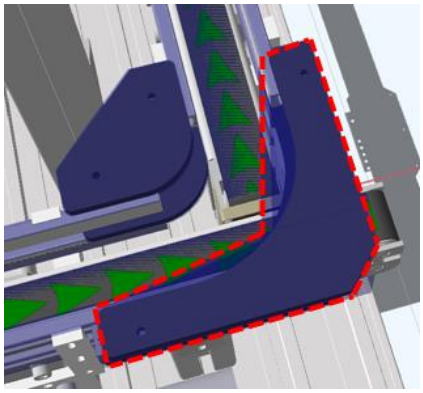


Figure 17. APPROXIMATION DU CORPS CONCAVE (EN ROUGE)

La solution la plus simple est donc de discrétiser à « la main » les courbes problématiques en une succession de boites beaucoup mieux reconnues par le moteur physique. Ce système qui semble pourtant approximatif rend de meilleurs résultats que la discrétisation automatique initiale pour des objets de cette taille (Figure 18.).

Enfin, il est clair que l'effort à fournir pour parvenir à un clone virtuel satisfaisant sur les plans fonctionnel et dynamique est important. Disposer des plans CAO est clairement nécessaire, mais n'est pas suffisant. Les logiciels de type EMULATE 3D apportent une aide indéniable, mais dès que l'on a affaire à des objets hors catalogue, il faut faire preuve d'astuces et d'imagination pour parvenir à une solution correcte.

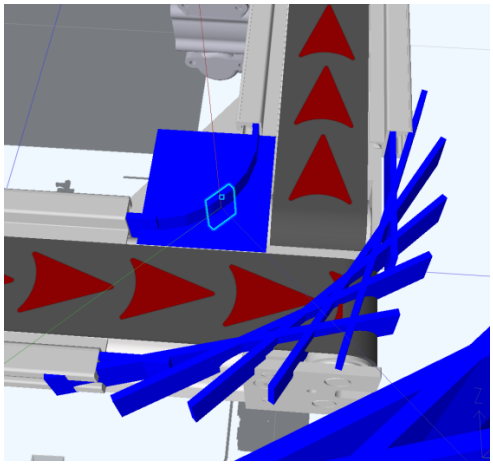


Figure 18. DISCRETISATION MANUELLE DE LA COURBE

V. CONCLUSION - MES IMPRESSIONS SUR EMULATE3D

Emulate3D est un logiciel de modélisation spécialisé dans la représentation de chaînes de production standards et à grande échelle, c'est-à-dire de l'ordre du mètre pour des lignes s'étendant sur de grandes surfaces. Travailler sur ce logiciel en application à la CellFlex, c'est-à-dire un système de taille beaucoup plus réduite de l'ordre du centimètre voire même parfois du millimètre, et ayant des formes non standards qui sortent de l'ordinaire, comme par exemple des six-packs à la géométrie concave et alésés à divers endroits, a été une expérience des plus intéressantes. Voir comment s'adapte ce logiciel à un modèle aussi réduit et complexe, quels aspects modélisés entrent en collision avec le système réel et comment arranger au mieux le réalisme de la simulation montre à quel point développer un jumeau numérique fidèle est compliqué.

Malgré les modèles CAO de la CellFlex qui étaient disponibles, 4 mois ont été nécessaires pour réaliser le jumeau numérique sur Emulate3D. Cela met bien en évidence la quantité de travail à abattre afin de produire un jumeau numérique fonctionnel, quantité de travail et temps qui sont normalement gagnés en entreprise, car la phase de virtual commissioning, permet de prédire les problèmes sur chaîne avant même la mise en service du système réel. Dans le cas de la CellFlex, le modèle développé (Figure 19.) diffère du modèle initial au niveau de son aspect (Figure 20.), ce qui reflète toutes les manipulations qui ont été nécessaires pour enrichir les fonctionnalités du logiciel, les adapter aux caractéristiques complexes de la CellFlex et avoir un modèle final correspondant fonctionnellement et dynamiquement au modèle réel.

Cette réalisation d'un jumeau numérique avec Emulate3D a montré que les difficultés majeures rencontrées proviennent de la complexité du système réel (partie opérative et pièces) à simuler, que ce soit à cause de sa géométrie, de sa taille, ou de ses mouvements. Le problème de la validation du jumeau numérique est également posé. En effet, on constate que la solution la plus naturelle pour vérifier le comportement dynamique d'un jumeau numérique est d'utiliser une partie commande, dont il faut s'assurer qu'elle est correcte ! Enfin, la réalisation du jumeau numérique, même si l'on dispose des plans CAO, est une tâche ardue et chronophage. Le ROI n'est donc pas évident si l'on considère uniquement des applications de vérification de la commande et de mise en service virtuelle. On peut d'ailleurs se poser la question de savoir si la réalisation d'un jumeau numérique basé sur les plans CAO est le meilleur outil pour vérifier une partie commande. D'autres approches de simulation, plus simples, ou des méthodes formelles, peuvent également être utilisées pour faire du virtual commissioning. Il convient donc d'exploiter le jumeau numérique à d'autres fins que la mise en service virtuelle et la vérification de la partie commande, en particulier dans le cadre d'applications liées par exemple au suivi de la production et l'aide à l'opérateur de supervision.

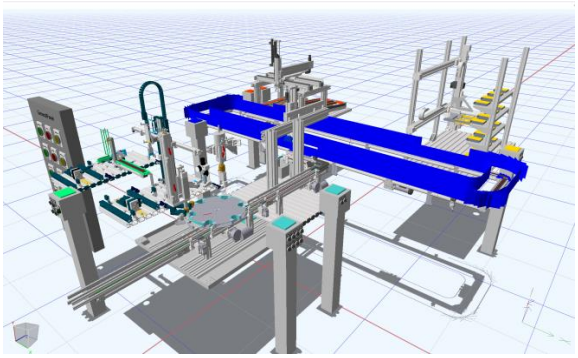


Figure 19. MODELE FINAL RENDU, LES COLLISIONS CREEES VISIBLES

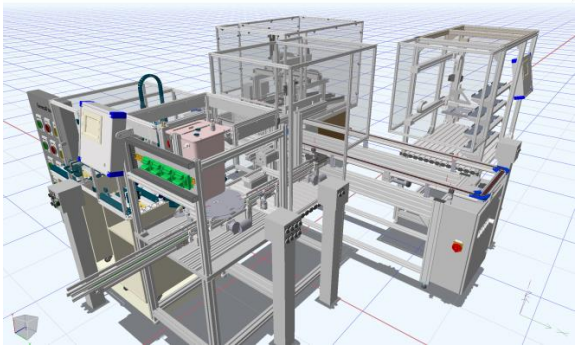


Figure 20. MODELE CAO RECUPERE INITIALEMENT

VI. REMERCIEMENT

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet HUMANISM, Programme de recherche ANR-17-CE10-0009, financé par l'ANR "Agence Nationale de la Recherche". Ce projet implique trois laboratoires en sciences de l'automatique et en facteurs humains, le CReSTIC (Reims), le Lab-STICC (Lorient) et le LAMIH (Valenciennes). Les auteurs remercient chaleureusement cette institution.

VII. RÉFÉRENCES

[1] Hartmann D., Van der Auweraer H. (2020). Digital Twins. Computers and Society.

[2] Hendrik van der Valk, Hendrik Haße, Frederik Möller, Michael Arbter, Jan-Luca Henning and Boris Otto. A Taxonomy of Digital Twins. 26th Americas Conference on Information Systems (AMCIS), Salt Lake City, USA, August 2020.

[3] Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. Procedia Manufacturing, 11(June), 939–948. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198.

[4] Negri, E., Berardi, S., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2020). MES-integrated digital twin frameworks. Journal of Manufacturing Systems, 56(December 2019), 58–71. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.05.007.

[5] Bouzid M., Ayadi M., Mansour I., Cheutet V., Haddar M. (2017). KSim: an Information System for knowledge management in Digital Factory. Concurrent Engineering: Research & Applications, 25(4):303-315, 2017, https://doi.org10.1177/1063293X17702689

[6] Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine, 51(11), 1016–1022. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

[7] Besbes, M., Zolghadri, M., Affonso, R. C., Masmoudi, F., & Haddar, M. (2020). 3D facility layout problem. Journal of Intelligent Manufacturing, 1-26, https://doi.org/10.1007/s10845-020-01603-z.

[8] Niang M., Riera B., Philippot A., Zaytoon J., Gellot F., Coupat R. A methodology for automatic generation, formal verification and implementation of safe PLC programs for power supply equipment of the electric lines of railway control systems. Computers in Industry, 123:103328, 2020.

[9] https://www.cimes-hub.com/sites/default/files/inoprod_virtual_commissioning.pdf

[10] https://www.univ-reims.fr/meserp/cellflex-4.0/cellflex-4.0,9503,27026.html

[11] Philippot A., Riera B., Kunreddy V., Debernard S. Advanced Tools for the Control Engineer in Industry 4.0. 1st IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS 2018) 2018, https://doi.org/10.1109/ICPHYS.2018.8390766.

[12] https://www.demo3d.com/Emulate3D-Controls-Testing/

Le jumeau numérique dans le pilotage de performance

Amel Souifi
Laboratoire Quartz
SUPMECA, 3 Rue Fernand Hainaut
Saint Ouen– France
amel.souifi@supmeca.fr

Zohra Cherfi Boulanger
Laboratoire Roberval
60203 Compiègne cedex, France
Compiègne – France
zohra.cherfi-boulanger@utc.fr

Marc Zolghadri
Laboratoire Quartz
3 Rue Fernand Hainaut
Saint Ouen– France
marc.zolghadri@supmeca.fr

Maher Barkallah
LA2MP
Route Soukra Km 3.5, BP 1173, 3038
Sfax– Tunisie
maher.barkallah@enis.tn

Mohamed Haddar
LA2MP
Route Soukra Km 3.5, BP 1173, 3038
Sfax– Tunisie
Mohamed.Haddar@enis.rnu.tn

Résumé— La transition vers l'industrie 4.0 est supportée par plusieurs technologies telles que le jumeau numérique. Étant donné qu'il devrait être développé à des fins spécifiques, nous sommes intéressés par l'application du jumeau numérique pour le pilotage de performance. L'objectif de ce papier est d'identifier, à travers un état de l'art, les caractéristiques du jumeau numérique afin de motiver son utilisation pour le pilotage de la performance. Nous indiquons qu'un jumeau numérique d'un atelier de production comprend des jumeaux numériques de produits et de processus capables d'alimenter les systèmes de mesure des performances avec des données pertinentes. Ensuite, nous réalisons une correspondance entre un système de pilotage de performance et un jumeau numérique dans le but de montrer l'utilité de ce dernier. Et nous proposons un ensemble d'utilisations du jumeau numérique dans le pilotage de performance, inspiré des différents défis auxquels sont confrontés les systèmes de pilotage.

Mots-clés— Jumeau numérique, Pilotage de performance, atelier de production.

I. INTRODUCTION

La performance est exprimée en termes de résultat obtenu par rapport à un objectif préalablement fixé. Selon [1], performance, objectif et action sont des facettes différentes d'une même entité. Le pilotage de performance consiste à s'assurer que les objectifs de l'organisation ont été atteints de manière cohérente, efficace et efficiente [2]. Il permet à la direction de savoir dans quelle mesure l'organisation accomplit ses tâches et dans quelle mesure les objectifs de l'organisation sont atteints [3]. Les systèmes de pilotage de performance sont basés sur un système de mesure des performances, des règles de décision et des plans d'action pour corriger les performances réelles ou anticiper les baisses de performances futures. [4] a élaboré un cadre global pour les systèmes de pilotage afin de décrire leur structure et leur fonctionnement et de fournir une vue d'ensemble de leurs principaux aspects. Le cadre met en évidence douze questions principales nécessaires pour décrire les caractéristiques et l'utilisation des systèmes de pilotage de performance. Ces questions sont liées à la vision et à la mission de l'organisation, aux facteurs clés, à la structure, à la stratégie et aux plans, aux principales mesures de performance, aux objectifs, à l'évaluation des performances, aux systèmes de récompense, aux flux, systèmes et réseaux d'information, à l'utilisation du système de pilotage, au changement, à la force et la cohérence des liens entre les composants d'un système de pilotage.

La modélisation permet de représenter les différentes activités d'une entreprise de manière simplifiée et plus au moins fidèle à la réalité. L'évaluation des performances est l'un des objectifs de la modélisation, permettant l'association d'indicateurs aux différents processus de l'entreprise. Cette utilisation est motivée par le rôle de la modélisation dans la clarification du processus décisionnel et dans la compréhension, l'explication et l'anticipation des problèmes de performance du système contrôlé [5]. Une exigence importante dans le développement des modèles de simulation d'un atelier de production est de fournir aux parties prenantes des informations et des connaissances pour les aider à prendre des décisions [6]. Dans ce contexte, le jumeau numérique, en tant

que modèle de simulation, est un outil prometteur pour le pilotage de performance grâce à l'intégration des données et à la représentation en temps réel du système physique.

Proposé en premier lieu par Michael Grieves dans une présentation sur la gestion du cycle de vie des produits (PLM) [7], le jumeau numérique est considéré comme un élément clé de l'industrie 4.0. La NASA a établi la première définition du jumeau numérique comme "une simulation intégrée multi-physique, multi-échelle, et probabiliste d'un véhicule ou d'un système qui utilise les meilleurs modèles physiques disponibles, les mises à jour des capteurs, l'historique de la flotte, etc. pour refléter la vie de son jumeau volant [8]. Le jumeau numérique est utilisé pour modéliser et simuler l'état et le comportement de son jumeau physique en temps réel [9]. Il exploite les données en temps réel collectées sur le système physique pour choisir entre un ensemble d'actions afin d'optimiser le système de production et d'améliorer la productivité [10]. Il dispose d'informations sur le système ou le produit depuis sa conception jusqu'à son élimination [11] permettant une synchronisation entre le monde réel et le monde virtuel. [12] a déclaré que le cycle de vie d'un jumeau numérique est similaire à un cycle de vie de produit et qu'il comporte quatre phases : création, production, exploitation et élimination. De point de vue modélisation et simulation, le jumeau numérique est considéré comme la prochaine vague dans l'approche de modélisation, de simulation et d'optimisation [13].

Depuis la première introduction du concept de jumeau numérique, il a été utilisé pour différentes applications dans plusieurs domaines tels que la conception et la maintenance. Toutefois, de il y a un manque de travaux s'intéressant à son utilisation dans la mesure et le pilotage de performance. Dans ce papier, nous nous basons sur la littérature pour déterminer les spécificités du jumeau numérique afin d'identifier ses contributions possibles au pilotage de performance. Nous commençons par présenter certaines des applications industrielles du jumeau numérique. Ensuite, nous soulignons que le jumeau numérique d'un atelier de production peut être constitué de jumeaux numériques de produits et de processus. Ces jumeaux fournissent des données qui alimentent le système de mesure des performances pour une prise de décision plus éclairée. Ensuite, nous faisons une correspondance entre le jumeau numérique et les systèmes de pilotage de performance pour motiver son utilisation. Enfin, nous proposons quatre contributions possibles du jumeau numérique principalement : la simulation des performances du système, supporter le couplage entre pilotage proactif/prédictif et réactif, la visualisation des indicateurs clés de performance et la compréhension de l'interdépendance entre les différents mécanismes de contrôle dans une organisation.

II. APPLICATIONS DU JUMEAU NUMERIQUE DANS L'INDUSTRIE

Le jumeau numérique est un élément clé de l'usine intelligente. Il permet d'intégrer des données provenant des différentes phases du cycle de vie du produit et de résoudre ainsi le problème des îlots d'information. Pour la phase de conception, [14] a proposé un modèle de référence de jumeau numérique pour la conception du processus d'assemblage intelligent. Ce modèle est également utilisé pour la mise en service virtuelle de nouveaux systèmes de fabrication. La mise en service virtuelle (Visual Commissioning VC) est le processus de vérification et de validation des systèmes par rapport à un modèle virtuel et non par rapport au système automatisé réel [15]. Le jumeau numérique supporte également l'optimisation itérative du schéma de conception en aidant les concepteurs à ajuster itérativement les attentes et à améliorer les modèles de conception, facilitant la conception de produits personnalisés [16]. [17] a souligné que le jumeau numérique permet de mieux comprendre la forme et les comportements émergents des systèmes et de réduire le facteur "je n'ai pas vu ça venir". Aussi, permet-il l'intégration de données massives générées par différents capteurs surveillant les actifs physiques. L'analyse de ces données permet de mieux planifier la maintenance [18]. En tant que modèle de simulation, le jumeau numérique permet de simuler différents scénarios afin d'optimiser les performances de son homologue physique [19]. Selon [20], le jumeau numérique favorise l'intégration horizontale et verticale. Pour [21], il réalise une cartographie interactive opportune et précise entre l'espace réel et virtuel, utile pour le contrôle de la qualité et l'optimisation de l'assemblage de produits complexes. [17] résume que le jumeau numérique possède deux rôles principaux : interrogatif car il fournit des informations sur l'état actuel et passé de son jumeau réel et prédictif vu qu'il assure la prédiction des performances futures du système. Mais le jumeau numérique peut également être proactif, capable de prendre des décisions basées sur les performances actuelles et futures du système.

III. JUMEAU NUMERIQUE D'UN ATELIER DE PRODUCTION

Dans cet article, nous adoptons le modèle conceptuel d'un atelier de production proposé par [22]. Il se compose de quatre éléments : L'atelier physique (Physical Shop-floor PS), l'atelier virtuel (Virtual Shop-floor VS), le système de service de l'atelier (Shop-floor Service System SSS) et les données du jumeau numérique de l'atelier (Shop-floor Digital Twin Data SDTD). L'atelier physique contient un ensemble d'entités telles que des machines, des matériaux et des êtres humains. L'atelier virtuel comprend des modèles statiques et dynamiques reflétant le fonctionnement de l'atelier physique. "Le SSS est une plate-forme de services intégrés, qui encapsule les fonctions du système d'information d'entreprise, des outils assistés par ordinateur, des modèles et des algorithmes, etc. en sous-services, puis les combine pour former des services pour des demandes spécifiques de PS et VS" [22]. Enfin, le module des données réalise l'intégration de données provenant de PS, VS et SSS. Il comprend également des méthodes de modélisation, d'optimisation et de prévision. Pour nous, le SDTD devrait également permettre de transformer les données brutes des trois autres composants en données intelligentes. En effet, les données ne sont pas toujours de qualité ou de valeur, et un traitement préalable permet d'extraire des informations pertinentes. Comme l'atelier physique est composé de processus utilisant des ressources pour obtenir des produits finis, l'atelier virtuel représentera les mêmes composants. Les modèles constituant l'atelier virtuel peuvent être des modèles de produits et de processus. La présence de ces modèles dépend des objectifs du jumeau numérique et du niveau de détail requis. De ce fait, il est nécessaire de définir et hiérarchiser les aspects nécessaires à modéliser pour atteindre

les objectifs prédéfinis. Ainsi, nous considérons que le jumeau numérique d'un atelier de production correspond à l'union des jumeaux numériques de produits et processus.

A. *Jumeau numérique d'un produit*

Les produits sont de plus en plus complexes. Par conséquent, un jumeau numérique de produit doit couvrir ses aspects point de vue du client et de l'entreprise. En fonction des informations disponibles, les produits peuvent être modélisés à différents niveaux d'abstraction. Le modèle de produit [23] est un modèle qui peut décrire toutes les informations qui représentent le produit au cours de son cycle de vie. Les modèles de produits peuvent inclure un modèle fonctionnel, d'exigences, de matériaux, de tolérance, d'assemblage, de forme, etc. [24].Il est important de prendre en compte les exigences et les intérêts des clients et de toutes les autres parties prenantes lors de la modélisation [23].

À l'ère de l'industrie 4.0, l'accent est mis sur les produits intelligents qui sont capables communiquer et d'interagir avec leur environnement et d'autres produits intelligents [25]. Ils peuvent s'identifier grâce à la RFID et décrire leurs propriétés, leur statut et leur historique [26]. Les produits intelligents sont également capables de collecter, traiter et produire des informations [27]. Le jumeau numérique d'un produit peut être décomposé en ensembles de sous-systèmes virtuels comme dans le cas de produits assemblés. Le modèle conceptuel de jumeau numérique donné par Grieves [17] (figure 1) confirme cet aspect.

Avec l'augmentation de la demande sur des produits personnalisés, la mesure et l'évaluation de la qualité des produits est un défi. Le jumeau numérique de produits est donc un outil efficace pour suivre différents produits tout au long de leur cycle de vie et intégrer des données provenant de différentes phases, ce qui permet de prévoir la durée de vie restante et les défauts du produit, d'évaluer sa qualité, de mesurer la satisfaction du client et de proposer des améliorations.

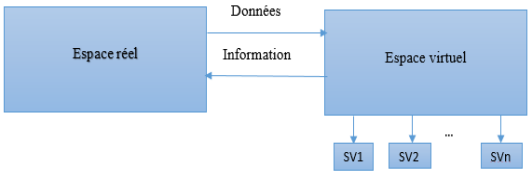


Figure 1. MODELE DU JUMEAU NUMERIQUE [16]

B. *Jumeau numérique d'un processus*

Un processus fait référence à la transformation des éléments d'entrée en sorties [28]. Un modèle de processus comprend des modèles de procédures de fabrication, des informations sur les attributs du processus (nom du produit, numéro de lot du produit et version du produit, etc.), des modèles d'actifs comme les modèles de machines [9] et les modèles pour des opérateurs humains. Les modèles des humains sont limités à certaines abstractions étant donné la difficulté de prédire les réactions humaines face à un événement.

Comme un processus peut être décomposé en sous processus, son jumeau numérique peut être aussi décomposé en jumeaux de sous-processus. Nous illustrons cette décomposition à travers la figure 2. Si l'on considère un système opérant constitué de processus, transformant des matières premières en produits finis, eux-mêmes décomposés en sous processus, le jumeau numérique du système de production regroupera des processus virtuels, des matières premières virtuelles (MPV), produits finis virtuels (PFV) et produits semi-finis virtuels (PSFV). Les systèmes d'information et de décision relient le système opérant et son modèle. Les niveaux du jumeau d'un processus varient en fonction de la granularité des informations modélisées.

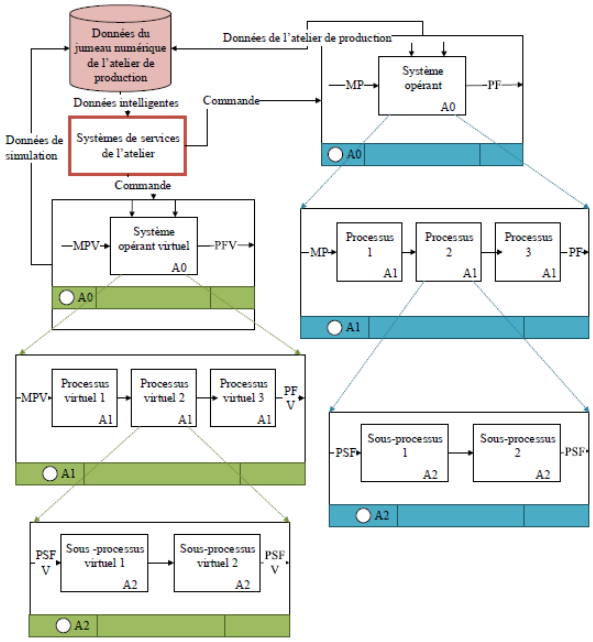


Figure 2. DIFFERENTS NIVEAUX D'UN JUMEAU NUMERIQUE DE PROCESSUS

Un système de mesure des performances est un composant essentiel des systèmes de pilotage de performance. Pour l'implémenter, il est essentiel de comprendre les activités et les processus clés d'une chaîne logistique [29]. Par exemple, le modèle SCOR (Supply Chain Operations Reference) propose une décomposition de la chaîne logistique en six grands processus (planification, approvisionnement, fabrication, livraison, retour et management) [30]. Chaque processus comprend des sous-processus auxquels sont associées des mesures de performance. Ces mesures sont liées à cinq attributs principaux : fiabilité, réactivité, agilité, coûts et efficacité de la gestion des actifs. Par conséquent, la cartographie des différents processus d'une organisation par le biais du jumeau numérique est une tâche importante permettant d'identifier et de hiérarchiser les indicateurs de performance clés pour chaque processus. Pour mesurer la performance d'un atelier de production, les modèles de produits et/ou de processus retenus dans le jumeau numérique dépendent de l'approche utilisée dans le système de mesure et des dimensions de performance sélectionnées.

IV. JUMEAU NUMERIQUE DANS LE PILOTAGE DE PERFORMANCE

A. *Correspondance entre jumeau numérique et système de pilotage de performance*

Afin de motiver l'utilisation du jumeau numérique pour le pilotage de performance, nous avons déterminé leurs points communs.

- Objectifs

Un modèle de simulation doit être développé pour un ensemble particulier d'objectifs. Ainsi, un modèle qui est valable pour un objectif donné peut ne pas l'être pour un autre [31]. Constitué d'un ensemble de modèles, le jumeau numérique doit répondre à des objectifs spécifiques. La définition et la déclaration des objectifs à atteindre constituent également l'étape initiale dans le pilotage de performance. Pour [32], le pilotage est utilisé pour améliorer les résultats d'une organisation en gérant les performances des équipes dans un cadre défini d'objectifs planifiés. Ces objectifs doivent être réalisables et déboucher sur des résultats tangibles [1].

- Données

Les données alimentant les différents modèles d'un jumeau numérique et le système de mesure des performances doivent être pertinentes (intelligentes). Dans le travail de [33], les données intelligentes sont définies comme étant des données de haute qualité, propres et de valeur. Pour nous, les données intelligentes doivent remplir quatre conditions: des données alignées avec les objectifs de l'entreprise, de qualité, en quantité suffisante et à un coût abordable. Le jumeau numérique permet l'intégration de données de simulation et de données de systèmes physiques qui peuvent être utilisées pour la mesure des performances.

- Caractéristiques

La décomposition du système de production en processus est l'une des approches utilisées pour identifier et mesurer les indicateurs clés de performance. Dans la même logique, le jumeau numérique est composé de modèles de produits et de processus à plusieurs niveaux.

B. *Contribution du jumeau numérique au pilotage de performance*

Sur la base de ce qui précède, nous pouvons définir quatre contributions possibles du jumeau numérique dans le pilotage de performance :

- Simulation des performances du système

Le jumeau numérique permet de simuler l'effet des actions nécessaires pour corriger ou améliorer les performances sur le système virtuel avant leur implémentation sur le système physique. Cette étape est répétée jusqu'à l'obtention de performances satisfaisantes. Une autre utilisation du jumeau numérique comme outil de simulation est la fixation d'objectifs de performance. En effet, lors de la définition des objectifs, il est possible de simuler le fonctionnement du système afin de vérifier le caractère réalisable de ces objectifs.

- Pilotage proactif/prédictif et réactif de performance

Dans [34], les auteurs proposent une expression temporelle de la performance. Ils affirment que la performance n'est plus limitée à une forme instantanée mais inclut une forme prédictive et une forme tendancielle. Ils définissent la performance instantanée comme étant le résultat de la comparaison entre l'objectif et la mesure à un instant de l'horizon considéré. La performance prédictive exprime, à un instant donné, l'expression de la performance qui serait atteinte à un instant futur de l'horizon. Quant à la performance tendancielle, elle donne une indication, sur un intervalle de l'horizon, de l'évolution de la mesure par rapport à l'évolution de l'objectif. Ce triplet (performance instantanée, performance tendancielle, performance prédictive) fournit, à un moment donné, non seulement l'expression d'une performance réalisée, mais aussi une idée de la façon dont la réalisation de l'objectif se dessine, au moment final de l'horizon ainsi que l'expression de la performance qui pourrait être réalisée. Le jumeau numérique fournit au système de mesure de performance des données en temps réel ou périodiques lui permettant de calculer la performance instantanée (figure 3). Les données du jumeau numérique permettent également de calculer la variation de la performance du système et de la comparer aux objectifs intermédiaires pour obtenir une performance tendancielle. Sur la base du modèle proposé par [17], un aspect clé du jumeau numérique est la collecte et la réutilisation de données historiques permettant l'estimation des performances futures. Basé sur des algorithmes d'intelligence artificielle, il permet de prévoir les perturbations du système de production, la dégradation de la qualité des produits, l'état des équipements, etc.

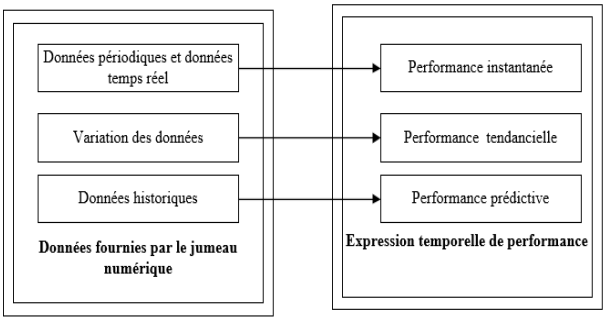


Figure 3. UTILISATION DE DONNEES PROVENANT DU JUMEAU NUMERIQUE POUR UNE EXPRESSION TEMPORELLE DE LA PERFORMANCE

Le jumeau numérique soutient ainsi l'évolution des systèmes de pilotage de performance. En raison des limites des systèmes de contrôle et de planification centralisés et des approches réactives considérées individuellement, les chercheurs s'intéressent aux architectures de planification et de contrôle intégrées qui regroupent des mécanismes locaux, réactifs et distribués couplés à des mécanismes de planification globaux et centralisés [35]. Dans ce contexte, le jumeau numérique permet de coupler le pilotage proactif/prédictif et réactif. Il permet de prévoir les performances futures du système de production, assurant ainsi un pilotage prédictif de performance. Si le jumeau numérique est capable de prendre des décisions de manière autonome, il contribue au pilotage

proactif. Mais cela dépend du niveau d'automatisation de la prise de décision. De plus, un jumeau numérique permet de passer d'un système de pilotage réactif basé sur des données historiques à un pilotage en temps réel facilité par l'intégration de données provenant de différentes sources telles que le système d'information, les capteurs RFID et les réseaux de capteurs et rendue possible par l'internet des objets (IoT) [36].

- Visualisation

Le jumeau numérique permet de visualiser l'évolution du système en temps réel ou quasi réel. Ainsi, les indicateurs de performance du système de production peuvent être affichés pour aider à la prise de décision. La présentation des données sur le jumeau numérique doit répondre à plusieurs conditions. En effet, selon [6], les systèmes de planification et de simulation doivent fournir des informations de manière proactive : le système de simulation doit détecter le besoin de l'utilisateur et fournir des informations adéquates. En outre, les informations doivent être non intrusives mais accessibles : les informations doivent être présentées de manière à ce qu'elles puissent être ignorées, mais qu'elles restent facilement accessibles en cas de besoin.

- Comprendre l'interdépendance entre les différents mécanismes de contrôle

[4] indique que la définition du système de pilotage de performance "comprend à la fois les mécanismes, processus, systèmes et réseaux formels utilisés par les organisations, ainsi que les contrôles informels plus subtils, mais importants". Cette définition souligne la présence de différents types de contrôles formels et informels dans une organisation. Le jumeau numérique permet l'intégration de données provenant des différentes phases du cycle de vie des produits et de différents composants de l'organisation. Il permet ainsi une vision globale et une compréhension des différents systèmes de contrôle fonctionnant en même temps dans la même organisation.

V. Conclusion

Le jumeau numérique se compose de plusieurs modèles statiques et dynamiques, principalement des modèles de produits et de processus. Ils permettent une réflexion du système physique en temps réel en intégrant des données provenant de différentes sources. Ces caractéristiques font du jumeau numérique un modèle de simulation prometteur pour la mesure et le pilotage de performance. D'un point de vue théorique, la contribution du jumeau numérique est évidente. Cependant, une étude empirique reste indispensable pour valider ce résultat.

VI. References

[1] L. Berrah, V. Clivillé, and L. Foulloy. "Industrial Objectives and Industrial Performance". Wiley Online Library, 2018.

[2] A. R. Suhardi."Renewal of performance management system in family company", Procedia-Social and Behavioral Sciences, vol. 211, pp. 448– 454, 2015.

[3] K. Baird, H. Schoch, and Q. J. Chen. "Performance management system effectiveness in australian local government", Pacific Accounting Review, 2012.

[4] A. Ferreira and D. Otley. "The design and use of performance management systems: An extended framework for analysis", Management accounting research, vol. 20, no. 4, pp. 263–282, 2009.

[5] Y. Ducq. "Evaluation de la performance d'entreprise par les modèles", 2007.

[6] C. L. Constantinescu, E. Francalanza, and D. Matarazzo. "Towards knowledge capturing and innovative human-system interface in an opensource factory modelling and simulation environment", Procedia CIRP, vol. 33, pp. 23–28, 2015.

[7] M. W. Grieves. "Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises", International Journal of Product Development, vol. 2,no. 1-2, pp. 71–84, 2005.

[8] E. Glaessgen and D. Stargel. "The digital twin paradigm for future nasa and us air force vehicles", in 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA, 2012, p. 1818.

[9] J. Bao, D. Guo, J. Li, and J. Zhang. "The modelling and operations for the digital twin in the context of manufacturing", Enterprise Information Systems, vol. 13, no. 4, pp. 534–556, 2019.

[10] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, and W. Sihn. "Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification", IFAC-PapersOnLine, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022, 2018.

[11] G. N. Schroeder, C. Steinmetz, C. E. Pereira, and D. B. Espindola. "Digital twin data modeling with automationml and a communication methodology for data exchange", IFAC-PapersOnLine, vol. 49, no. 30, pp. 12–17, 2016.

[12] K. Schutzer, J. de Andrade Bertazzi, C. Sallati, R. Anderl, and E. Zancul. "Contribution to the development of a digital twin based on product lifecycle to support the manufacturing process", Procedia CIRP, vol. 84, pp. 82–87, 2019.

[13] R. Rosen, G. Von Wichert, G. Lo, and K. D. Bettenhausen. "About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing", IFAC-PapersOnLine, vol. 48, no. 3, pp. 567–572, 2015.

[14] Y. Yi, Y. Yan, X. Liu, Z. Ni, J. Feng, and J. Liu. "Digital twin-based smart assembly process design and application framework for complex products and its case study", Journal of Manufacturing Systems, 2020.

[15] M. Ayani, M. Ganeback, and A. H. Ng. "Digital twin: Applying emula- ¨ tion for machine reconditioning", Procedia CIRP, vol. 72, pp. 243–248, 2018.

[16] Q. Qi and F. Tao. "Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison", Ieee Access, vol. 6, pp. 3585–3593, 2018.

[17] M. Grieves and J. Vickers. "Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems", in Transdisciplinary perspectives on complex systems, Springer, 2017, pp. 85–113.

[18] A. Rasheed, O. San, and T. Kvamsdal. "Digital twin: Values, challenges and enablers", arXiv preprint arXiv: 1910.01719, 2019.

[19] T. Y. Melesse, V. Di Pasquale, and S. Riemma. "Digital twin models in industrial operations: A systematic literature review", Procedia Manufacturing, vol. 42, pp. 267–272, 2020.
[20] R. Stark, C. Fresemann, and K. Lindow. "Development and operation of digital twins for technical systems and services", CIRP Annals, vol. 68, no. 1, pp. 129–132, 2019.
[21] Y. Ma, H. Zhou, H. He, G. Jiao, and S. Wei."A digital twin-based approach for quality control and optimization of complex product assembly", in 2019 International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacturing (AIAM), IEEE, 2019, pp. 762–767.
[22] F. Tao and M. Zhang. "Digital twin shop-floor: A new shopfloor paradigm towards smart manufacturing", Ieee Access, vol. 5, pp. 20 418–20 427, 2017.
[23] P. Nilsson and B. Fagerstrom. "Managing stakeholder requirements in ¨ a product modelling system", Computers in Industry, vol. 57, no. 2, pp. 167–177, 2006.
[24] F.-L. Krause, F. Kimura, T. Kjellberg. S.-Y. Lu, L. Alting, H. Elmaraghy, W. Eversheim, K. Iwata, N. Suh, V. Tipnis, et al., "Product modelling", CIRP annals, vol. 42, no. 2, pp. 695–706, 1993.
[25] M. Abramovici, P. Savarino, J. C. Gobel, S. Adwernat, and P. Gebus. "Systematization of virtual product twin models in the context of smart product reconfiguration during the product use phase", Procedia CIRP, vol. 69, pp. 734–739, 2018.
[26] Schmidt, Rainer, et al. "Industry 4.0-potentials for creating smart products: empirical research results." International Conference on Business Information Systems. Springer, Cham, 2015.
[27] P. Zheng, T.-J. Lin, C.-H. Chen, and X. Xu. "A systematic design approach for service innovation of smart product-service systems", Journal of Cleaner Production, vol. 201, pp. 657–667, 2018.
[28] M. Laguna and J. Marklund. "Business process modeling, simulation and design". CRC Press, 2013.
[29] H. Balfaqih, Z. M. Nopiah, N. Saibani, and M. T. Al-Nory. "Review of supply chain performance measurement systems: 1998–2015", Computers in Industry, vol. 82, pp. 135–150, 2016.
[30] APICS. "Supply chain operations reference model SCOR version 12.0", 2017.
[31] A. M. Law, W. D. Kelton, and W. D. Kelton. "Simulation modeling and analysis". McGraw-Hill New York, 2000, vol. 3.
[32] A. Giannopoulos. "Performance management as a process of promoting innovation in software industry", Procedia-Social and Behavioral Sciences, vol. 175, pp. 401–407, 2015.
[33] D. Garcıa-Gil, J. Luengo, S. Garcıa, and F. Herrera. "Enabling smart data: Noise filtering in big data classification", Information Sciences, vol. 479, pp. 135–152, 2019.
[34] L. Berrah, L. Foulloy, and H. Hamadmad. "Définition d'une expression temporelle de la performance industrielle". 11e Congres International De Génie Industriel - CIGI2015, Québec, Canada, 2015.
[35] O. Cardin, D. Trentesaux, A. Thomas, P. Castagna, T. Berger, and H. B. El-Haouzi. "Coupling predictive scheduling and reactive control in manufacturing hybrid control architectures: State of the art and future challenges", Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 28, no. 7, pp. 1503– 1517, 2017.
[36] C. Zhuang, J. Liu, and H. Xiong. "Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 96, no. 1-4, pp. 1149–1163, 2018.

Intégration de fonctions « MES » à l'architecture de pilotage d'une cellule de production flexible

Patrice Caulier
Université Polytechnique Hauts-de-France
INSA Hauts-de-France
LAMIH CNRS UMR 8201
Campus du Mons Houy
F-59313 Valenciennes CEDEX 9 – France
patrice.caulier@uphf.fr

Résumé — La 4ème révolution industrielle en marche concerne l'introduction, au niveau des systèmes de production, des innovations liées à l'Internet des objets et aux technologies du numérique (cobotique, réalité augmentée, fabrication additive, jumeau numérique, cloud computing) mais aussi l'exploitation de données issues du big data et du jumeau numérique. Elle correspond à la mise en place de systèmes de production « intelligents » (« smart manufacturing ») capables, d'une part, d'une flexibilité et d'une adaptabilité de la production accrues et, d'autre part, d'une allocation multicritère et optimale des ressources. La maîtrise de telles infrastructures nécessitent le développement d'architectures de pilotage cyber-physiques capables de répondre aux exigences d'une désormais « mass customization ». La communication s'inscrit dans ce contexte. Elle présente les résultats de l'intégration de premières fonctions de MES (Manufacturing Execution System) à l'architecture de pilotage d'une cellule de production flexible. Ces résultats portent sur deux fonctionnalités centrales du MES : la conduite et la définition de la production. L'aspect exécution de la production par la couche contrôle-commande, selon le protocole de communication PLI, est également détaillé. Les développements sont appliqués et validés sur la cellule de production flexible du pôle S.mart AIP-PRIMECA Nord-Pas de Calais, plateforme de Valenciennes.

Mots-clés — Commande fonctionnelle, conduite de la production, MES, pilotage, protocole PLI.

I. INTRODUCTION

En proposant des moyens composés d'objets intelligents et communicants, l'industrie 4.0 vise à accroître la flexibilité, l'adaptabilité, la réactivité, l'efficacité, la sécurité et la précision de la production [1]. Elle nous fait basculer de l'ère de la *« mass production »* à celle de la *« mass customization »* [2]. Toutefois, atteindre ces objectifs nécessite le développement d'architectures de pilotage des moyens de production cyber-physiques et ce, tant en mode de production nominal, qu'en présence de défaillances, dysfonctionnements internes et/ou perturbations externes.

Notre communication s'inscrit dans le contexte général des systèmes cyber-physiques *(Cyber-Physical Systems, CPS)* formés d'entités collaboratives, dotées de capacités de calcul, en connexion intensive avec le monde physique, fournissant et utilisant à la fois les services de mise à disposition et de traitement disponible sur le réseau [3]. Elle présente la conception, la réalisation et les résultats de l'intégration, au niveau 3 de l'architecture de pilotage d'une cellule de production flexible, de fonctionnalités MES *(Manufacturing Execution System)* et leurs impacts sur la couche contrôle-commande de niveau 1.

La communication est structurée en trois parties. Nous commençons par présenter le MES : sa position, ses fonctions et ses objectifs. Dans la deuxième partie, après avoir défini le contexte et les objectifs du travail, nous présentons, successivement, la conception et la mise en œuvre de trois fonctions MES principales ; la conduite, la définition et l'exécution de la production. Enfin, nous concluons sur le travail réalisé puis énonçons ses perspectives.

II. LES FONCTIONS DU MES

Au sein d'une architecture CIM *(Computer Integrated Manufacturing)*, figure 1, le domaine d'application du MES se situe entre le niveau de contrôle-commande et celui du système d'information d'entreprise occupé, aujourd'hui, par les logiciels d'ERP *(Enterprise Ressource Planning)* [4].

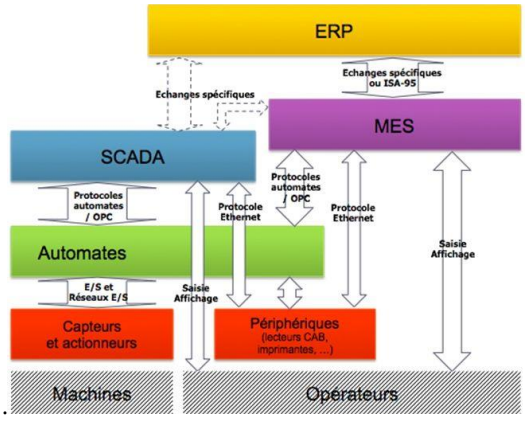


Figure 1. ARCHITECTURE DE PILOTAGE EN 5 NIVEAUX [4]

Par soucis de clarté, nous distinguons le niveau particulier supervision *(Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA)* dont l'objet principal et essentiel est de surveiller, diagnostiquer, voire même anticiper, et traiter les dysfonctionnements internes des moyens de production et les perturbations externes qu'il subit. Ces différents domaines de l'architecture se distinguent non seulement par leurs fonctionnalités mais aussi par leurs échelles temporelles. Alors que l'ordonnancement de la production, au niveau de l'ERP, travaille, au mieux, à la journée ou à la demi-journée, le MES doit être capable de réagir dans des durées de quelques minutes.

Alimenté par les Ordres de Fabrication (OF) issus de l'ERP, le MES est avant tout un système de pilotage et de suivi de la production. Il détermine les séquences d'opérations à réaliser et transmet des instructions de fabrication sous la forme de recettes. En cours de fabrication, par le biais du système de contrôle-commande et des opérateurs d'exploitation, le MES récupère, au fil de l'eau, ce qui a été fabriqué, les conditions de fabrication, ce qui est en cours [5]. Il peut transmettre au système d'information d'entreprise les productions, les consommations diverses, les prédictions de production ou, encore, les états de stock, figure 2 [6].

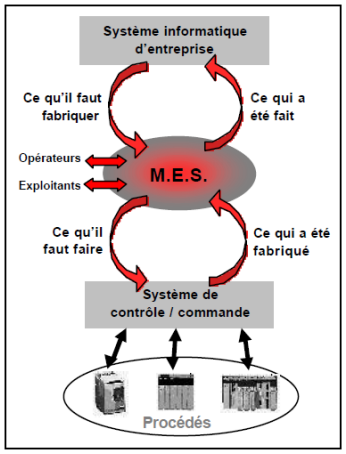


Figure 2. DIALOGUES DE LA FONCTION MES [6]

Cette fonction MES de pilotage et de gestion de l'exploitation des systèmes industriels est décrite par la norme ANSI/ISA-95 [7] (ou ISO/CEI 62264 [8]). Autour de cette fonction centrale de contrôle de la production, le modèle fonctionnel de la norme ANSI/ISA-95 met en évidence les liens partagés avec les différents services de l'entreprise, figure 3 [9]. Cette nappe déployée autour du contrôle de la production circonscrit le périmètre du MES. Par exemples, le service d'assurance qualité va fournir au contrôle de la production les spécifications clients. En retour, ce dernier fournira au service d'assurance qualité les résultats de ses audits qualité. L'ordonnancement fournira au contrôle de la production le plan de production, lequel fournira, en réponse, la capacité de production restante.

Par la maîtrise et l'optimisation de toutes les étapes de la production, depuis les OF jusqu'au produit fini, le MES participe à la transformation numérique de l'industrie. Il apporte à ses moyens intelligents et communicants de production une agilité accrue.

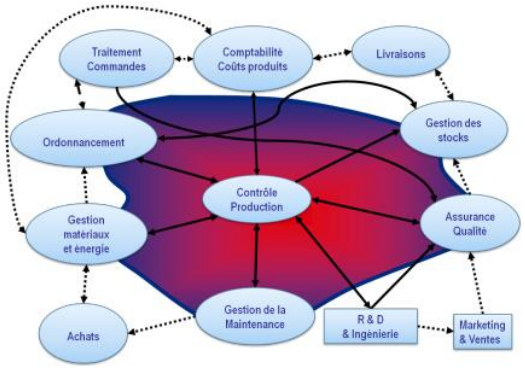


Figure 3. MODELE FONCTIONNEL DU MES [9]

Dans cette communication, nous présentons l'intégration de la conduite et du suivi de la production à l'architecture de pilotage d'une cellule de production flexible.

III. INTEGRATION DU MES

Le travail relaté dans cette communication concerne l'intégration des fonctions centrales du MES : la conduite, la définition et l'exécution de la production, à l'architecture de pilotage d'une cellule de production flexible. Après avoir présenté le contexte et les objectifs de notre travail, les principaux résultats de cette intégration sont détaillés.

A. *Contexte*

Le travail est développé dans le cadre de la cellule de production flexible du pôle S.mart AIP-PRIMECA Nord-Pas de Calais disponible sur le site de Valenciennes [10], Figure 4.



Figure 4. CELLULE DE PRODUCTION FLEXIBLE DU POLE S.MART NPDC

Située au niveau 0 de l'architecture figure 1, la cellule de production flexible est constituée d'un réseau de convoyage flexible desservant diverses unités de traitement. Sur le réseau de convoyage peuvent circuler des *shuttles* motorisés *Montratec* capables d'accueillir les pièces composant le produit fini. La flexibilité du réseau est obtenue par la présence d'aiguilles rotatives commandées. Les unités de traitement sont au nombre de sept : quatre robots manipulateurs STÄUBLI

TX2-60 six axes anthropomorphes (RRRRRR) de montage de pièces, un manipulateur cartésien (PPP) de chargement/déchargement des supports de pièces, un poste optique de contrôle qualité et, enfin, un poste de traitement manuel des produits non qualifiés. Ces unités de traitement nous permettent de réaliser différentes gammes de produits constitués de pièces assemblées.

Au niveau 1, la cellule est contrôlée et commandée, de façon distribuée, par quatre automates SE Modicon M580 certifiés ANSSI-CSPN-2020/20 en réseau Modbus TCP. Les variables d'E/S des automates sont sur réseaux AS-i raccordés aux automates via des coupleurs SE TSX SAY 1000. Un routage dynamique des *shuttles* motorisés sur le réseau de convoyage est possible par l'utilisation de systèmes d'identification par induction et RFID 13.56 Mhz SE OsiSence, fixes et embarqués, adressés via des requêtes en lecture/écriture.

Enfin, en marge du travail exposé ici, au niveau 2, une application de supervision, dédiée à la surveillance, au pronostic et au diagnostic des défaillances, est développée à partir du progiciel de supervision PcVue ® (éditeur ARC Informatique) [11] [12] et connectée au niveau 1 via un serveur OPC.

B. *Objectifs*

Le travail concerne l'intégration des fonctions MES liées à la conduite de la production à l'architecture de pilotage d'une cellule de production flexible. Dans ce contexte relatif à l'industrie 4.0 et dans un premier temps, nos objectifs portent sur quatre points :

1. Modélisation des équipements et construction du synoptique animé de conduite de la production.
2. Définition de procédures et de gammes,
3. Programmation des automates d'exécution du mode de marche manuel et des gammes.
4. Mise en œuvre du protocole PLI côtés MES et contrôle-commande.

Les développements nécessaires à la réalisation de ces objectifs ont été menés, côté MES, à l'aide du progiciel COOX ® (éditeur ORDINAL Software) [13] et, côté automates, à l'aide de l'environnement de développement SE Unity Pro XL. Le progiciel COOX comporte deux exécutables : le *Builder* et le *Manager*. Le *Builder* est utilisé pour le développement de l'application. L'exécution de l'application est traitée par le *Manager*. Elle peut aussi l'être via un client web. Enfin, un serveur OPC SE OFS a aussi été configuré et utilisé pour gérer la communication entre ces deux niveaux fonctionnels.

C. *Conduite de la production*

Le développement de l'application MES débute par la création de modèles des équipements qui composent la cellule de production flexible. Ces modèles sont ensuite instanciés pour construire le synoptique de conduite de la production. Cette approche s'inspire du modèle physique de la norme ANSI/ISA-88 [7].

Pour notre application, les modèles d'équipement suivants ont été analysés et réalisés : Aiguille, Position shuttle simple, Position shuttle indexé, Position shuttle RFID, Poste VA et Pupitre. Le modèle Aiguille permet d'orienter les *shuttles* sur le réseau de convoyage. Le modèle Position shuttle indexé correspond à des postions aux unités de traitement de la cellule où le *shuttle* peut être bridé en position. Le modèle Position shuttle RFID permet d'identifier le *shuttle* par la lecture ou l'écriture d'un tag RFID. Le modèle Poste VA correspond aux unités de traitement ou poste à valeur ajoutée. Enfin, le modèle Pupitre autorise la commande en mode manuel des équipements de la cellule et affiche, alors, un pupitre de commande par automate, figure 5.

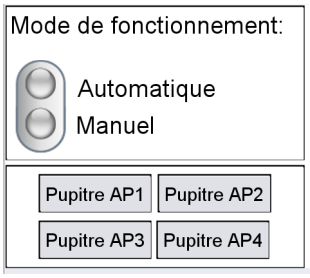


Figure 5. LE MODELE PUPITRE

Chaque modèle recense ses propriétés, ses visuels et la (ou les) phase(s) qu'il est capable de réaliser. Les visuels sont utilisés pour construire le synoptique de conduite. Les phases sont exécutées à l'aide des programmes automates. Une fois créés, les modèles d'équipement sont instanciés en équipements particuliers composants la cellule.

Enfin, les équipements particuliers sont réunis pour former le synoptique de conduite à l'image de la cellule réelle, figure 6.

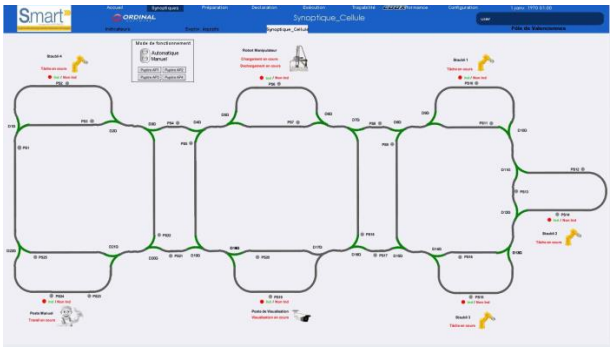


Figure 6. SYNOPTIQUE DE CONDUITE DE LA PRODUCTION

En mode manuel, le synoptique permet de commander les équipements et d'en visualiser les effets. En mode automatique, le synoptique permet de suivre l'exécution d'une gamme par l'animation en couleur des tronçons concernés par la présence d'un *shuttle*. Une gamme est modélisée par une procédure. Cette modélisation est décrite dans le prochain paragraphe.

D. *Définition de la production*

Le développement de l'application MES se poursuit avec la définition des modèles de procédure. Cette approche est issue du modèle procédural de la norme ANSI/ISA-88 [7]. Ce modèle procédural structure une recette, ou une gamme, selon quatre éléments procéduraux hiérarchisés : la procédure, la procédure d'unité, l'opération et la phase, figure 7.

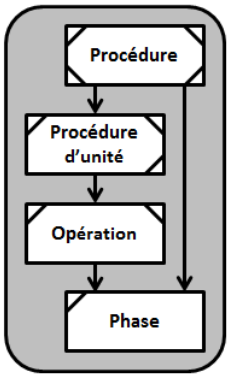


Figure 7. MODELE PROCEDURAL DE LA NORME ANSI/ISA-88 [7]

Une procédure est une stratégie pour exécuter une production. Le domaine physique attaché à la procédure est la cellule avec ses équipements. La procédure occupe le plus haut niveau dans la hiérarchie des éléments procéduraux. Elle est définie sous la forme d'un ensemble ordonné de procédures d'unité, dont l'exécution s'effectue de manière séquentielle ou concurrente, ou de phases.

Une procédure d'unité est une stratégie pour dérouler un procédé dans une unité donnée. Une procédure d'unité est attachée à une unité spécifique ou à une catégorie d'unités. Elle est définie sous la forme d'un ensemble ordonné d'opérations s'exécutant de manière séquentielle ou concurrente. Plusieurs procédures d'unités peuvent s'exécuter concurremment dans des unités différentes.

Une opération est un ensemble ordonné de phases. Elle est attachée à une catégorie d'unité disposant des phases d'équipements nécessaires pour la mise en œuvre des phases de cette opération. Les phases d'une opération peuvent s'exécuter de manière séquentielle ou concurrente.

Une phase est l'élément procédural le plus élémentaire. Une phase représente une action élémentaire mettant en œuvre une phase d'équipement. Une phase est attachée à une catégorie de phase d'équipement susceptible de réaliser cette action. La commande de la production, un automate, ne peut exécuter que des phases comme démarrer un *shuttle*, orienter une aiguille à droite, désindexer un *shuttle*, etc.

Nous avons commencé par analyser et définir l'ensemble des modèles de phase de l'application. Ces modèles de phase sont ensuite instanciés et associés aux modèles d'équipement. Ainsi, par exemple, au modèle d'équipement Position shuttle indexé nous associons les phases Ph_ST_Shuttle, Ph_Index et Ph_Desindex. Les modèles d'opération et de procédures d'unité de l'application sont également créés.

A l'aide des modèles précédents et du langage PLC, des procédures peuvent être construites. La figure 8 présente la procédure permettant d'aller de la position PS1 à la position PS2. Elle est composée de deux procédures d'unité. Tout d'abord, on teste la présence d'un *shuttle* en PS1. Puis, une sélection de séquence exclusive permet, le cas échéant, d'orienter l'aiguille 1. Le *shuttle* est alors démarré. La procédure s'arrête lorsque le *shuttle* est arrivé en PS2.

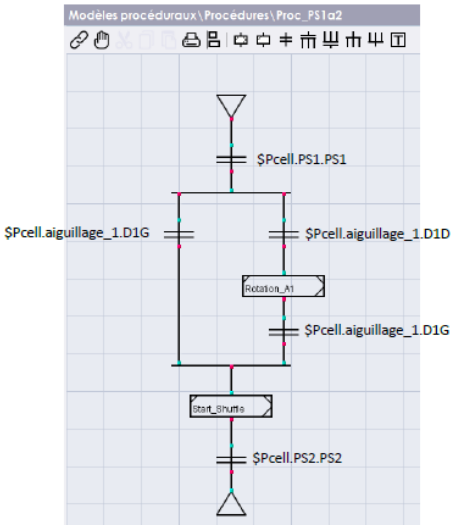


Figure 8. PROCEDURE PS1 A PS2

Enfin, les procédures sont instanciées selon des recettes ou des gammes. Afin d'exécuter ces gammes sur la cellule de production flexible, une ultime étape consiste à programmer les phases au niveau des automates et à gérer la communication entre une phase COOX et une phase Unity Pro XL.

E. *Exécution de la production*

Les phases activées par les procédures de notre application MES sont exécutées au niveau 1 de contrôle-commande. Ce niveau est constitué de quatre automates en réseau Modbus TCP. Le principe de l'exécution de la production par ces automates est décrit dans ce paragraphe.

L'introduction de fonctions MES au sein d'une architecture de pilotage induit un point de vue nouveau et important sur le niveau contrôle-commande : il n'est plus le lieu unique de la définition, souvent déterministe, des modes de marches mais devient un exécutant de phases de commande élémentaires orchestrées au niveau MES. Cette conséquence implique de concevoir la commande des équipements de production :

- de façon fonctionnelle ou modulaire,
- de respecter le protocole d'échanges PLI.

Une analyse fonctionnelle de chaque type de phase de commande élémentaire sur le réseau de convoyage et les *shuttles* a été menée puis programmée de façon modulaire à l'aide du langage fonctionnel « *Function Block Diagram* » (FBD) de la norme ISO/CEI 61131-3 [8] [14] :

- Phases de démarrage d'un shuttle depuis une position PSx : *Ph_ST_Shuttle_PSx.*
- Phases de rotation d'une aiguille à droite : *Ph_Rot_D_Ax.*
- Phases de rotation d'une aiguille à gauche : *Ph_Rot_G_Ax.*
- Phases de d'indexation d'un shuttle à une position PSx d'une unité de traitement : *Ph_Index_PSx.*
- Phases de désindexation d'un shuttle à une position PSx d'une unité de traitement : *Ph_Desindex_PSx.*

Chaque phase d'un équipement de production est donc définie par un bloc fonctionnel autonome dans le programme de tel ou tel automate. Si des variables doivent être échangées, en lecture ou en écriture, entre des automates, le service de communication *I/O Scanning*, offert par le protocole Modbus TCP, est configuré et utilisé. Par ailleurs, la gestion d'une variable AutoManu permet d'exécuter les phases en mode automatique ou en mode manuel. La figure 9 illustre, pour des raisons de lisibilité sous la forme d'un grafcet, l'exécution de la phase *Ph_ST_Shuttle_PS1*.

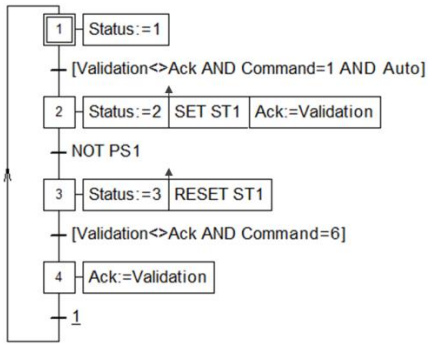


Figure 9. PHASE PH_ST_SHUTTLE_PS1

Chaque phase d'un équipement de production ne connait que ses paramètres d'E/S et l'équipement sur lequel elle est exécutée. Elle ne sait pas à quel moment elle intervient dans la gamme ou la recette. Ces instants sont définis par l'application MES, véritable « chef d'orchestre » de l'enchaînement des phases.

Cette approche de programmation fonctionnelle et modulaire permet la réutilisation des phases d'un équipement à l'autre, d'une recette à l'autre et d'un projet à l'autre. On obtient ainsi des programmes automates conformes à la norme ISO/CEI 61499 [8] [15]. Le respect de cette norme autorise la distribution de blocs fonctionnels lesquels constituent une bibliothèque.

L'approche de programmation fonctionnelle et modulaire permet aussi de « standardiser » le dialogue, entre l'application MES maître et les automates de commande esclaves, selon le protocole de communication « *Phase Logic Interface* » (PLI) défini par la norme ANSI/ISA-88 [7]. Sous la forme d'un graphe d'états-transitions, la figure 10 présente le protocole de communication PLI [7] [13].

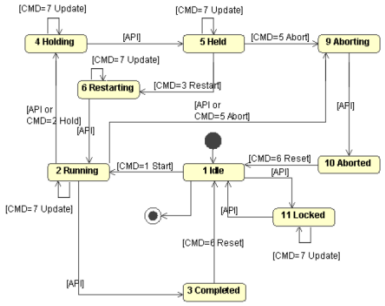


Figure 10. GRAPHE D'ETATS-TRANSITIONS DU PROTOCOLE *PLI* [7] [13]

Selon le protocole PLI, le moteur d'exécution d'une phase de l'application MES valide l'état courant de l'automate et envoie des codes commande (sous la forme de numéros) à l'automate :

- {1-Démarrage} Cette commande démarre l'exécution d'une phase d'équipement.
- {2-Pause} Permet de suspendre une phase en cours d'exécution.
- {3-Redémarrage} Permet de reprendre l'exécution d'une phase suspendue par une commande {2-Pause}.
- {5-Abandon} Provoque l'abandon définitif d'une phase d'équipement.
- {6-Reset} Entraine le retour en situation initiale d'une phase terminée ou abandonnée.
- {7-Mise à jour} Cette commande permet au moteur d'exécution de mettre à jour l'état de certaines phases.

De son côté, l'automate acquitte le code de commande reçu et informe l'application MES de l'état dans lequel se trouve l'exécution de la phase. On distingue neuf états :

1. <1-Prêt> C'est l'état initial de toute phase d'équipement. Dans cet état, la phase est prête à recevoir le code commande {1-Démarrage}.
2. <2-Exécution> Caractérise l'état d'une phase en cours d'exécution par l'automate.
3. <3-Terminé> La phase passe dans cet état une fois son exécution terminée.
4. <4-Pause demandée> Une phase en cours d'exécution passe dans cet état après un code commande {2-Pause].
5. <5-Pause> Dans cet état, la pause demandée est obtenue.
6. <6-Redémarrage> A partir de l'état <5-Pause>, cet état est obtenu suite à un code commande {3-Redémarrage}.
7. <9-Abandon demandé> A réception d'un code commande {6-Reset}, une phase dans l'état <2-Exécution> ou <5-Pause>, évolue vers cet état.
8. <10-Abandon> Dans cet état, l'abandon demandé est obtenu. Il nécessite un redémarrage en situation initiale.
9. <11-Bloqué> Cet état permet à l'automate de prévenir le moteur d'exécution d'une phase de l'application MES que la phase ne doit pas recevoir de code commande.

Côté application MES, le protocole PLI permet un échange de données structuré avec contrôle de l'exécution. Pour cela, quatre registres sont utilisés : validation, ack, status et command. Les registres validation et command sont définis par l'application MES et testés par la commande et inversement pour ack et status. La figure 9 décrit la gestion, côté automate, de la boucle d'exécution : <1-Prêt> → <2-Exécution> → <3-Terminé> → <1-Prêt>. La mise en œuvre concrète du protocole PLI a nécessité la configuration d'un serveur OPC afin d'établir une plateforme de communication entre l'application MES et les automates du niveau contrôle-commande.

Au terme de cette dernière étape de l'intégration, suite à la réception d'un Ordre de Fabrication (OF) issu du niveau 4 *Enterprise Ressource Planning* (ERP), notre application a exécuté et suivi avec succès la gamme d'assemblage associée.

IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans un contexte de 4ème révolution industrielle, la communication expose les premiers résultats obtenus dans le cadre de l'intégration de fonctions MES à l'architecture de pilotage d'une cellule de production flexible. Ces résultats portent sur la conception et la mise en œuvre des fonctions de conduite, de définition et d'exécution de la production. Ils mettent en avant plusieurs points importants :

- La possibilité de contrôler et conduire la production à partir d'un synoptique animé et selon différents modes de marche. A ce niveau, tous les équipements de la cellule de production flexible support de nos travaux ont été pris en compte dans leurs dimensions propriétés, visuel, animation et phases commandées.
- La définition de la production sous la forme de différentes procédures. Ces procédures sont ensuite déclinées en gammes ou recettes et lancées en production selon les OF issus de l'application d'ERP.
- L'exécution de la production côté automate est assurée par la programmation fonctionnelle des phases d'équipement élémentaires à l'aide du langage FBD. D'autre part, ce niveau 1 de contrôle-commande ne conduit plus la production selon une vue d'ensemble mais enchaîne l'exécution de phases élémentaires. Cet enchaînement est gouverné, selon la définition des recettes, par l'application MES et selon le protocole PLI. Pour ce dernier, il reste à réaliser les phases d'équipement qui permettront la mise en service des sept unités de traitement desservies par la cellule de production flexible.

Pour chacun de ces aspects, une approche à base de modèles d'équipement, de procédure et de commande a été suivie. Elle permet une réflexion conceptuelle sur ce que sont les éléments de l'application et de constituer une bibliothèque de modèles. Ces résultats représentent une quantité de travail importante, côté application MES et côté automates, tant en conception et programmation, qu'en essais et mises au point.

Au terme de cette première étape importante de conception et de développement, plusieurs perspectives se dessinent. Tout d'abord, à court terme, finaliser la conception et la programmation des modèles d'équipement destinés à interfacer les unités de traitement de la cellule de production flexible. Dans un second temps, avec un horizon plus lointain et toujours dans le contexte de l'industrie 4.0, le développement de deux perspectives va être abordé. La première perspective concerne la définition et la gestion d'indicateurs de performance de nos gammes, et l'affichage des résultats au cœur même de la cellule de production flexible. Enfin, la seconde voie traitera de l'évaluation de méthodes de commande, de reconfiguration et d'accommodation adaptatives [16]. L'objectif est ici d'adapter le pilotage de la cellule de production flexible aux contraintes (1) de production, (2) de disponibilité des unités de production (évolutions alarmantes, défaillances ou perturbations) [17] et (3) de maîtrise des énergies de production.

V. REFERENCES

[1] A. CAGGIANO, F. CAIAZZO, R. TETI. "Digital factory approach for flexible and efficient manufacturing systems in the aerospace industry". Proceedings of CIRP, Volume 37, pp. 122-127, 2015.

[2] Y. QI, Z. MAO, M. ZHANG, H. GUO. "Manufacturing practices and servitization: the role of mass customization and product innovation capabilities". International Journal of Production Economics, Volume 228, 2020

[3] L. MONOSTORI. "Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges". Proceedings of CIRP, Volume 17, 2014, pp. 9-13.

[4] A. TELUKDARIE, M.N. SISHI. "Enterprise Definition for Industry 4.0". Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Bangkok, 2018.

[5] S. JASKO, A. SKROP, T. HOLCZINGER, T. CHOVAN, J. ABONYI. "Development of MES in accordance with Industry 4.0 requirements: a review of standard-and-ontology-based methodologies and tools". Computers in industry, Volume 123, 2020.

[6] A. BUTHOD, V. BOYER. "Introduction au concept MES". Dossier Technologique des Pays de Savoie, Université Savoie Mont Blanc, 2015.

[7] https://www.isa.org/

[8] https://www.iec.ch/homepage

[9] https://www.club-mes.org/wp-content/uploads/Livre-blanc-MES.pdf

[10] https://www.uphf.fr/aipnpdc/

[11] P. CAULIER et A. BEKRAR. "Pilotage adaptatif et durable d'une cellule de production de biens intelligents", Actes du 15ème Colloque National AIP-PRIMECA, La Plagne, France, 12-14 avril 2017.

[12] https://www.pcvuesolutions.com/france/

[13] https://www.ordinal.fr/

[14] M. WCISLIK, K. SUCHENIA, M. LASKAWSKI, "Programming of sequential control systems using functional block diagram language". IFAC Papers on line, Volume 48, Issue 4, pp. 330-335, 2015.

[15] M. DE SOUSA. . "Analysing the compatibility between ISA-88 and IEC 61499". Proceedings of IEEE Conference on Emerging Technologies and Factories Automation, 2010.

[16] P. CAULIER, V. VANDERHAEGEN. "Improving proactive human behavior in supervision of manufacturing systems using chronicles", 12th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems, August 11-15, Las Vegas, USA, 2013.

[17] O. DELEPINE, P. CAULIER, F. VANDERHAEGEN. "A method to improve human prognosis in supervision of complex systems". Procedings of 17th IFAC World Congress, July 6-11, Seoul, Korea, 2008.

Couplage de jumeau numérique et réseau de neurones pour la détection et l'analyse des micro-pannes dans un système de production

Farah ABDOUNE , Maroua NOUIRI , Olivier CARDIN, Pierre CASTAGNA

LS2N, UMR CNRS 6004, Université de Nantes, IUT de Nantes, 44 470 Carquefou, France

Farah.Abdoune@univ-nantes.fr; Maroua.Nouiri@univ-nantes.fr ;
Olivier.Cardin@univ-nantes.fr; Pierre.Castagna@univ-nantes.fr

Résumé— À l'ère de l'industrie 4.0, le jumeau numérique apparaît comme un paradigme qui joue un rôle clé dans l'amélioration de l'efficacité globale des équipements (OEE). Parmi les six grandes pertes d'efficacité mesurées dans le cadre de la maintenance productive totale, le Digital Twin peut augmenter la disponibilité du système de production en effectuant une maintenance prédictive ou peut se concentrer sur les pertes de performances qui représentent une partie importante des pertes de production quotidiennes. Ce travail vise à améliorer les performances des systèmes de production en exploitant les fonctionnalités du jumeau numérique et en utilisant un réseau de neurones pour repérer et analyser les micro-défaillances.

Mots-clés— Jumeau numérique, Machine Learning, système de production, micro-pannes, Réseau de neurones.

I. INTRODUCTION

Avec la 4ème révolution industrielle, les entreprises se doivent de rester compétitives, et pour cela l'optimisation des gains en mettant en œuvre des indicateurs clés de performance puissants peut se révéler un atout important pour la prise de décision. Dans ce contexte, l'évolution des systèmes de production cyber-physiques exige qu'ils soient capables de s'adapter et de réagir au mieux aux aléas de production et aux pertes de performances. La maintenance productive totale (TPM) est une méthodologie permettant de maintenir et améliorer la performance des équipements dans le secteur de l'industrie développées par Nakajima [1]. Dans cette méthodologie, le taux de rendement global (TRG) permet de mesurer l'efficacité des systèmes de production, afin d'identifier les pertes et les différents aléas de production. Le calcul du TRG permet aux industriels d'identifier les principales pertes et prendre les décisions nécessaires afin d'y remédier. Le TRG est défini par la formule suivante :

$$TRG = \text{Disponibilité} \times \text{Performance} \times \text{Qualité} \quad (1)$$

où le taux de disponibilité est le rapport entre le temps brut de fonctionnement et le temps de production prévu, le taux de performance est le rapport entre le temps de cycle réel et le temps de cycle idéal et le taux de qualité est le rapport entre le nombre de bons produits et le nombre total de produits fabriqués [2]. Ces trois paramètres sont souvent influencés par les six grandes sources de pertes : (i) Pertes de rendement dues aux pannes d'équipement ; (ii) Pertes dues aux configurations et aux ajustements ; (iii) Pertes dues à la marche à vide et aux arrêts mineurs ; (iv) Pertes de vitesse de fonctionnement due a des cadences de fonctionnement réduites ; (v) Pertes dues aux défauts de qualité et aux retouches et (vi) Pertes liées au démarrage d'équipements[3].

Au sein de ces causes, les arrêts mineurs, aussi appelés micro-arrêts, micro-défaillances ou micro-pannes sont très difficiles à évaluer de par leur hétérogénéité et leur fréquence d'apparition très variable. Il a été démontré dans une étude [4] que près de 90% des pertes sont dues aux arrêts sont les pertes de vitesses, les micro arrêts et les pannes.

Ces micro-défaillances signifient que la machine s'arrête, pendant un temps court et fréquent, à cause d'un évènement mineur. Dans de nombreux cas, elles ne sont pour ainsi dire pas prises en compte, même si elles peuvent être chroniques. Au total, elles peuvent ainsi représenter une part importante des pertes de disponibilité et de performance d'un équipement.

Ce papier a pour objectif de proposer un nouvel outil permettant à la fois de suivre et repérer les différentes micro-défaillances au travers d'un jumeau numérique, pour ensuite les classifier grâce à un outil de Machine Learning. Pour cela, nous nous basons sur l'implémentation du jumeau numérique afin de modéliser l'état d'un système de production, anticiper ses performances nominales, faciliter l'accès aux données, et ainsi donner la possibilité de détecter tout écart de fonctionnement entre le réel et le nominal. Un réseau de neurones a été développé, permettant d'exploiter les données issues du jumeau numérique pour en extraire les informations utiles concernant les pertes de performance et les micro-défaillances. Une étude de cas est proposée sur une ligne d'assemblage automatisée S.mart de l'IUT de Nantes.

La section suivante présente un ensemble de travaux relatifs à la problématique de perte de performance et d'efficacité dans les systèmes de production. Ensuite, les concepts de jumeau numérique et de Machine Learning sont présentés, avant la définition de l'architecture de couplage entre ces deux outils.

Enfin, l'étude de cas est présentée et démontre la possibilité d'identifier automatiquement un ensemble de micro-défaillances sur notre cas d'application

II. ETAT DE L'ART :

Les articles recensés qui portent à la fois sur le jumeau numérique et les micro-défaillances sont rarissimes. De ce fait, nous nous intéressons dans cette revue de littérature aux travaux menés sur les pertes de performance et d'efficacité des systèmes de production, ainsi que les méthodes employées pour y remédier.

Pour évaluer et mettre en évidence l'impact de la survenance de certains événements comme l'endommagement des outils de production ou la variabilité des opérations humaines sur les performances d'une chaîne de montage automobile, une approche de simulation à évènements discrets est souvent employée[5] afin de simuler par exemple les pertes dues à la fatigue, au climat, à l'environnements et aux micro-défaillances. En analysant les résultats de simulation, il a été démontré qu'il est possible d'évaluer de manière préventive ou en temps quasi réel, le TRG.

Certains auteurs penchent vers des modèles mathématiques afin de démontrer l'influence de certains facteurs sur la performance. Afin d'étudier la relation entre les facteurs technologiques, humains et produits et les pertes de vitesse [6], une régression généralisée des moindres carrés est ainsi appliquée sur deux lignes de production. Suivant la même approche, des modèles géométriques et stochastiques sont proposés pour optimiser et analyser les pertes de performances des machines de production complexes[7].

D'autres travaux suggèrent des méthodes d'intelligence artificielle pour prédire certaines valeurs liées au TRG. Des méthodes de lissage sont utilisées dans R studio en vue de prédire les performances futures du TRG [8], utilisant un algorithme d'apprentissage supervisé pour une technique de prévision en utilisant les données historiques de l'OEE, tandis qu'un autre algorithme est développé pour prendre en compte toute tendance actuelle en utilisant l'apprentissage non supervisé en se basant sur les pertes de disponibilité, de performance et de qualité [9]. Différents algorithmes d'apprentissage automatique que sont la machine à vecteurs de support, Random Forest, XGBoost et Deep Learning ont été expérimentés pour prédire les valeurs du TRG estimées d'une industrie de production de câbles automobile afin d'identifier et éliminer les pertes relatives à la performance. Des méthodes empiriques et analytiques ont également été exploitées pour l'identification des causes de pertes, l'amélioration de performance et la réduction des temps de cycle.

D'autre part, différents auteurs ont employés des méthodes analytiques et empiriques. A partir d'une analyse des six principales causes de pertes, il a été démontré via une analyse de Pareto que près de 90% des pertes dues aux arrêts sont les pertes de vitesses, les micro-arrêts et les pannes [4]. En industrie des semi-conducteurs, l'identification et quantification des catégories de perte de vitesse, ainsi que la mise en place d'actions spécifiques ciblées sur les pertes de vitesse au niveau d'un ensemble d'outils, a permis d'avoir un impact direct sur la capacité globale et les performances de l'usine [10].

Dans un même ordre d'idée, les auteurs implémentent la maintenance productive totale (TPM) dans l'industrie alimentaire en utilisant une méthodologie de développement en quatre étapes afin d'éliminer les pertes de performance et de qualité [11].La méthodologie est basée sur l'analyse des données de fiabilité d'une ligne de production automatique, dont l'objectif est d'améliorer la politique de maintenance. L'approche DMAIC a été utilisée pour définir, mesurer, analyser, améliorer et contrôler systématiquement les performances de l'équipement[12]. Le but est de discuter et de mettre en évidence la méthodologie six-sigma pour réduire le goulot d'étranglement et le temps de cycle et en l'occurrence éliminer les pertes de temps dans le processus de production. Entre autres, une industrie du tabac faisait face à un problème en raison de pannes, défauts d'équipement et mauvais fonctionnement. L'objectif est de réduire les pertes de temps en implémentant la maintenance productive et en utilisant la méthode AMDEC (analyse des modes de défaillance, de leurs effets et leurs criticité). Après la mise en œuvre, le taux de performance est passé de 75% à 79% [13].

Selon nos recherches, peu de travaux ont finalement étudié les pertes de performances liées aux micro-défaillances, ce qui implique se priver d'un levier permettant une meilleure efficacité du système de production.

III. JUMEAU NUMERIQUE

Le concept du jumeau numérique (Digital Twin - DT) a été proposé pour la première fois par le professeur Grieves de l'Université du Michigan dans le cadre de la gestion du cycle de vie des produits [14]. Il est désormais attendu qu'un DT ait la capacité d'augmenter l'intelligence et les performances d'un système de production cyber-physique (CPPS) grâce à des fonctions d'analyse, de prédiction, de diagnostic et d'optimisation des performances [15]. Au cours des dernières années, il a été proposé d'utiliser le paradigme du jumeau numérique pour réduire ou éliminer les risques potentiels sur les actifs et améliorer l'efficacité, la maintenance et la disponibilité des systèmes de production [16].

La définition générale d'un jumeau numérique reste à nos jours mitigée, les industriels et les chercheurs le définissant de plusieurs manières. Glaessgen et Stargel [17] proposent la définition la plus courante d'un jumeau numérique : « une simulation multi-physique, multi-échelles et intégrée d'un produit complexe et utilise les meilleurs modèles physiques disponibles, mises à jour par les capteurs pour refléter la vie de son jumeau correspondant ». Bien que la terminologie ait évoluée au fil des ans, le concept d'un jumeau numérique est généralement basé sur le monde réel, récupérant en temps réel des données, nous permettant de visualiser l'évolution de système ou du processus dans le monde numérique et de fournir des informations sur la performance de celui-ci.

Une des définitions initiales des jumeaux numériques a énuméré trois fonctions principales de jumeau numérique [18], [19] : la surveillance, la prédiction et le diagnostic. Ces fonctionnalités consistent à étudier le comportement du système

réel avant, durant ou après la survenance d'évènements spécifiques respectivement. Au travers de ces trois fonctions, il doit être possible de prédire le comportement du système face à un événement inattendu, après, pendant, voire avant qu'il ne se produise[20].

Ces types de prédictions sont réalisés en analysant la réponse actuelle du système et le comportement nominal prévu. Un jumeau numérique nécessite donc d'être pourvu de moyens de collecte et d'échange de données, ainsi que de modèles de comportement.

IV. Machine Learning

L'utilisation d'algorithmes d'intelligence artificielle a permis de faire un grand pas en avant dans le contrôle et la surveillance des processus industriels [21].La mise en œuvre d'algorithmes d'apprentissage automatique peut aider à prédire, optimiser, diagnostiquer et planifier le processus de production de nombreuses façons pour améliorer l'efficacité globale du système industriel.

L'apprentissage automatique est une branche de l'IA basée sur l'utilisation de données et des probabilités statistiques pour apprendre automatiquement et identifier des modèles récurrents sans programmation explicite. Il peut être subdivisé en deux catégories principales. L'apprentissage supervisé est basé sur des données historiques disponibles et étiquetées préalablement. Dans ce cadre, deux approches sont possibles : la classification et la régression [22]. La classification est le processus de recherche de modèles mathématiques et statistiques pour séparer les données en plusieurs classes, alors que la régression a pour but de distinguer les données en valeurs réelles continues. L'apprentissage non supervisé utilise des données non étiquetées, de sorte que l'algorithme d'apprentissage trouve tout seul à déterminer les critères les plus pertinents pour regrouper les données [23].

Dans cette étude, nous nous intéressons à l'apprentissage automatique supervisé afin de faire de la classification des micro-défaillances à partir de données étiquetées.

V. Architecture proposee :

L'objectif principal de cette architecture est d'implémenter un outil apte à identifier et localiser les dysfonctionnements afin d'informer l'opérateur des arrêts potentiels qui peuvent compromettre la fiabilité et les performances du système.

L'architecture met l'accent sur la surveillance et la prédiction des micro défaillances. Le DT permet de suivre les événements survenant dans le système réel en temps réel et faire la différence avec le comportement nominal. Cela permet de détecter les perturbations et les enregistrer dans une base de données. Le traitement des données à l'aide d'un algorithme d'apprentissage automatique pour classer les dysfonctionnements enregistrés et les prédire, assure la seconde fonctionnalité.

L'architecture proposée est composée de deux couches : cyber et physique. Celles-ci sont à leur tour divisées en quatre modules : l'espace réel, l'espace virtuel, le module intelligent et le centre de décision (voir Figure 1). Cette architecture intègre les architectures proposées récemment dans la littérature par Tao [24], qui affirme qu'un cadre préliminaire générique du DT doit comporter au moins cinq parties: espace physique, espace virtuel, la connexion entre les deux, les données et le service.

1. Système physique :

La couche physique se réfère principalement au système de production comprenant la ligne de production et ses postes de travail, le stockage, les moyens de transfert, les capteurs, les actionneurs, les contrôleurs, le système d'exécution de fabrication, etc. Cette couche est chargée de fournir à la couche supérieure du modèle les données nécessaires.

2. Système virtuel :

Les données sont collectées en temps réel à partir de l'espace physique à l'aide d'un protocole de communication (OPC, TCP/IP, Modbus/TCP …etc.) .Cette fonction est importante car elle permet de connaître l'état et le comportement du système réel. Les automates programmables industriels peuvent faire référence à des données mesurables concernant un produit en cours de traitement, mais également les données de capteurs et d'actionneurs nécessaires au contrôle. Ces données alimentent le modèle virtuel représentant le modèle physique. Ce modèle peut être un modèle de données (des schémas aux représentations statistiques), modèle de simulation (continu, discret, hybride…), modèles 3D, …etc.

Ce modèle doit être en mesure de connaître l'état et le comportement du système réel et faire la différence avec le comportement nominal, pour repérer tout dysfonctionnement. Celui-ci doit également être parfaitement synchronisé avec le modèle réel pour éviter tout écart ou erreur. Les données sont stockées dans la base de données, créant ainsi un historique de comment l'équipement a été utilisé et exploité au fil du temps.

3. Module intelligent

Les données enregistrées sont ensuite nettoyées, étiquetées et transformées. Elles sont ensuite traitées à l'aide d'un algorithme de Machine Learning permettant d'extraire les informations importantes. Nous verrons cette partie plus en détails ultérieurement.

4. Centre de décision

Les résultats des analyses et l'extraction de connaissance à partir des données sont envoyées à l'opérateur. Ce dernier peut les visualiser sur une interface homme machine (IHM) dédiée connectée au système de production (e.g. une application de suivi sur son smartphone, sur objets connectés ,etc.). Ainsi, il est informé sur les dysfonctionnements éventuels et peut ainsi prendre plus rapidement la décision d'agir.

VI. Description de l'etude de cas

Afin de démontrer l'efficacité de l'architecture proposée figure 1, une étude de cas est réalisée sur la ligne d'assemblage S.mart de l'IUT de Nantes, comprenant six postes de travail différents et un magasin de stockage. La figure 2 illustre les détails d'implémentation de notre modèle dans l'étude de cas testée.

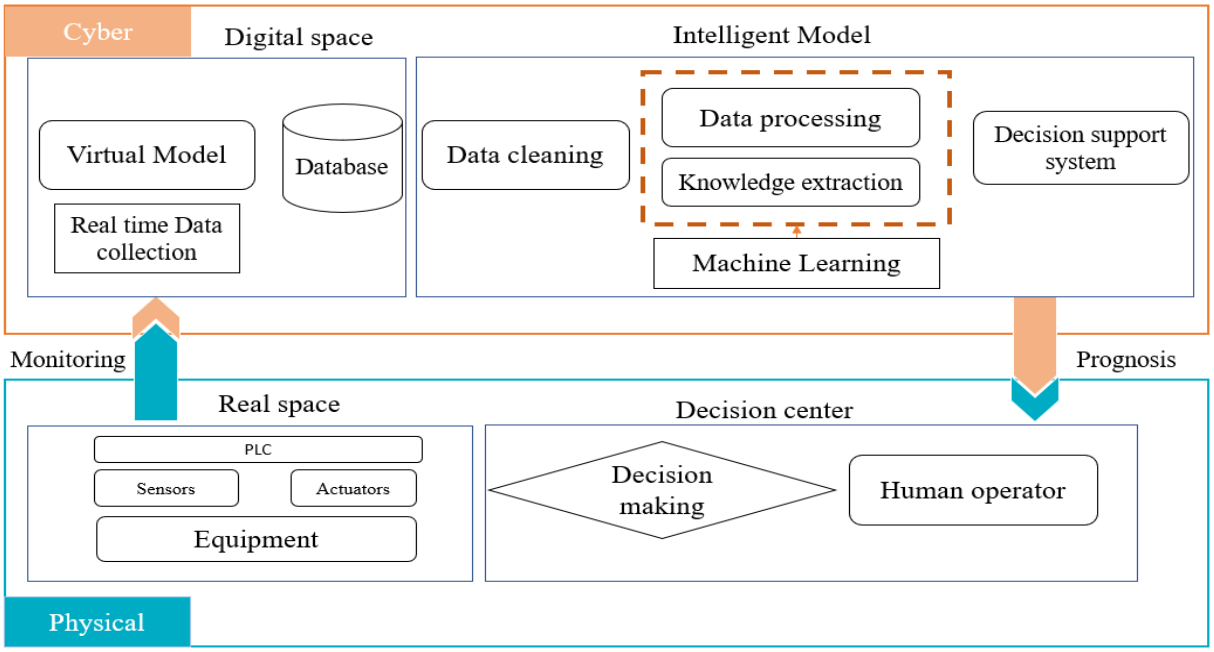


Figure 1. ARCHITECTURE D'IMPLEMENTATION

1) Identification des micro-défaillances :

Dans notre cas, nous avons identifié 3 principales micro-défaillances récurrentes impactant le bon fonctionnement de la ligne d'assemblage :

- Réglages incorrects d'un poste de travail
- Micro-blocages des palettes dans les virages
- Butées bloquées

2) Récupération et Synchronisation des données :

Un modèle de simulation (1) de la Figure 3 a été développé pour remplacer la ligne d'assemblage réelle (1) de la Figure 2 lors de la phase d'entrainement du réseau de neurones, Nous nous sommes servis de ce modèle pour générer des données qu'il nous aurait été difficile d'observer réellement sur le système réel en maitrisant parfaitement les scénarios de défaillance générés. Il est impératif de synchroniser ce modèle avec le système réel (1) de la figure 2 pour éviter les écarts entre le modèle réel et simulé.

Nous avons ensuite créé un modèle virtuel sous Flexsim, noté (2) dans la figure 2. Le comportement de celui-ci est nominal, et il est capable de faire la différence (4) avec le comportement réel généré par le système physique (1). Le résultat de cette différence nous renseigne sur la micro défaillance survenue, son type, l'endroit où elle s'est produite et le temps d'arrêt du système.

Les données de ces différences sont enregistrées dans une base de données MySQL ((5) de la figure 2), permettant d'avoir un historique indiquant un comportement anormal des différentes micro-défaillances ainsi que leurs caractéristiques, mais également des données représentant un comportement sain et normal.

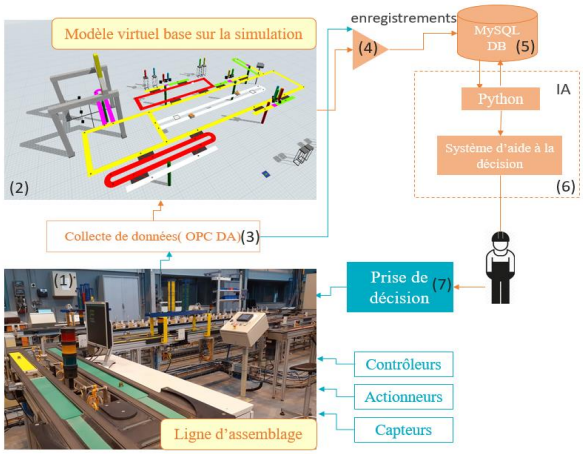


Figure 2. ETUDE DE CAS

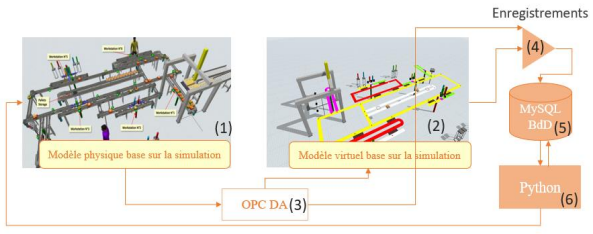


Figure 3. SYNCHRONISATION ET REGLAGE

3) Enregistrement, traitement et exploitation des données

Les anomalies, comme les micro-défaillances dans notre cas, peuvent être identifiées au moyen de méthodes de classification telles que les réseaux de neurones, les machines à vecteurs de support où les forets d'arbre aléatoire.

Un réseau de neurones artificiel (RNA) a été implémenté sous python pour classifier les micro-pannes ((6) de la figure 2). Avant la phase de classification, un processus de préparation des données est nécessaire. Il comprend la sélection des données appropriées à partir des données brutes, le prétraitement des données en nettoyant ou corrigeant les données manquantes, puis la transformation des données dans une forme structurée adaptée pour travailler avec.

Ayant simulé plusieurs types de pannes relatives 3 micro-défaillances identifiées, nous avons ainsi utilisé la classification en classes multiples permettant de calculer la probabilité de défaillance due à l'une des multiples causes de micro-pannes. Quatre classes ont été ciblées dans cette étude :

- Classe 1 : avec micro-panne relative au poste de travail (machine)
- Classe 2 : micro-panne relative au blocage des palettes dans le virage
- Classe 3 : micro-panne relative au blocage dans l'aiguillage.

Les RNA sont l'un des algorithmes de ML les plus courants et appliqués, et ils ont été proposés dans de nombreuses applications industrielles [25]. Le comportement intelligent des RNA provient des interactions entre les unités de traitement du réseau. Un RNA est composé de plusieurs unités de traitement appelées neurones qui ont un fonctionnement relativement simple. Ces unités sont généralement connectées par des canaux de communication qui ont un poids associé; et ils exploitent uniquement leurs données locales qui sont indiquées par leurs connexions.

4) Exécution et résultats

Notre réseau de neurones est implémenté en utilisant une couche d'entrée de 8 neurones. Deux couches cachées sont constituées de 20 et 25 neurones respectivement. La fonction Softmax qui attribue des probabilités décimales à chaque classe d'un problème à plusieurs classes est utilisée dans la couche de sortie, cette dernière se composant de 3 nœuds.

L'architecture de notre RN utilisée dans cette section est formée par les structures et paramètres suivants : Numéro d'époque : 200 ; taille du lot= 16 ; Fonction d'activation : Algorithme d'optimisation d'Adam ; Fonction de perte : précision.

Nous séparons l'ensemble des données en deux, nous nous servons de la première partie (80 % des données) afin d'entrainer notre modèle et de la deuxième (20% des données) afin de tester sa précision et son efficacité. Nous prenons 20% des données d'entrainement pour faire la validation ultérieurement. Notre modèle a été implémenté en utilisant python 3.6 et ses différentes librairies.

Nous avons obtenu une précision de 97,56 % dans notre étude de cas. Nous pouvons visualiser les résultats détaillés dans la matrice de confusion de la figure 4. Cette efficacité s'avère être intéressante pour ce modèle. Les chiffres en diagonales représentent les instances prédites correctement.

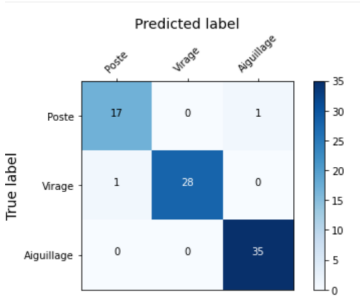


Figure 4. MATRICE DE CONFUSION

VII. CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Nous avons proposé une architecture afin d'implémenter dans les systèmes de production un jumeau numérique apte à améliorer la performance des systèmes de production en détectant les micro-défaillances et en les analysant avec un réseau de neurones. Cette architecture repose principalement sur la synchronisation entre le système réel et le système virtuel, l'analyse des données et les techniques d'intelligence artificielle.

Les travaux de cet article forment un socle qui ouvre des perspectives intéressantes, à plus ou moins long terme. Les tests sur la ligne d'assemblage réelle sont les premiers objectifs des travaux futurs. L'implémentation d'une interface pour la visualisation des données par l'opérateur en temps réel, l'utilisation des capteurs IoT liés à la ligne ou des objets connectés à l'opérateur afin de le prévenir des dysfonctionnements sont des possibilités envisageables afin d'améliorer l'architecture proposée. Enrichir les données pour obtenir une meilleure précision du réseau de neurones est aussi primordial.

VIII. REFERENCES

[1] S. Nakajima, *Introduction to TPM : Total Productive Maintenance*, Productivity Press. Cambridge, 1988.

[2] R. C. Hansen, *Overall Equipment Effectiveness: A Powerful Production/maintenance Tool for Increased Profits*. Industrial Press Inc., 2001.

[3] P. Muchiri et L. Pintelon, « Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion », *Int. J. Prod. Res.*, vol. 46, nº 13, p. 3517-3535, juill. 2008, doi: 10.1080/00207540601142645.

[4] J. Hossen, N. Ahmad, et S. M. Ali, « An application of Pareto analysis and cause-and-effect diagram (CED) to examine stoppage losses: a textile case from Bangladesh », *J. Text. Inst.*, vol. 108, nº 11, p. 2013-2020, nov. 2017.

[5] M. Caterino *et al.*, « Simulation Techniques for production lines performance control », *Procedia Manuf.*, p. 6, 2019.

[6] A. Trattner, L. Hvam, et A. Haug, « Why slow down? Factors affecting speed loss in process manufacturing », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 106, nº 5-6, p. 2021-2034, janv. 2020.
[7] W. Nüßer et T. Steckel, « A mathematical model for the determination of performance losses of machines », *Appl. Math. Model.*, vol. 92, p. 612-623, avr. 2021.
[8] C. Anusha et V. Umasankar, « Performance Prediction through OEE-Model », *Int. J. Ind. Eng. Manag.*, nº 2, p. 93-104, juin 2020.
[9] I. Hassani, C. Mazgualdi, et T. Masrour, *Artificial Intelligence and Machine Learning to Predict and Improve Efficiency in Manufacturing Industry*. 2019.
[10] J. Foster, J. Matthews, P. Beaumont, T. Zarbock, et D. Yeo, « Equipment Throughput Optimization by Means of Speed Loss Analysis », *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 21, nº 3, p. 371-375, août 2008.
[11] P. Tsarouhas, « Total productive maintenance in food industry », *Food Ind.*, p. 14.
[12] K. C. Ng, K. E. Chong, et G. G. G. Goh, « Improving Overall Equipment Effectiveness (OEE) through the six-sigma methodology in a semiconductor firm: A case study », in *2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Selangor Darul Ehsan, Malaysia, déc. 2014, p. 833-837.
[13] K. Krachangchan et N. Thawesaengskulthai, « Loss time reduction for improve Overall Equipment Effectiveness (OEE) », in *2018 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, Singapore, avr. 2018, p. 396-400.
[14] M. W. Grieves, « Virtually Indistinguishable », in *Product Lifecycle Management. Towards Knowledge-Rich Enterprises*, Berlin, Heidelberg, 2012, p. 226-242.
[15] F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, et F. Sui, « Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 94, nº 9, p. 3563-3576, févr. 2018.
[16] J. Hlady, M. Glanzer, et L. Fugate, « Automated Creation of the Pipeline Digital Twin During Construction: Improvement to Construction Quality and Pipeline Integrity », présenté à 2018 12th International Pipeline Conference, nov. 2018.
[17] E. Glaessgen et D. Stargel, « The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles », avr. 2012.
[18] M. Glatt, C. Sinnwell, L. Yi, S. Donohoe, B. Ravani, et J. C. Aurich, « Modeling and implementation of a digital twin of material flows based on physics simulation », *J. Manuf. Syst.*, mai 2020.
[19] M. Shafto *et al.*, « Modeling, simulation, information technology & processing roadmap », *Natl. Aeronaut. Space Adm.*, 2012.
[20] B. Schleich, N. Anwer, L. Mathieu, et S. Wartzack, « Shaping the digital twin for design and production engineering », *CIRP Ann.*, vol. 66, nº 1, p. 141-144, janv. 2017.
[21] F. Bonada, L. Echeverria, X. Domingo, et G. Anzaldi, « AI for Improving the Overall Equipment Efficiency in Manufacturing Industry », in *New Trends in the Use of Artificial Intelligence for the Industry 4.0*, L. Romeral Martínez, R. A. Osornio Rios, et M. Delgado Prieto, Éd. IntechOpen, 2020.
[22] S. Ray, « A Quick Review of Machine Learning Algorithms », in *2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing*, févr. 2019, p. 35-39.
[23] A. Dey, « Machine Learning Algorithms: A Review », *Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol.*, vol. 7, p. 6, 2016.
[24] F. Tao *et al.*, « Digital Twin and Its Potential Application Exploration 数字孪生及其应用探索 », *Comput. Integr. Manuf. Syst.*, vol. 24, janv. 2018.
[25] T. P. Carvalho, « A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance », *Ind. Eng.*, p. 10, 2019.

Intégration du jumeau numérique dans le cycle de vie d'un projet industriel.

Simulation, optimisation, prédiction et adaptation de l'implantation et des cycles.

Julien CHAPELIN
Ingénieur Chercheur
ICube UMR CNRS 7357
24 Boulevard de la Victoire,
67000 Strasbourg - FRANCE
jchapelin@unistra.fr

Mathieu LAUER
Développeur solutions 4.0
SEW Usocome
48-54 Route de Soufflenheim,
67506 Haguenau - FRANCE
mathieu.lauer@usocome.com

Lionel STECK
Développeur solutions 4.0
SEW Usocome
48-54 Route de Soufflenheim,
67506 Haguenau - FRANCE
lionel.steck@usocome.com

Bertrand ROSE
Professeur des Universités, Responsable pédagogique
Master Génie Industriel
Chercheur au laboratoire ICube UMR CNRS 7357
Faculté de Physique et Ingénierie
3-5 rue de l'Université
bertrand.rose@unistra.fr

Benoît IUNG
Co-leader du groupe de recherche sur l'ingénierie des systèmes industriels durables
Professeur titulaire de Prognostic and Health Management
Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN)
UMR CNRS 7039
Campus Sciences BP 70239 54506,
Vandœuvre-lès-Nancy – France
benoit.iung@univ-lorraine.fr

Résumé : Cet article met en avant l'exploitation d'une solution logicielle développée par le service Pôle Process et Innovation (PPI) de la société SEW Usocome. Le service PPI a développé un outil permettant la standardisation de la programmation, du diagnostic et du déverminage de programme automate SEW.

Cette solution logicielle, en plus d'auto générer le code automate au format standard selon des paramètres d'entrée, met à disposition aux jumeaux numériques de l'entreprise les données automates et robots en temps réel. La mise à disposition de ces données permet : la simulation, l'optimisation, la prédiction et l'adaptation de l'implantation des lignes de production ainsi que des programmes automates et robots dont elles dépendent au travers d'un jumeau numérique.

Mots-clés : USINE DU FUTUR, JUMEAU NUMERIQUE, STANDARDISATION, SIMULATION, OPTIMISATION.

I. INTRODUCTION

A. contexte

La société SEW Usocome fait figure de pionnier de l'industrie du futur dans le Grand Est, elle est d'ailleurs labellisée « vitrine de l'industrie du futur » depuis 2016. Le Pôle Process et Innovation (PPI) de la société, est un service dédié à l'innovation et l'automatisation des moyens de production de l'entreprise. Ce service est en charge de la veille technologique et également de la conception, de la standardisation, de la réalisation et de la mise en route et du support de la quasi-totalité des moyens de production des usines françaises du groupe SEW.

Dans une optique de numérisation plus poussée de l'entreprise, PPI développe une solution logicielle permettant de :

- Structurer et standardiser la programmation pour homogénéiser le code et flexibiliser les installations de production.

- Développer les outils de diagnostic
- Rendre les cellules de production connectées

La solution baptisée « Le configurateur » est une web application reposant sur le modèle de l'API REST* et est compatible sur plusieurs types de supports matériels présents dans l'industrie, à savoir : PC, PC industriel, tablette, ou encore des smartphones.

*API REST : *Une API (Application Programming Interface) REST (REpresentational State Transfer) est un ensemble défini d'interactions qui utilise le protocole HTTP (HyperText Transfer Protocol), généralement en utilisant JSON (JavaScript Object Notation) ou XML (eXtensible Markup Language) comme format des données qui sont échangées. Par exemple, une demande de données peut utiliser une méthode HTTP GET et un enregistrement de données peut utiliser une méthode HTTP PUT. Le choix du format des données dépend du type d'application qui appelle l'API. JSON est couramment utilisé pour les applications web qui présentent une interface utilisateur (le configurateur entre dans cette catégorie d'application), alors que XML est souvent utilisé pour les scénarios de machine à machine (d'automate à ordinateur par exemple).*

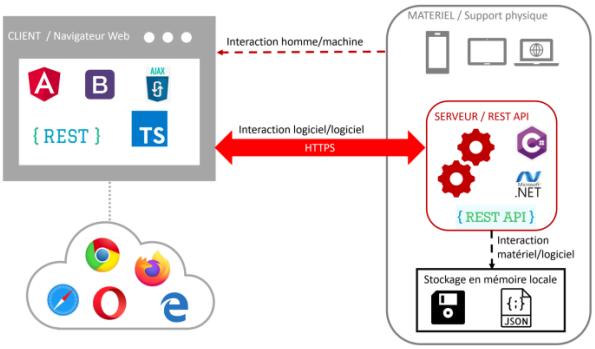


Figure 1. ARCHITECTURE DU CONFIGURATEUR (API REST)

Cette web application est un outil de paramétrage qui permet l'auto génération de code automate en fonction de paramètres d'entrée selon une architecture standard d'automatisme définie au sein de l'entreprise (pour la programmation d'automates SEW uniquement).

En plus de cette auto-génération de code, l'API du configurateur permet la récolte des états et variables automates/robots des cellules de production. Ces données sont mises à disposition d'autres applications via un web services (.SVC).

Aujourd'hui le configurateur est utilisé exclusivement par le service PPI pour la programmation, le diagnostic et le dépannage des cellules de production. Le configurateur est également utilisé pour alimenter le jumeau numérique en données dans certaines phases de la vie d'un projet (via le web service dédié).

B. *Problématique*

Cet article met en avant la vision ubiquitaire du jumeau numérique et de la réalité virtuelle dans le processus de création de cellules automatisées du service PPI et ce via une approche ascendante (bottom-up) où l'on part de l'application pour remonter aux enjeux.

Les deux problématiques qu'il expose sont les suivantes :

Comment utiliser aux maximum les modèles construit lors de la phase de conception du système pour faciliter et accélérer la mise en place du jumeau numérique ?

Comment utiliser des modèles multi physiques pour rendre le jumeau numérique réaliste et fidèle à son double physique ?

L'originalité de cet article est la mise en avant de la démarche projet de PPI qui intègre la réalité virtuelle, les modèles numériques et le jumeau numérique (JN) tout au long de la durée de vie d'un projet. En effet, il est rare de constater une intégration du JN tout au long de la démarche projet dans la littérature spécialisée [1]. Le but premier de l'utilisation des modèles numériques et du JN par PPI est d'optimiser les phases projets et de supprimer le gaspillage et les doublons dans les processus projets.

Pour des raisons de confidentialité, le nom des logiciels, du matériel et le détail de certains procédés seront volontairement censurés.

II. ETAT DE L'ART

A. *Définition du jumeau numérique*

Il existe une multitude de définitions pour le jumeau numérique [2]. Une première définition du jumeau numérique a été faite en 2002 par Michael Grieves [3] : Le jumeau numérique est la représentation virtuelle d'un produit physique actuel. Une décennie plus tard Glaessegen et Stargel proposeront leur définition du jumeau numérique [4] : Le jumeau numérique est une simulation probabiliste intégrée multi-physique et multi-échelle d'un produit complexe, utilisant les meilleurs modèles physiques disponibles, données capteurs, etc. pour refléter la vie de son jumeau correspondant. Comme le souligne Yvan Tchana [5], ces définitions assez génériques ne mettent pas en avant une des caractéristiques les plus intéressantes du jumeau numérique : l'acquisition temps-réel des données.

Dans ce document, le jumeau numérique (JN) est défini comme une simulation probabiliste d'une ligne de production basée sur le modèle CAO du moyen de production physique, ayant la possibilité de représenter ou de piloter son double physique en temps réel via l'exploitation des données terrain fournies par le configurateur. Cela implique que le JN ne peut exister que si son double physique existe, en l'absence de double physique on parle alors de modèles numérique et non de JN.

B. *Domaines d'applications dans l'industrie*

Un article proposé par Tsega Y. Melesse en 2019 [1] propose une revue de la littérature concernant les jumeaux numériques dans les procédés industriels. L'analyse proposée dans cette publication conclue que dans l'industrie les jumeaux numériques sont principalement utilisés pour les processus de production, la maintenance prévisionnelle et le service après-ventes.

La vision du jumeau numérique de SEW Usocome est totalement en phase avec ces résultats, le jumeau numérique au sein de la société a pour but : de représenter fidèlement en temps réel les moyens de production physique, de piloter les moyens de production physique depuis leurs jumeaux numériques, de permettre la télémaintenance et la maintenance prévisionnelle, de diagnostiquer l'état de santé des lignes de production, et enfin, de permettre la simulation de modifications de moyen de production dans son JN.

III. L'ENVIRONNEMENT VIRTUEL DE L'ENTREPRISE

L'environnement virtuel de la société est composé de différentes solutions logicielles et d'une salle équipée dédiée à la recherche et développement sur les thèmes de la réalité virtuelle et augmentée.

La suite logicielle utilisée est constituée d'un PLM, d'un logiciel de CAO et d'un logiciel permettant la création, la gestion et l'animation de JN.

Au niveau des équipements, sont mis à disposition des développeurs et utilisateurs :

- Des ensembles de réalité virtuelle portatifs constitués d'un pc sac à dos, d'un casque de réalité virtuelle accompagné de ses manettes.
- Des ordinateurs de conception

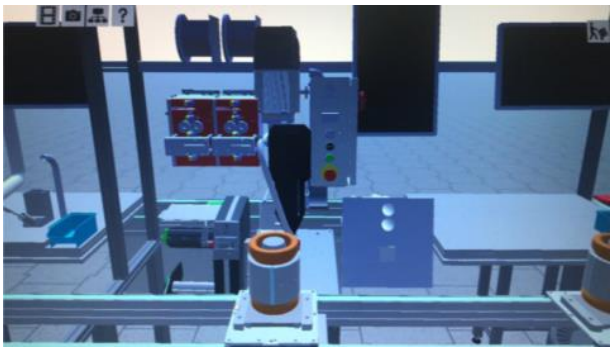


Figure 2. JUMEAU NUMERIQUE D'UNE LIGNE DE PRODUCTION VUE DEPUIS UN CASQUE DE VR

Aujourd'hui les JN sont uniquement exploités par PPI au sein de l'entreprise. Les JN sont connectés à leurs doubles physiques via le configurateur qui agit dans cette configuration comme un concentrateur de données. Les JN ne sont pas liés au système d'information de l'entreprise. La liaison entre le système d'information de l'entreprise et le JN est en phase de réflexion, elle permettra d'étendre les champs d'applications du JN en permettant par exemple des tests de gammes automatisées sur certaines cellules de production en fonction de données d'entrée fournies directement par l'ERP.

IV. LA RECUPERATION DES DONNEES

La récupération des données se fait aujourd'hui exclusivement via l'API du configurateur. L'API comprend un web service qui se charge de récolter les données automates et robots via un serveur OPC et des interfaces dédiées. Une fois les données récoltées, le web service les stocke en mémoire RAM dans un fichier JSON.

Les applications tierces extérieures au configurateur peuvent avoir accès en lecture à ce fichier JSON via une requête GET adressée à ce même web service. Elles peuvent également avoir accès en écriture à certaines variables via une requête POST, dans ce cas de figure le configurateur se chargera d'écraser la variable automate dans la mesure du possible.

L'API du Configurateur permet donc au travers de ce web service : la capture de l'état d'une cellule de production à un instant T, et le pilotage d'une cellule de production en simulation ou en production. Le configurateur agit comme un concentrateur de données, il est la passerelle qui permet de lier le terrain avec n'importe quelle application ayant besoin d'interagir avec les cellules de production réalisée par PPI.

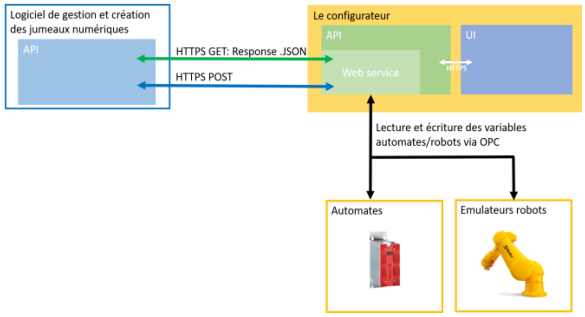


Figure 3. ARCHITECTURE SIMPLIFIEE DE LA RECOLTE ET DE L'ECHANGE DE DONNEES ENTRE LE TERRAIN ET LE JUMEAU NUMERIQUE

Grâce au configurateur il y a une réelle interaction bidirectionnelle entre l'environnement physique et l'environnement virtuel : il leur permet d'interagir mutuellement l'un sur l'autre.

V. L'EXPLOITATION DU JUMEAU NUMERIQUE, DES MODELES NUMERIQUE ET DE LA REALITE VIRTUELLE DANS LA DEMARCHE PROJET DU SERVICE PPI

A. *Introduction*

La société a une vision qui lui est propre du jumeau numérique et souhaite créer à termes des jumeaux numériques pour chaque ligne de production et chaque site de production.

Un des problèmes auxquels le service PPI en charge de cette digitalisation c'est confronté, est l'optimisation du temps de réalisation, en effet la mise en place d'un JN est très chronophage car sa mise en place nécessite beaucoup de ressources et d'étapes de validation. Pour optimiser la réalisation de JN, PPI à intégrer le processus de création du jumeau numérique dans sa démarche projet. Le but est d'éviter au maximum de réaliser des actions en doublon et de ne pas créer de tâches supplémentaire ou superflu comparé à une démarche de projet plus traditionnel ou le jumeau numérique n'est pas intégré.

Par exemple, le modèle numérique de la cellule sera créer une unique fois au format adéquat avec le logiciel de CAO par le projeteur. Le modèle numérique servira de base pour le futur jumeau numérique et toutes les étapes de tests et de validation intermédiaires, à savoir :

- L'immersion des clients dans un environnement virtuel
- Le « virtual commissioning » [6] du moyen de production
- La pré-réception et la réception virtuelle
- Les formations à distance

L'objectif final étant d'avoir un jumeau numérique représentant fidèlement à l'échelle 1:1 le moyen de production et ses états en temps réel (capteurs, actionneurs, cycle, temps de cycle, état de la cellule, référence en cours, consommation…).

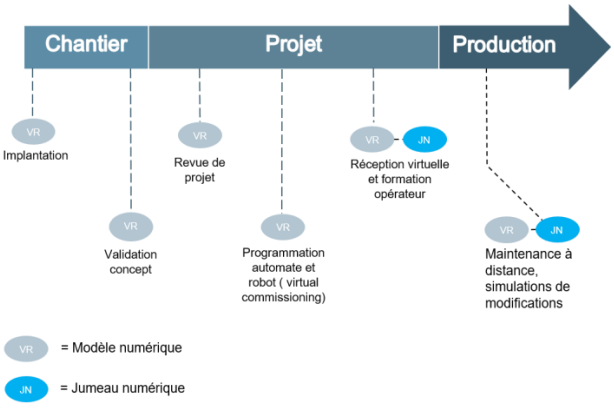


Figure 4. PLACE DU JUMEAU NUMERIQUE ET DU MODELE NUMERIQUE DANS LE CYCLE DE VIE D'UN PROJET

Actuellement, comme vous pouvez le constater sur la figure 4, le JN et la VR (modèle numérique immersif) sont utilisés en phase de :

- Validation de concept
- Revue de projet
- Programmation automate et robot
- Réception virtuelle et formation opérateur
- Télémaintenance

B. *Validation de concept*

Il est possible d'importer dans l'outil de création et de gestion des jumeaux numériques des éléments de CAO et des LOD** de bâtiment.

Dans la phase de validation de concept, il n'existe pas encore de jumeau numérique à proprement parler. On se sert de l'environnement virtuel pour faire des essais d'implantation et vérifier la cohérence du projet. Dans cette phase de projet, le client peut être immergé dans une maquette à l'échelle 1 de son futur moyen de production via les modèles numérique et les casques de réalité virtuel.

Pour ce faire il est nécessaire d'importer les modèles CAO des machines, robots, convoyeurs et des bâtiments voulus (depuis une librairie de composants modélisés par le service PPI). A partir de là il est alors possible de créer différents scénarios d'implantation et d'optimiser l'encombrement, les temps de cycles et l'ergonomie opérateur du futur moyen de production.

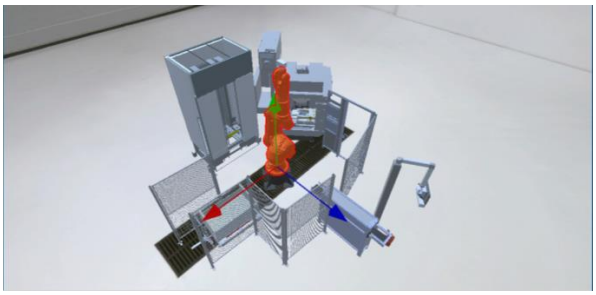


Figure 5. PLACEMENT D'ELEMENTS DANS L'ENVIRONNEMENT VIRTUEL

**LOD : *Le niveau de détail, plus connu sous l'acronyme Anglais de LOD (Level Of Detail) correspond à la précision géométrique d'une maquette numérique, caractérisée par la précision des objets 3D qui la constituent. Par extension, cette richesse géométrique permet d'obtenir un niveau de renseignement plus ou moins élevé adapté aux spécificités d'un projet.*

Le concept de LOD a été introduit par l'AIA (American Institute of Architects) en 2008. Celui-ci vise à standardiser un niveau de spécifications de référence et à fluidifier les échanges dans les projets de modélisation. Parallèlement, le niveau de détail est également un moyen de quantifier l'information minimale nécessaire pour un certain usage.

C. *Revue de projet*

Le JN lors de la revue de projet permet de structurer les avancées de la phase de conception et d'automatisme en simulant des actions. Cette phase permet de lever des zones

d'ombre et de mettre en avant des problèmes d'accessibilités robotique, mécanique, ou de maintenance. Ainsi, il est possible d'agir et de rediriger le projet au plus tôt.

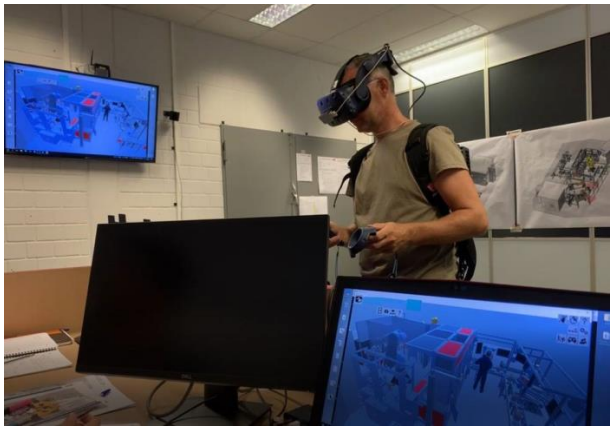


Figure 6. CLIENT EN IMMERSION DANS SA NOUVELLE CELLULE DE PRODUCTION

D. Programmation automate et robot

En utilisant le configurateur et le JN (ou le modèle numérique du moyen de production en fonction du contexte), les automaticiens et les roboticiens peuvent tester, simuler et valider leurs programmes dans un environnement acceptant l'erreur. Via cette phase de simulation, les différentes malfaçons qui auraient pu se glisser dans leurs programmes sont détectées et corrigées bien avant la phase de mise en route. Par exemple, une erreur de trajectoire robot engendrant potentiellement de la casse suite à une collision entre un robot et un outil est détectée et corrigée via la simulation, épargnant des coûts imprévus à l'entreprise si cette collision avait eu lieu en phase de mise en route ou de production. En plus de permettre des simulations de cycles et de trajectoires, le JN et le modèle numérique nous permettent de valider les préhenseurs robots, leurs phases d'approche dans les cycles et leurs raccordements pour des moyens de production existant ou en cours de réalisation.

E. Réception virtuelle et formation opérateur

La réception virtuelle permet d'immerger les clients, les opérateurs et la maintenance dans le futur moyen de production. Elle a pour but de permettre une validation définitive du futur moyen de production et de donner l'aval au lancement d'approvisionnement du matériel. L'objectif est de minimiser les modifications lors de la mise en route physique et d'atteindre le « bon du premier coup ».

F. Télémaintenance

Les personnes reportant les arrêts suite à une panne ou un dysfonctionnement n'étant pas forcément expertes en automatisme, ou n'ayant tout simplement pas été présentes lors d'un incident, ils ne peuvent pas toujours fournir des informations claires et précises permettant un dépannage à distance rapide et efficace. Dans ces scénarios de télémaintenance le JN couplé au configurateur est un véritable atout. En effet, en couplant le configurateur et le JN d'une cellule il est possible de rejouer des séquences entières de production.

La démarche est la suivante : l'état d'une ligne de production à un instant T pouvant être acquis via le configurateur et le webservice dédié, il suffit de demander le fichier JSON cycliquement durant l'exploitation de la ligne de production et de le stocker avec un horodatage dans une base de données. Ainsi, si le taux d'échantillonnage de l'état de la ligne de production est suffisant, il est possible de rejouer fidèlement des séquences de production entières via le JN en exploitation des segments de la base de données. De cette manière, il est permis de mettre en lumière des scénarios de défaillance ayant eu lieu et d'améliorer le diagnostic de télémaintenance.

VI. LES PROBLEMATIQUES ACTUELLES

A. La continuitée numérique

Une des problématiques sur lesquelles nous travaillons le plus est la continuité numérique du JN. Aujourd'hui, il est possible d'importer des fichiers de CAO vers l'environnement virtuel et de les agencer à notre guise pour définir une implantation de cellule. Mais il nous est impossible d'exporter l'implantation créée vers notre outil de modélisation CAO. Tout ce qui a été simulé avec l'outil de gestion et de création des JN et des modèles numériques doit être reproduit via l'outil de CAO.

Cette fonction d'exportation permettra aux équipes projets de supprimer une étape et ses itérations du flux de travail et par conséquent de gagner énormément en flexibilité et en temps de conception.

B. La physique appliquée au jumeau numérique

Aujourd'hui, le JN nous permet de simuler et de valider beaucoup d'éléments de nos cellules de production. Mais nos JN ne sont pas « physiqualisés », cela engendre des difficultés pour approcher la réalité lors de simulations de systèmes de convoyage ou de pose et de prise de pièces via un préhenseur robot.

Notre objectif à terme est d'avoir un environnement virtuel « physiqualisé » suivant des règles qui lui permette de réagir comme notre réalité. Cela sera une grande avancée qui permettrait de valider à 100% un projet uniquement via son JN et d'avoir une télémaintenance réaliste où les chutes de pièces et collisions seraient fidèlement reproduites.

Cette « physiqualisation » poussée à l'extrême permettrait également de simuler l'usure de convoyeurs, de pièces ou de tout autres éléments soumis fréquemment à une contrainte physique [7].

VII. REFERENCES

[1] Tsega Y. « Digital Twin Models in Industrial Operations: A Systematic Literature Review », procedia manufacturing 42, p. 267-272, 2020

[2] Negri E, Fumagalli L, Macchi M. « A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems. 27t International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing », FAIM 2017, p. 939-948, 2017

[3] Grieves M. « Digital Twin: manufacturing excellence through virtual Factory replication. » p. 2-7, 2014.

[4] Glaessgen E, Stargel D. « The Digital Twin paradigm for futur NASA and US Air Force vehicles. » 3rd AIAA/ASME/ASCE AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2012.

[5] Tchana Y et al. « Designing a unique Digital Twin for linear infrastructures lifecycle management », Procedia CIRP 84, p545-549, 2019

[6] Tobias L et al. « Virtual Commissioning – Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems », Procedia CIRP 81, p. 1125-1130, 2019.

[7] Ritto T.G. « Digital twin, physics-based model, and machine learning applied to damage detection in structures », Mechanical Systems and Signal Processing, volume 155, 107614, 2021.

Session 2-C : L'humain dans la boucle

Analyse exploratoire sur l'intérêt de l' informatique culturelle pour la conception d'IHM en ingénierie

Lou Grimal
InSyTE, CREIDD, University of Technology of Troyes
12 rue Marie Curie
10010 Troyes, France
lou.grimal@utt.fr

Nadège Troussier
InSyTE, CREIDD, University of Technology of Troyes
12 rue Marie Curie
10010 Troyes, France
nadege.troussier@utt.fr

Inès di Loreto
LIST3N, Tech-CICO, University of Technology of Troyes
12 rue Marie Curie
10010 Troyes, France
ines.di_loreto@utt.fr

Résumé— Il semble que de plus en plus d'écoles, sous la pression de mouvements d'élèves ingénieurs, intègrent les problématiques écologiques (environnement et social) dans les formations d'ingénierie. Cette préoccupation écologique semble constituer un changement culturel significatif chez les jeunes et futurs ingénieurs. Ce papier cherche à comprendre l'impact de des évolutions culturelles sur l'adaptation de l'IHM à la pratique professionnelle en ingénierie. L « 'informatique culturelle » sera mobilisé pour tenter de savoir si ce concept peut aider à la compréhension des changements à implémenter dans les outils d'interaction pour l'ingénierie. En d'autres termes, l'objectif de l'article est de savoir si un certain type d'IHM véhicule des éléments spécifiques apparentés à une culture spécifique (dans notre cas d'étude, une culture de la soutenabilité dans les milieux ingénieurs). Cette étude repose sur une analyse exploratoire de l'état de l'art et de situation d'usage de jeunes étudiants s'inscrivant dans un engagement sur le sujet de la soutenabilité et l'IHM d'un outil d'ingénierie qu'ils utilisent.

Mots-clés— interaction homme machine, informatique culturelle, soutenabilité , design for sustainability

I. INTRODUCTION

Depuis 2018, les universités voient des mouvements étudiants particulièrement forts demandant l'intégration des enjeux écologiques dans les parcours de formation (Ingénieur.e.s Engagé.e.s à l'INSA Lyon et puis dans l'ensemble des écoles d'ingénierie, le Manifeste Pour Un Réveil Écologique de 2019 signé par plus de 30 000 étudiants et jeunes diplômés, des listes de candidats aux conseils des études et conseil d'administration centrées sur les enjeux sociaux et environnementaux, etc). Ces mouvements, plutôt marginaux il y a une dizaine d'année, se sont transformés en un courant assez fort au sein des universités et écoles, au point que certaines écoles ont pris la décision d'intégrer ces enjeux dans leurs enseignements de manière systématique (INSA Lyon). Nous faisons l'hypothèse que ce changement constitue une évolution culturelle significative. Nous allons travailler dans le cadre de cette évolution des préoccupations sociétales, notamment la compréhension de l'urgence climatique par cette population jeune (élèves ingénieurs).

Nous ne pouvons travailler sur l'ensemble des outils d'ingénierie. C'est pourquoi dans ce papier nous abordons uniquement la question de l'interaction homme-machine (IHM) dans les outils d'ingénierie. L'IHM est comprise comme « *une discipline qui s'intéresse à la conception, à l'évaluation et à la mise en œuvre de systèmes informatiques interactifs destinés à l'usage humain et à l'étude des principaux phénomènes qui entourent l'interaction homme-machine* » [1]. Plus spécifiquement, nous allons nous intéresser à l'IHM soutenable. Qu'est-ce que l'IHM soutenable ? Nous pouvons différencier ce domaine d'expertise en deux sous domaines complémentaires, définit par [2] et repris par [3] :

- *Sustainability in design* : comment prendre en compte la soutenabilité dans la conception même des technologies d'interaction (efficacité énergétique, ré-usage, économie de la fonctionnalité, etc).
- *Sustainability through design* : comment influencer le style de vie d'un groupe de personnes à travers les interactions hommes – technologies. Dans ce sous domaine, 3 niveaux d'analyse sont proposés [2] : le niveau individuel (affichage environnemental des données du quotidien), le niveau d'un groupe (conception qui implique des personnes pour la prise de décision collective, encourager des pratiques collectives) et le niveau social (encourager le changement culturel ou aider au développement de mouvements sociaux).

Un des enjeux est la capacité à relier entre eux ces différents niveaux (individuel, groupe, société). De nombreux travaux se sont focalisés sur les problématiques de conception pour la soutenabilité au niveau individuel (modification des

comportements individuels) à travers l'informatique pervasive. Le niveau social sous-entend que des éléments spécifiques de l'IHM peuvent être apparentés à une culture spécifique. Rauterberg [5] et d'autres scientifiques comme [6] ou [7] ont travaillé sur la notion d'informatique culturelle pour définir comment une interaction homme – technologie peut véhiculer des cultures (concepts, manières d'êtres, compréhension du monde, traditions). Ce concept, défini il y a maintenant 10 ans, est surtout utilisé pour parler des cultures de peuples différents (européen, asiatiques) notamment à travers l'intégration de la culture asiatique dans des interfaces. Nous nous posons la question de l'apport de l'informatique culturelle sur l'IHM soutenable. Aussi, nous nous posons la question si la soutenabilité peut être comprise comme un contexte culturel spécifique.

Comme nous l'avons précisé précédemment, notre cadre d'étude est l'ingénierie. Nous avons donc choisi de prendre un outil d'ingénierie utilisé pour la soutenabilité : l'analyse de cycle de vie (ACV). Ce choix ne veut pas dire que nous allons travailler sur l'ACV comme outil d'aide à la conception. Nous allons travailler sur l'IHM de cet outil d'ingénierie. Nous avons choisi l'ACV car c'est un outil d'ingénierie qui peut attirer des professionnels avec une compréhension mature des enjeux écologiques (connaissances des limites planétaires, des enjeux Climat-Énergie, de l'épistémologie de l'écologie) et donc reliés aux mouvements présentés en début d'introduction.

Ainsi, ce papier tente d'évaluer comment l'informatique culturelle peut impacter des IHM, notamment en ingénierie compte tenu de l'évolution culturelle à vivre et à mettre en œuvre pour la soutenabilité. Dans un premier temps nous allons présenter les différents paradigmes en IHM et pourquoi la soutenabilité peut être considérée comme une culture spécifique. Dans un deuxième temps nous verrons le rôle de la conception IHM dans les outils d'ACV et le type d'expérience utilisateur d'une population jeune engagée.

II. DEFINITION DES TERMES

A. Les paradigmes en IHM

Paradigmes	**Description de chaque paradigme et exemples**
Paradigme personnel (interaction homme – machine)	Dans ce paradigme, l'ensemble des interactions sont entre un humain et une machine (généralement un ordinateur). Les interactions possibles entre ces deux entités sont plutôt statiques et caractérisées par son aspect individuel (orientées sur les tâches utilisateurs). Ce paradigme est né dès le début de l'informatique et n'a toujours pas disparu.
Paradigme Coopératif (interaction médiatisée par un ordinateur)	Dans ce paradigme, l'accent est mis sur les réseaux, la capacité à communiquer entre différents ordinateurs (capacité à s'envoyer des mails par exemple). Même si certaines fonctions étaient possibles avant les années 80, ce paradigme correspond au développement « grand public » de ces fonctionnalités. Ce paradigme est né dans les années 80-90 et n'a toujours pas disparu.
Paradigme social (interaction médiatisée par la communauté)	Dans ce paradigme, l'accent est porté sur les communications sur les réseaux sociaux (interaction médiatisée par les communautés). C'est également dans ce cadre qu'est né le travail dit coopératif assisté par ordinateur et l'usage plus large d'Internet. C'est également dans ce contexte qu'ont commencées à émerger les technologies ubiquitaires, c'est-à-dire le développement de supports informatiques autres que l'ordinateur (le téléphone portable par exemple), qui sont présentes dans notre quotidien. Ce développement a permis la recherche d'un type d'interaction plus personnalisé. Ce paradigme est né dans les années 90-2000 et n'a toujours pas disparu.
Paradigme culturel (interaction médiatisée par le Kansei)	Le paradigme culturel est une proposition de Rauterberg. Le paradigme de l'informatique culturelle est créé à partir du constat que les technologies véhiculant de l'information sont présentes dans toutes les parties du monde et dans les quotidiens des individus. Ces technologies servent de medium pour véhiculer de la communication entre différentes localités. La communication « Kansei » serait la base de l'IHM culturel dans le sens où ce type de communication porte des « informations non verbales, plutôt de l'ordre de l'émotion ». Les auteurs parlent de communication « inconsciente » [9]. Ce concept est né sur le constat que les technologies multimédia conventionnels sont basées sur une communication logique et que ce type de communication réduit la capacité de perception et de compréhension de la communication. Selon Rauterberg, ce paradigme né au cours des années 2000-2010.

Tableau 1. DESCRIPTION DES PARADIGMES IHM DE RANTERBERG

Les paradigmes de l'IHM constituent une proposition de Rauterberg [5]. Le Tableau 1 reprend les 4 paradigmes proposés.

C'est le dernier paradigme nommé « paradigme culturel » qui nous intéresse car nous souhaitons savoir si la soutenabilité peut être comprise comme une culture spécifique et entrainer des changements significatifs au niveau de la conception des IHM. Ainsi la prochaine section sera dédiée au rôle du contexte dans la conception IHM et la définition d'un contexte culture de soutenabilité.

B. Impact du contexte sur les IHM

1) Qu'est-ce qu'un contexte culturel ? Pourquoi est-ce important ?

L'informatique sociale (comprise comme un domaine et non comme un paradigme) « renvoie à l'application de la compréhension sociologique à la conception de systèmes interactifs » [10]. Grâce à ce domaine d'étude, nous savons que l'utilisation d'un outil technique dépend de son contexte. Le contexte est ici entendu comme les éléments sociaux et techniques d'un environnement. Plus précisément, comme l'explique Dourish, un « contexte » peut se définir selon les éléments suivants :

- Les tâches que le système utilise pour accomplir l'action ;
- La raison pour laquelle les tâches sont exécutées ;
- Les conditions dans lesquelles le travail est effectué ;
- Les autres facteurs qui entourent l'utilisateur ou le système.

L'un des « autres facteurs » est, selon les auteurs, le facteur culturel. La culture est un mot large qui est compris ici comme la représentation de « très nombreux aspects intangibles de nos

valeurs, coutumes et modes de vie » [11]. Selon Hawkes, la culture comporte 3 aspects : (1) les valeurs, (2) les processus et le milieu et (3) la manifestation.

Avant d'aller plus loin, nous devons définir rapidement ce que nous entendons par soutenabilité. Dans cet article, la soutenabilité se réfère à la soutenabilité forte[1]. La soutenabilité faible correspond au paradigme dominant. Dans cet article, nous comprenons la soutenabilité comme une soutenabilité forte [13], ce qui correspond à une vision spécifique du monde et à un véritable changement de paradigme (peut être perçu comme une innovation socio-technique radicale en marge d'un régime socio-technique dominant [14]). Gero et Kannengiesser [8], nous parlent du contexte de conception comme un contexte composé de 3 mondes [8, Figure 4] : le monde extérieur au concepteur, le monde interprété par le concepteur (c'est le monde extérieur mais perçu par le concepteur), le monde attendu par le concepteur (les effets des actions du concepteur ont un impact dans ce monde). Est-ce que l'urgence de la situation planétaire dû au dérèglement des éléments du systèmes Terre (dérèglement du Climat, perturbation des cycles biogéochimiques du phosphore et de l'azote, chute majeure de la biodiversité) a un impact sur la manière dont les concepteurs perçoivent leur métier et leur action dans le monde (monde attendu) ?

Nous faisons l'hypothèse que si les connaissances du concepteur évoluent (compréhension de l'urgence climatique dans notre exemple), sa manière de percevoir le monde et de concevoir pour agir dans ce monde peut également évoluer. Par conséquent, nous considérons que cela peut avoir un impact sur la conception IHM. Ainsi les traditions, langues, préoccupations des concepteurs (éléments caractéristiques d'un contexte culturel) peuvent avoir une influence sur le monde attendu du concepteur et ce concepteur peut être en attente d'un type d'interaction spécifique.

2) Spécificités d'un « contexte de soutenabilité »

Afin de comprendre les spécificités d'un contexte de soutenabilité, nous nous sommes intéressés aux articles qui décrivent la relation entre les communautés et la technologie. Nous avons principalement utilisé les travaux de [15] et [16], pour identifier les spécificités de la technologie qui correspondraient à un contexte soutenable (de faire impact environnemental, sans pauvreté sociale). A travers ces articles, nous avons identifié plusieurs caractéristiques de ces communautés (dans leur fonctionnement notamment). Cela nous permet d'identifier trois caractéristiques (parmi d'autres) des technologies interactives correspondant à ce contexte :

- Confiance dans le système : les données utilisées pour guider les acteurs dans leurs pratiques sont co-construites (compréhensibles).
- Convivialité du système : la complexité du système ne doit pas être trop grande pour ne pas limiter son utilisation. Si la complexité est trop élevée, l'outil peut allonger le temps nécessaire à l'accomplissement d'une tâche et l'utilisation de la technologie numérique devient contre-productive.
- Changement structurel : le système ne doit pas inviter à un comportement individuel "héroïque" pour le changement mais doit accompagner le changement structurel.

Afin de commencer à mieux comprendre la relation qui existe entre évolution culturelle et conception d'IHM dans le cadre d'une transition vers la soutenabilité, cette recherche repose sur l'analyse de l'état de l'art par une approche historique ainsi que l'observation et l'analyse d'une situation d'interaction entre des étudiants engagés sur le sujet de la soutenabilité et l'IHM d'un outil d'ingénierie qu'ils utilisent, notamment dans le cadre de la mise en place d'une analyse de cycle de vie (ACV).

III. ROLE DE L'IHM DANS L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

Dans cette section, nous verrons si l'évolution de l'IHM des outils d'ACV a suivi la même dynamique que celle décrite par Rauterberg pour les autres outils numériques.

A. Approche historique

Les premiers développements de logiciels d'ACV sont apparus au tournant des années 70s et le premier programme informatique spécifique à l'ACV a été conçu en 1973 [17]. Il fonctionnait de cette manière : « Les données remplissaient plusieurs boîtes contenant plusieurs centaines de cartes perforées. Les informations contenues dans ces cartes devaient être chargées dans l'ordinateur à l'aide d'un chargeur mécanique chaque fois que nous voulions effectuer des calculs » [17]. Lorsqu'il y avait des erreurs, les cartes devaient être vérifiées à la main. Au milieu des années 90, Baumann décrit un usage d'un logiciel d'ACV qui nous permet de comprendre le type d'IHM présent : « l'analyste ACV a passé 2 semaines à étudier le concept d'ACV. Il a ensuite passé environ 2 mois à rechercher et à collecter des données. Après cela, il a passé environ 2 mois devant l'ordinateur. » Nous pouvons constater que le paradigme caractérisant l'IHM des logiciels d'ACV au début de leur développement correspondait au paradigme personnel, dans le sens où ces logiciels étaient manipulés par un spécialiste spécifique et que les outils offraient peu la capacité à mettre en réseau différentes personnes (peut-être à l'exception de l'expert et de l'équipe de développement logiciel de l'entreprise propriétaire du logiciel pour la correction de bug) ou de transmettre des informations implicites. En effet, l'outil informatique servait à la constitution des inputs-outputs de chaque processus.

[1] Grâce à [12], nous sommes en mesure de vous fournir une définition complète. La soutenabilité forte s'oppose à la soutenabilité faible. Ces approches ont une approche du "capital" car il existe 4 types de capital différents (naturel, physique, humain, social). Le paradigme de la soutenabilité faible est issu de la théorie néoclassique de la croissance économique. Dans ce paradigme, la nature est considérée comme substituable à d'autres types de capital. C'est la principale divergence avec le paradigme de soutenabilité forte dans lequel le capital naturel n'est pas substituable car la nature fournit 4 catégories différentes de fonctions (matériaux pour la production, assimilation des déchets, services d'agrément, soutien de base à la vie) qui sont la valeur première du bien-être humain.

A partir des années 1990 (1990 pour SimaPro, 1990 pour GaBi, 1998 pour EIME [18]) mais surtout au tournant des années 2000, les logiciels d'ACV sont devenus plus robustes, notamment grâce à un usage plus conséquent et un développement du nombre de logiciel sur le marché [19]. Cela a également permis une augmentation du nombre de fonctionnalités (modélisation des systèmes, visualisation des arbres de procédés, représentation des résultats, etc) développées.

La plupart des logiciels d'ACV sont ancrés dans un paradigme IHM personnel. Cependant, certains commencent à rentrer dans un paradigme coopératif par la possibilité d'utiliser un même projet d'ACV par plusieurs utilisateurs depuis des postes informatiques différents (mode multi-utilisateurs de SimaPro [20]).

Des logiciels sur le marché ou en cours de conception commencent à intégrer les aspects sociaux et culturels. En effet, pour les aspects sociaux, certains forums sont nés pour faire vivre la communauté ACV (forum ask.openlca.org permettant l'échange multimédia entre utilisateurs du logiciel).

Concernant les aspects culturels, des travaux menés par Borrion et ses collègues [21] nous montrent comment la co-construction des données au sein d'une communauté (de praticiens, d'une entreprise) est importante pour l'appropriation de la méthode d'ACV et la diffusion de la pensée en cycle de vie au sein de la communauté. Il semblerait que cette co-construction permettrait une appropriation des concepts portés par l'ACV. En effet nous pouvons lire dans l'article : « Le document démontre comment les outils d'ingénierie peuvent être développés et utilisés dans l'engagement communautaire pour concevoir des infrastructures communautaires plus durables et résilientes. ». Les chercheurs concluent sur le fait qu'« un engagement plus fort entre les communautés locales et les ingénieurs et concepteurs d'infrastructures peut permettre une coévolution positive des systèmes techniques et de la société en réponse au changement environnemental et climatique. » Ainsi, une approche différente de la conception en IHM permettrait un engagement différent de la communauté d'utilisateurs. Cet élément est l'une des caractéristiques trouvées dans la littérature concernant l'IHM soutenable (confiance dans le système II.2).

B. Étude préliminaire

1) Description de la situation et méthode utilisée

Cette section est axée sur l'observation d'une situation d'interaction. Cette observation constitue une étude préliminaire qui a besoin d'être complétée et consolidée par d'autres études. Cette étude sert ici comme point de départ pour d'autres expériences. Nous présentons cette observation comme première piste pour l'identification des éléments propices à une IHM soutenable. Autrement dit, l'objectif est de savoir comment il serait possible d'identifier les caractéristiques d'interaction attendues par une population fortement ancrée dans une culture soutenable. Le fait que le groupe observé se confronte aux mêmes éléments bloquants que ceux observés dans la littérature, nous permet de poser l'hypothèse selon laquelle cela constitue un élément nécessaire à des personnes ancrées dans une culture dite soutenable. Ces hypothèses doivent être testées, approfondies et précisées dans d'autres études.

Il s'agit de sélectionner un groupe d'individus de définir les caractéristiques des individus du groupe et d'observer l'IHM en termes d'adéquation avec un type de culture représenté par le groupe sélectionné.

Pour cela, des étudiants en master 2, acteurs de la transition écologique (fort ancrage, revendication de ce positionnement par des choix de parcours de formation par exemple et des propositions de modifications de formation pour l'intégration des enjeux environnementaux et sociaux dans les formations d'ingénierie) ont été observés dans la manipulation du logiciel openLCA (outil d'ACV). Ce moment d'observation correspondait à la première utilisation du logiciel par ce groupe (découverte).

Prendre des personnes qui sont en période d'apprentissage nous permet de voir les problèmes qui se posent très rapidement pour les personnes souhaitant utiliser un logiciel. Cela permet d'aborder ces problèmes car ils sont exprimés explicitement sous forme de questions aux enseignants. Leur compréhension de l'ACV en soi ne nous intéresse pas ici mais bien le type d'interaction entre le logiciel ACV et leur groupe de travail. Nous avons observé le groupe de 25 étudiants pendant 3 travaux dirigés de 2 heures chacun. Au cours de chaque session, nous avons noté les questions des étudiants sur les données, les informations sur l'ACV et leurs remarques sur le logiciel. De plus, suite à une analyse qualitative [22], nous avons fait un compte-rendu, suivi d'une micro-analyse, suivie d'un moment de codage.

2) Attentes formulées au niveau de l'IHM

Cette partie traite des attentes des élèves à l'égard du logiciel. Le tableau 2 présente les différentes remarques des élèves exprimées lorsqu'ils apprenaient à manipuler le logiciel openLCA. La situation de chaque citation est expliquée sur la même ligne. La récurrence des questions posées n'a pas été enregistrée au moment où l'observation a été faite (mais récurrence plutôt forte).

Nous pouvons identifier trois catégories différentes de problèmes :

- Problèmes relatifs aux données (situation n°1 et 2)
- Questions relatives à l'information (situation n°3 et 4)
- Questions relatives à la modélisation (situation n°5)

Deux éléments semblent assez étonnants : (1) les étudiants paraissaient déçus de constater qu'ils ne pouvaient pas représenter toute la complexité de leur produit par le biais du logiciel, (2) certains étudiants ont été surpris que toutes les données des bases de données ACV ne soient pas complètes et que parfois, ils aient dû choisir une donnée qui ne reflète pas la réalité exacte de leur produit. Cette attente de précision du logiciel et du système d'information autour du domaine de l'ACV révèle la confiance que ces étudiants ont dans les logiciels d'ingénierie. Cette attente est cohérente avec le méta-paradigme actuel défini par Hilbert [23] qui consiste à disposer de données et de connaissances facilement accessibles.

Il ne s'agit pas de dire qu'un logiciel d'ACV doit représenter la complexité d'un produit et avoir une multitude de données. Il s'agit de montrer les attentes d'étudiants face à un outil informatique.

N°	Situation	Citation des étudiants
1	Les étudiants cherchaient une donnée dans une base de données d'ACV pour compléter leur ACV.	« Nous ne trouvons pas les données correspondantes dans EcoInvent » ; « Il n'y a aucune donnée, même pas proche [de celle que vous recherchez], comment faites-vous ? »
2	Les étudiants cherchaient la bonne façon d'insérer des données dans leur modèle.	« Devrions-nous créer une nouvelle donnée ou devrions-nous en sélectionner une directement dans la base de données ? »
3	Les élèves ont essayé de reproduire une ACV à partir d'un rapport d'ACV trouvé sur Internet.	"Ce n'était pas précisé dans le rapport" ; "Nous manquons de cette information"
4	Les étudiants lisaient la description de chaque donnée et essayaient de comprendre si cette donnée était la plus proche de ce qu'ils recherchaient.	« L'information est là, mais nous ne la comprenons pas »
5	Les étudiants ont essayé de comprendre la logique de la modélisation en ACV ouverte.	« Comment modéliser la fin de vie ? » « Comment modéliser les processus de transport ? »

Tableau 2. CITATIONS D'ETUDIANTS APPRENANT A MANIER UN LOGICIEL D'ACV(SEPTEMBRE ET NOVEMBRE 2019)

3) Utiliser l'ACV dans un groupe projet

Cette partie traite de la difficulté de travailler en collaboration sur une analyse du cycle de vie. En effet, les étudiants ont dû travailler par groupes de 5 à 7 et tous ont dû comprendre la méthodologie de l'ACV et la façon dont le logiciel mettait en œuvre la méthodologie. Une difficulté des groupes projets concernaient l'impossibilité de travailler ensemble sur le même logiciel. Cette difficulté concerne le type d'IHM qui a été mis en œuvre dans openLCA. Il s'agit d'une interaction entre l'homme et l'ordinateur sans qu'aucune activité sociale ne soit nécessaire via l'interaction.

C. Autres limites

Certaines limites de cette première étude ont été posées au début de la section III. Le choix des étudiants a été fait uniquement sur la base de leur engagement dans une formation spécialisée. Cela devrait complété afin d'identifier s'il y a une récurrence entre une caractéristique culturelle spécifique et les problématiques d'interaction. Différents éléments culturels n'ont pas été référencés : niveau de compréhension de l'informatique, niveau de capacité à utiliser un logiciel informatique, ancrage territorial, origine sociale, type de formation suivie. Ces éléments pourraient avoir un impact plus important que la culture soutenable sur la manière d'interagir avec le logiciel. Ces éléments pourraient être répertoriés dans une future étude plus approfondie.

Cependant, l'ensemble de ces éléments d'analyse nous incite tout de même à formuler quelques propositions et envisager quelques perspectives de recherche.

IV. APPORTS POTENTIELS DE L'INFORMATIQUE CULTURELLE

A. Expertise et complexité

La complexité de la méthodologie ACV, la complexité de l'accès aux données, la complexité des données elles-mêmes (en termes de construction des données par les experts et de compréhension par les utilisateurs), ne permettent pas à openLCA d'être convivial (au sens d'Ivan Illich). De plus, openLCA porte une pratique plutôt solitaire (ou en petits groupes) de l'ACV, en partie à cause de cette complexité. openLCA ne facilite pas l'engagement d'une multitude de parties prenantes dans un processus d'évaluation environnementale (à l'instar des travaux de [21]).

B. Représentation du monde

L'ACV est un outil né dans un contexte de collaboration entre la recherche et l'industrie. L'idée du logiciel est de représenter les entrées - sorties significatives d'un système technique. Il semble que les acteurs dépendent de ce qui se passe dans le logiciel (accès aux données, mode de modélisation, production de résultats) pour agir dans la vie réelle. C'est une pratique qui existe depuis longtemps dans le monde industriel et qui fait partie de cette culture industrielle (par exemple, on retrouve cette même caractéristique dans les outils de type Product Life cycle Management). Cette pratique est potentiellement problématique car elle ne correspond pas aux pratiques et manifestations d'une culture de la soutenabilité. Comme l'a dit [16], "l'application n'est pas là où se trouve l'action" et il semble que le temps nécessaire pour mener une ACV (de 6 mois à 2 ans) par un prestataire extérieur peut être un moment d'arrêt dans l'engagement des parties prenantes de l'organisation car elles sont en attentes de résultats et sont peu « embarquées » dans le travail d'évaluation environnementales.

C. Futurs travaux

Nous souhaitons réaliser des tests « Think aloud » avec des personnes s'initiant à l'analyse de cycle de vie. Ces entretiens permettraient une expression des problèmes par les personnes en situation d'apprentissage. Cela permettrait d'avoir une vision complète des dimensions de la *présence* pendant l'exposition à une interaction [5].

Afin de comprendre la complexité de ce changement de paradigme (de l'individuel au culturel), nous prévoyons de tester l'utilisation d'un outil d'ingénierie (l'ACV) avec différents ensembles d'individus (à différents niveaux de soutenabilité) et d'identifier les éléments de l'IHM ancrées dans l'outil qui ne sont pas propices à une culture de la soutenabilité en termes de pratiques. De cette façon, la différence d'utilisation entre différents contextes soutenables peut être mesurée et des indications en termes de modification de l'outil peuvent peut-être être formulées afin d'asseoir une expérience culturelle qui serait jugée satisfaisante par cette population spécifique d'utilisateurs.

V. CONLUSIONS

Les travaux préliminaires développés dans ce papier montre que les IHM d'outils numériques utilisés en ingénierie ne sont pas toujours parfaitement adaptés à la culture de leurs utilisateurs, en particulier dans cette période de transition

numérique et écologique. Cette étude montre que les approches de l'informatique culturelle pourraient alimenter la conception des IHM des outils d'ingénierie pour les adapter à l'évolution de leurs utilisateurs.

VI. REMERCIEMENTS

« ACVnum : Analyse de cycle de vie et transition numérique » est cofinancé par l'Union européenne. L'Europe s'engage en Champagne-Ardenne avec le Programme Opérationnel FEDER/FSE/IEJ Champagne Ardenne 2014-2020 / Fonds européen de développement régional.

VII. REFERENCES

[1] T. Hewett *et al.*, 'ACM SIGCHI Curricula for Human-Computer Interaction', Jan. 1992, doi: 10.1145/2594128.

[2] J. C. Mankoff *et al.*, 'Environmental sustainability and interaction', in *CHI '07 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, Apr. 2007, pp. 2121–2124, doi: 10.1145/1240866.1240963.

[3] C. DiSalvo, P. Sengers, and H. Brynjarsdóttir, 'Mapping the landscape of sustainable HCI', in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, Apr. 2010, pp. 1975–1984, doi: 10.1145/1753326.1753625.

[4] A. Caraban, E. Karapanos, D. Gonçalves, and P. Campos, '23 Ways to Nudge: A Review of Technology-Mediated Nudging in Human-Computer Interaction', in *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, May 2019, pp. 1–15, doi: 10.1145/3290605.3300733.

[5] M. Rauterberg, 'From Personal to Cultural Computing: how to assess a cultural experience', p. 10.

[6] N. Tosa, S. Matsuoka, B. Ellis, H. Ueda, and R. Nakatsu, 'Cultural Computing with Context-Aware Application: ZENetic Computer', in *Entertainment Computing - ICEC 2005*, Berlin, Heidelberg, 2005, pp. 13–23, doi: 10.1007/11558651_2.

[7] S. Sharma, 'Proliferation of Social Computing: Cultural Computing Paradigm', *International Journal of Computer Applications*, vol. 137, p. 5.

[8] J. S. Gero and U. Kannengiesser, 'The situated function–behaviour–structure framework', *Design Studies*, vol. 25, no. 4, pp. 373–391, Jul. 2004, doi: 10.1016/j.destud.2003.10.010.

[9] R. Nakatsu, M. Rauterberg, and B. Salem, 'Forms and theories of communication: from multimedia to Kansei Mediation', *Multimedia Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 304–312, Mar. 2006, doi: 10.1007/s00530-005-0006-9.

[10] P. Dourish, *Where the Action is: The Foundations of Embodied Interaction*. MIT Press, 2004.

[11] J. Hawkes, *The Fourth Pillar of Sustainability: Culture's Essential Role in Public Planning*. Common Ground, 2001.

[12] S. Dietz and E. Neumayer, 'Weak and strong sustainability in the SEEA: Concepts and measurement', *Ecological Economics*, vol. 61, no. 4, pp. 617–626, Mar. 2007, doi: 10.1016/j.ecolecon.2006.09.007.

[13] R. K. Turner, D. Pearce, and I. Bateman, 'Environmental economics: an elementary introduction.', *Environmental economics: an elementary introduction.*, 1994, Accessed: Nov. 26, 2020. [Online]. Available: https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19931861592.

[14] J. S. Vandeventer, C. Cattaneo, and C. Zografos, 'A Degrowth Transition: Pathways for the Degrowth Niche to Replace the Capitalist-Growth Regime', *Ecological Economics*, vol. 156, pp. 272–286, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.ecolecon.2018.10.002.

[15] J. Norton, B. Penzenstadler, and B. Tomlinson, 'Implications of Grassroots Sustainable Agriculture Community Values on the Design of Information Systems', *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, vol. 3, no. CSCW, p. 34:1-34:22, Nov. 2019, doi: 10.1145/3359136.

[16] A.-M. S. Hansen, 'The App Is Not Where the Action Is: Discussing Features of an Internal Communication System for a Permaculture Village', in *Proceedings of the 7th International Conference on ICT for Sustainability*, New York, NY, USA, Jun. 2020, pp. 275–284, doi: 10.1145/3401335.3401824.

[17] R. G. Hunt, W. E. Franklin, and R. G. Hunt, 'LCA — How it came about', *Int. J. LCA*, vol. 1, no. 1, pp. 4–7, Mar. 1996, doi: 10.1007/BF02978624.

[18] L. Aissani, M. Pradel, and M. E. Mollaret, 'Comparaison de deux logiciels d'ACV GaBi 4 et Simapro 7.1.8', 2009. [Online]. Available: https://hal.inrae.fr/hal-02592567/document.

[19] N. Unger, P. Beigl, and G. Wassermann, 'General requirements for LCA software tools', p. 6.

[20] PRé Sustainability, 'Software Installation', *SimaPro Help Center*, Mar. 04, 2021. https://support.simapro.com/articles/Article/SimaPro-Installation (accessed Mar. 04, 2021).

[21] A. Borrion, J. Matsushita, K. Austen, C. Johnson, and S. Bell, 'Development of LCA Calculator to support community infrastructure co-design', *Int J Life Cycle Assess*, vol. 24, no. 7, pp. 1209–1221, Jul. 2019, doi: 10.1007/s11367-018-1492-2.

[22] C. Lejeune, *Manuel d'analyse qualitative*. De Boeck Superieur, 2019.

[23] M. Hilbert, 'Information Quantity', in *Encyclopedia of Big Data*, L. A. Schintler and C. L. McNeely, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 1–4.

Une approche générique du jumeau numérique pilotée par les usages

Nathalie Julien
Lab-STICC
17 Bd Flandres Dunkerque
Lorient – France
nathalie.julien@univ-ubs.fr

Eric Martin
Lab-STICC
17 Bd Flandres Dunkerque
Lorient – France
eric.martin@univ-ubs.fr

Résumé— Ces dernières années, les publications sur le jumeau numérique ont fortement augmenté sans véritable cohérence sur la définition même du terme ou de l'objet représenté car elles recouvrent souvent des réalités très différentes. La plupart du temps, les articles se focalisent soit sur les modèles, soit sur une application. Afin de donner un éclairage global à cette thématique, nous proposons non seulement une définition générique mais également une méthodologie de classification complète basée sur les usages. Notre approche permet ainsi d'intégrer les trois dimensions du jumeau numérique c'est-à-dire les modèles, les usages et les applications. De plus, une telle approche garantit de développer un jumeau numérique centré sur l'humain et son besoin. Nous donnons plusieurs exemples pour illustrer l'intérêt d'une telle classification pour déployer le jumeau numérique dans l'ensemble des applications industrielles.

Mots-clés— Jumeau numérique, Système de production intelligent, Industrie agile

I. INTRODUCTION

Le jumeau numérique est un concept récent qui suscite actuellement un certain engouement. De nombreuses publications donnent des définitions variées, parfois limitées à un domaine d'application, un type de modèle ou une technologie spécifique. En fait, le jumeau numérique est un objet polymorphe qui peut s'adapter aux usages et aux services. Ce papier se veut une aide pour la compréhension de la nature et des diverses formes du jumeau numérique afin d'appréhender l'ensemble de ses possibilités. Nous proposons à la fois une définition générique et une classification complète, basée sur les usages pour qualifier efficacement les architectures de différents jumeaux numériques afin d'en structurer le déploiement.

Nous allons tout d'abord présenter dans cette première partie un rapide aperçu de l'historique du concept de jumeau numérique et pourquoi une simple définition est insuffisante pour saisir l'ensemble de son potentiel. Puis nous aborderons dans la deuxième partie notre approche globale avec une définition générique. Par la suite, nous déclinerons notre méthodologie de classification selon trois axes faisant respectivement l'objet des parties suivantes : de la donnée au modèle, du modèle à l'usage, de l'usage à l'application. La partie VI illustrera notre approche avec un exemple simple de reconfiguration d'une ligne de production, avant de conclure.

A. Les origines du concept

Depuis longtemps la NASA utilise des doubles physiques pour simuler au sol les missions spatiales. Cependant, ce n'est qu'en 2003 que M. Grieves a introduit la notion de jumeau numérique (*Digital Twin*) comme la représentation numérique d'un objet contenant toutes les informations de sa contrepartie physique. Si le concept était séduisant, il a fallu attendre l'augmentation des moyens de calcul et la mise à disposition des technologies numériques pour le rendre faisable et abordable. C'est d'abord dans le domaine aérospatial qu'il s'est développé et une publication commune de la NASA et de l'US Air Force en 2010 affirmait que le jumeau numérique était une technologie clé.

À partir de 2014, l'émergence de l'industrie du futur ou *Smart Factory* ainsi que la mise à disposition de nouvelles technologies telles que l'IioT, l'intelligence artificielle, le *Cloud computing…* ont rendu la réalisation d'une représentation virtuelle temps réel non seulement possible mais également abordable pour tous les secteurs d'activité. En parallèle, les usages du jumeau numérique se sont étendus de la simulation à l'optimisation, la prédiction et l'aide à la décision. Grieves a alors étendu son concept du jumeau numérique à un modèle virtuel dynamique pour tous les domaines de l'industrie [1]. À partir de 2017, le jumeau numérique est référencé chaque année comme une des 10 technologies clés pour les 10 années prochaines. On assiste depuis lors à un véritable engouement pour ce concept avec une inflation des communications, tant dans le domaine industriel que de la part des académiques.

B. Une profusion de définitions

D'après [2], le nombre de publications comportant le terme de jumeau numérique (*Digital Twin*) triple chaque année depuis 2016, 55% des articles de recherche se focalisent sur la seule définition du terme et 26% décrivent un cas d'usage. Il y a donc très peu d'informations sur comment déployer effectivement un jumeau numérique.

De plus, 35% des publications employant le terme de jumeau numérique présentent en fait des modèles numériques et de la simulation et seulement 18% concernent un 'vrai' jumeau numérique. La plupart des articles portent sur la simulation et le pilotage de la production ; cependant, depuis

2018 on voit apparaître des applications à la maintenance prédictive. Enfin, comme le souligne [3], il y a clairement un manque de coordination entre les communautés industrielles et académiques sur le périmètre réel du jumeau numérique.

C. Des objets très variés

Pour la plupart des auteurs, le jumeau numérique est une représentation virtuelle d'un objet physique. En fait, cette limitation est sans fondement puisque le jumeau numérique peut exister avant la production de l'objet, par exemple pour optimiser sa conception, et survivre après la fin de vie de l'objet, comme données et modèles pouvant approvisionner un autre jumeau. Ainsi, l'objet virtualisé par le jumeau numérique peut être physique ou non et peut être un produit, un composant, un équipement, un processus, un système, un service, un être humain ou un système de système.

Évidemment, les données manipulées par le jumeau numérique dépendent directement de l'objet concerné et de sa granularité puisqu'il peut aussi bien s'agir d'un nanomatériau, d'une réaction chimique, d'une pompe, d'une ligne de production, d'une usine, d'une chaîne logistique, ou d'une ville entière. De plus, un même objet peut avoir plusieurs jumeaux ou plusieurs versions de son jumeau, selon son usage, puisque le jumeau interagit avec différents acteurs, qu'ils soient humains ou systèmes. Par exemple, un constructeur automobile peut fournir une version client du jumeau de son produit tout en conservant une version plus détaillée pour ses besoins.

II. VERS UNE VISION INTEGREE

Les nombreuses définitions varient en fonction du service, de la granularité, du domaine d'application, des aspects techniques et des acteurs [4-5]. Le jumeau numérique est trop souvent limité à un modèle de simulation avec une forme définie. Cependant, les véritables défis et opportunités du jumeau numérique sont d'identifier et de gérer les données tout au long de la vie de l'objet représenté, créer des modèles de simulation dans les divers systèmes d'information, gérer l'important volume de données en garantissant leur cohérence et leur sécurité tout en étant transparent pour les différents utilisateurs [6-8].

A. Maturité numérique

Il y a souvent confusion entre le jumeau numérique (*Digital Twin*), le miroir numérique (*Digital Miror*) et l'ombre numérique (*Digital Shadow*). Afin d'éclaircir le périmètre de chacun de ces termes, nous pouvons tout d'abord classer ces différentes représentations virtuelles en fonction de leur maturité comme représenté sur la Figure 1.

La première étape de la virtualisation est le miroir digital qui consiste en un ensemble de modèles mathématiques représentant un objet physique et son comportement, comme la simulation 3D. Cependant, dans ce cas, il n'y a pas de communication directe entre les parties physiques et numériques, toutes les informations transitent par l'usager.

L'ombre numérique représente toute l'activité digitale de l'objet et permet une représentation dynamique grâce à un flux unidirectionnel qui permet de suivre les variations de l'objet physique.

Le jumeau numérique représente le stade le plus évolué des représentations virtuelles en permettant une fusion des parties physique et numérique en ce que l'on appelle le système cyber-physique. Une communication temps réel entre les deux parties par le flux digital bidirectionnel permet non seulement à la partie numérique de suivre l'évolution de sa contrepartie physique mais également d'agir sur elle, partiellement ou totalement.

Par la suite, ce jumeau numérique peut évoluer un jumeau cognitif si on lui ajoute des capacités de prédiction et, avec encore plus de capacité de décision et de contrôle sur son objet physique, en jumeau autonome.

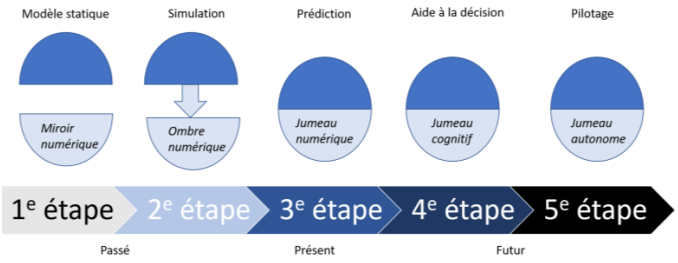


Figure 1. REPRESENTATION DE LA MATURITE NUMERIQUE

B. Un modèle vivant

Le jumeau numérique est donc souvent qualifié de modèle vivant car il évolue avec sa contrepartie physique et son environnement tout au long de la vie de l'objet considéré (et au-delà) et il peut également agir dessus. Il est base sur un nombre important de données temps réel qui retracent le comportement passé et actuel de l'objet afin d'optimiser ses performances.

Le jumeau numérique peut donc être défini comme une représentation virtuelle dynamique d'un objet, physique ou non, comme un produit, un système ou un process. Cette représentation est enrichie et évolue en même temps que l'objet grâce à un flux digital temps réel (Digital Thread). Le jumeau numérique est accessible de multiples endroits, avec des configurations ou des versions différentes tout en garantissant la cohérence et l'intégrité des données.

Si on considère le système cyber-physique représenté sur la Figure 2, le jumeau numérique est composé de toutes les parties ajoutées à l'objet physique initial, ce qui inclut :

- Les capteurs et les IioT qui collectent les données,
- Les communications temps réel entre les espaces physiques et virtuels,
- L'ombre numérique de l'objet représentant la trace digitale de son activité,
- L'architecture du jumeau qui est l'organisation des données et des modèles en un flux digital (incluant les outils d'analyse et de traitement des données et les algorithmes d'intelligence artificielle),,

- Toutes les interfaces entre humain et système (IHM).

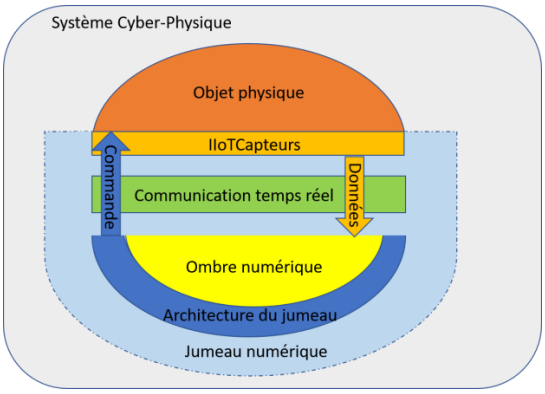


Figure 2. SYSTEME CYBER-PHYSIQUE

C. *Notre définition générique*

Notre définition, comme représenté sur la Figure 3, repose sur trois dimensions : les données et modèles, les usages et les applications. Car le jumeau numérique n'est pas uniquement une collection de données et de modèles mais bel et bien une organisation des données en information et méta-information permettant de combiner les modèles afin de fournir les usages requis pour l'application ciblée. Comme les services requis évoluent tout au long de la vie de l'objet (conception, production, exploitation, maintenance), les propriétés du jumeau numérique doivent également évoluer.

Les données et les modèles sont fournis soit par l'espace réel (capteurs, IioT, IHM) ou par l'espace virtuel (base de données, MES, ERP…).

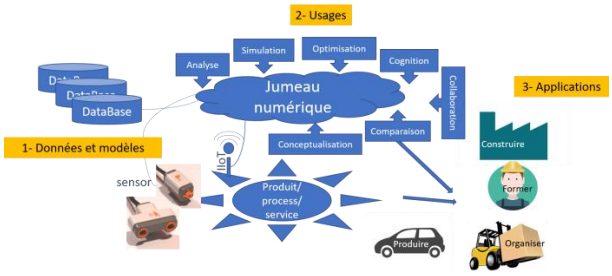


Figure 3. REPRESENTATION GENERIQUE

En conformité avec la définition élargie de Grieves [1], nous avons 7 usages :

- L'analyse : pour le contrôle, le pilotage, la régulation…,
- La simulation : pour la conception, l'amélioration des performances, le management…,
- L'optimisation : pour un produit, un process, un poste de travail…,
- La cognition : pour prédire les situations futures ou les risques,
- La collaboration : avec un humain, un système, d'autres jumeaux numériques ou d'autres usines…,
- La comparison : entre une situation prédite et actuelle ou une situation mesurée et souhaitée, afin de faire de l'aide à la décision et de l'adaptation,
- La conceptualisation : transposition d'une information visuelle en information symbolique pour communiquer avec les humains.

Les applications représentent le service final délivré par le jumeau numérique aux différents utilisateurs comme la conception de produit, la formation d'opérateur, la maintenance prédictive…

En plus de la définition générique donnée précédemment, on reconnaît un jumeau numérique aux caractéristiques suivantes :

- Un flux digital continu entre les espaces réel et virtuel,
- La capacité de gérer les données pertinentes, fiables et sécurisées avec une précision suffisante,
- Une architecture permettant une évolution permanente et une amélioration des modèles en ligne et hors ligne,
- Un contrôle partiel ou total sur l'objet représenté,
- Une capacité d'apprentissage,
- Une capacité de prédiction dans un délai compatible avec l'aide à la décision.

III. DE LA DONNEE AU MODELE

Les données sont les éléments de base qui nourrissent de façon continue le jumeau numérique. Elles proviennent de sources très variées et se présentent sous des formes hétérogènes. Ce jeu de données et leur utilisation constitue le patrimoine digital comme représenté sur la Figure 4.

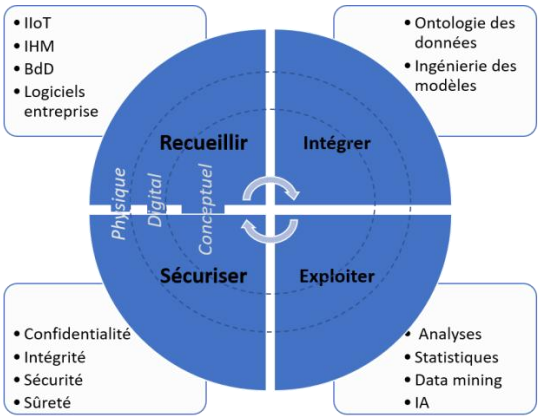


Figure 4. PATRIMOINE DIGITAL

La première étape consiste à définir l'architecture du jumeau numérique et développer une bibliothèque digitale en collectant l'ensemble des données et modèles existants. Ces données seront intégrées en modèles interopérables élaborés et

validés afin d'être exploités ensuite par les outils statistiques et les algorithmes d'intelligence artificielle. Bien sûr, à chaque étape, les échanges de données devront être sécurisés.

Les sources de données physiques sont issues des capteurs déployés par IioT ou les données de contrôle ainsi que les informations recueillies par les IHM en provenance des utilisateurs, comme les opérateurs ou les responsables. On peut ainsi trouver des données relatives à l'objet et son usage comme l'activité, les performances, les matériaux mais aussi des donnes contextuelles comme les conditions opérationnelles ou environnementales.

	Data/Models	Applications
Design	Données PLM Prédiction comportementale Dessins de conception 3D Opérations de fabrication KPI management Données environnementales Données contextuelles Modèles physiques	Planification de la production Prototypage virtuel Optimisation de la conception Implantation d'une ligne Ergonomie des postes Mise en sécurité
Production	Données PLM Instructions de fabrication Données fabrication **KPI opérationnels** **Scénarios de fonctionnement**	Pilotage de la production Amélioration de la performance Formation des opérateurs **Reconfiguration d'une ligne**
Exploitation	Données opérationnelles Données environnementales Modèle comportemental Scénarios adaptatifs	Surveillance Gestion de l'énergie Auto-adaptation
Maintenance	Diagnostics Modèles physiques KPI état équipement Rapports d'intervention Historique des pannes Pièces outillages Règles et procédures Analyse des causes	Gestion de la fiabilité Durée de vie prévisionnelle Détection d'anomalies Aide à l'intervention Auto-diagnostic Auto-réparation

Tableau 1. DONNEES RELATIVES AUX APPLICATIONS

Les sources de données numériques sont nombreuses. Le jumeau numérique utilise l'ombre numérique de l'objet mais aussi toutes les données issues de l'espace virtuel ou de la fusion des deux espaces. Ces données peuvent donc provenir des différentes bases de données, des divers logiciels de l'entreprise (CRM, ERP, MES…) mais aussi des résultats des traitements effectués sur les données comme les outils de fouille de données ou d'intelligence artificielle, tout autant que les informations issues d'autres jumeaux numériques, passés ou actuels. Des informations complémentaires sur les données et les modèles sont disponibles dans [9]. Le Tableau 1 propose des exemples de données et modèles relatifs aux différentes applications.

Un défi important concernant cette étape est de ne retenir que les données et modèles utiles et nécessaires pour l'usage visé. Une autre difficulté est de garantir la cohérence des données ; l'usage de modèles standardisés comme par exemple en utilisant la référence RAMI 4.0 peut être une structuration précieuse pour développer des modèles interopérables.

IV. DU MODELE A L'USAGE

La Figure 5 montre la hiérarchie des usages basée sur les modèles. Les données collectées sont tout d'abord utilisées pour l'analyse et la simulation. La contribution majeure du jumeau numérique à ce niveau est la visibilité et la traçabilité des produits et des process. Ensuite, ces résultats combines avec des algorithmes d'intelligence artificielle vont permettre le développement d'optimisations et de prédictions, ce qui va aboutir à l'évolution des modèles du jumeau vers plus d'anticipation. Finalement, le jumeau va évoluer vers plus d'autonomie à travers de la coopération avec son environnement physique et virtuel ; cela permettra de développer des environnements immersifs pour l'aide à la décision.

A. Le jumeau de contrôle

Le jumeau est une plateforme qui collecte toutes les données et informations sur l'objet afin de permettre aux différents acteurs de comprendre son état et son comportement. Il permet la visibilité des opérations et du système interconnecté qu'est l'usine. Une fois la surveillance implémentée grâce à l'analyse, la simulation peut être mise en œuvre, par exemple grâce à un environnement 3D.

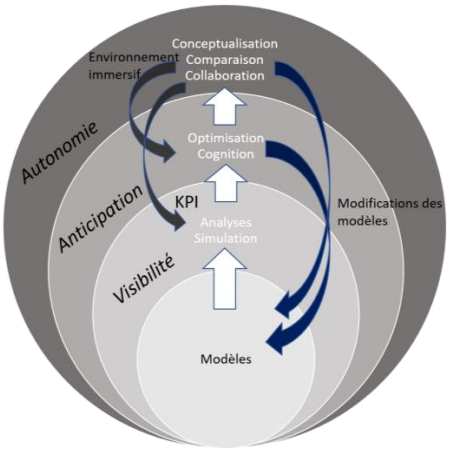


Figure 5. HIERARCHIE DES USAGES

On peut accéder non seulement à la vue de l'objet physique mais également savoir comment il a été conçu, produit et entretenu ; les mises à jour se font instantanément.

B. Le jumeau cognitif

Le jumeau numérique contient toutes les informations temps réel relatives au produit, au process ou à la chaîne logistique, ce qui fait que différents choix peuvent être testés afin d'ajuster, d'adapter et d'améliorer les différentes opérations. En ajoutant des outils d'analyse, d'intelligence artificielle et des modèles prédictifs à ces optimisations, le jumeau peut prédire, prendre des décisions et s'auto-adapter.

C. Le jumeau collaboratif

Le jumeau numérique peut faire correspondre une information visuelle à une information symbolique pour communiquer plus efficacement avec les humains. Avec des représentations graphiques, il devient plus aisé de détecter les problèmes en superposant espace physique et espace virtuel. Cette comparaison constante des deux espaces permet des ajustements et des améliorations. Une plateforme commune permet de généraliser la collaboration afin de valider des solutions plus rapidement, de capitaliser les savoir-faire et d'être plus efficace dans la résolution de problèmes.

II. DE L'USAGE A L'APPLICATION

Si la plupart des applications actuelles du jumeau numérique sont centrées sur le pilotage de la production et la maintenance prédictive, son développement va conduire à le faire intervenir dans plus de fonctions de l'entreprise.

À un niveau stratégique, il est important de cibler au préalable le champ d'applications relatif aux différentes évolutions du système de fabrication intelligent ou *Smart Manufacturing System* (SMS) tel que défini dans [10]. Cela permet alors de définir les applications à développer, comme illustré sur le Tableau 2.

SMS	Applications
Lean	M2M
Flexible	Reconfiguration de ligne
Durable	Ordonnancement faible consommation
Digital	Prototypage virtuel
Cloud	Cybersécurité industrielle
Intelligent	Maintenance prédictive
Holonique	Formation par réalité virtuelle IHM écologiques
Agile	Auto-reconfiguration

Tableau 2. EXEMPLES D'APPLICATIONS

Le *Lean Manufacturing* se concentre sur l'excellence opérationnelle en améliorant la performance et en éliminant tous les types de pertes. La communication M2M (Machine-to-machine) est un modèle dans lequel le flot de données est directement conditionné par les actions des machines.

L'objectif de la fabrication flexible est de développer l'interopérabilité et la modularité ; la reconfiguration automatique de la ligne de production permet la variabilité en volume, process et types.

La fabrication durable est un enjeu majeur ; l'optimisation de l'ordonnancement permet, selon le modèle MESA, d'optimiser la consommation énergétique d'une ligne ou d'une usine.

La fabrication digitale concerne notamment la gestion du cycle de vie du produit ; le prototypage virtuel permet d'analyser les performances de différentes solutions.

Dans le cas du *Cloud Manufacturing*, comme les données sont décentralisées, la cybersécurité industrielle est une condition indispensable pour garantir la continuité de service et l'intégrité des données.

La fabrication intelligente concerne l'implémentation d'intelligence artificielle dont une application la plus courante est la maintenance prédictive.

La fabrication holonique se concentre sur l'interaction et la coopération humain-système, où on retrouve les IHM écologiques ainsi que les solutions de réalité augmentée ou de réalité virtuelle.

La fabrication agile se définit par la capacité à adapter la production à un nouveau produit ou un nouveau process. L'auto-reconfiguration est une réponse efficace pour ajuster le planning de production.

Ces champs d'application peuvent ensuite être reliés aux usages nécessaires, comme indiqué dans le Tableau 3 afin de déterminer le niveau de maturité requis pour le jumeau numérique. Il est souhaitable d'adopter une approche progressive en se limitant tout d'abord aux aspects analyse et simulation avant d'intégrer les outils d'intelligence artificielle avec l'optimisation et la cognition ; on pourra alors construire les usages de conceptualisation, comparaison et collaboration en développant les IHM adaptées.

SMS	Analyse	Simulation	Optimisation	Cognition	Conceptualisation	Comparaison	Collaboration
Lean	X		X				
Flexible		X	X				
Durable	X	X	X			X	
Digital		X	X				
Cloud	X		X	X			
Intelligent	X			X	X		
Holonique	X			X	X		X
Agile			X	X	X		X

Tableau 3. LES USAGES RELATIFS AU SMS

Les données et les modèles correspondant aux usages et applications pourront alors être définis comme par exemple indiqué dans le Tableau 4.

III. EXEMPLE

Une ligne de production est représentée en Figure 6 ; elle est composée de deux machines connectées par un convoyeur qui forme le flux principal ; un AGV peut être utilisé au besoin comme flux optionnel. Appliquer l'auto-reconfiguration, comme indiqué sur le Tableau 4, nécessite à la fois la simulation et l'optimisation. L'architecture de la ligne peut être décrite en modèle RAMI 4.0 par 4 composants et leurs interactions. Les premières données sont les indicateurs KPI qui proviennent du logiciel MES en indiquant le taux d'activité de chaque équipement. À partir de là, on peut décrire deux scénarios adaptatifs pour la ligne. Le premier stipule que si le convoyeur ne fonctionne plus, son KPI est égal à 0, l'AGV est alors automatiquement active pour gérer le flux entre les machines. L'autre possibilité est de régler la

cadence des deux machines ; si l'activité de la machine 2 est de 80%, alors la machine 1 s'adapte à cette cadence pour éviter les goulets d'étranglement.

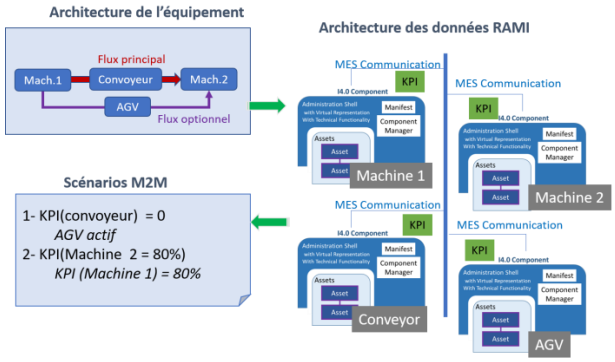


Figure 6. RECONFIGURATION DYNAMIQUE D'UNE LIGNE

IV. CONCLUSION

Le jumeau numérique est un concept récent comportant de nombreuses définitions, formes et applications. Mais ce n'est pas seulement une idée prometteuse : il a déjà été déployé dans diverses situations. Afin de clarifier ce concept complexe, nous proposons non seulement une définition générique mais également des caractéristiques permettant de le qualifier ainsi qu'une classification basée sur les usages. Une telle approche permet de développer une méthodologie de déploiement pour l'ensemble des applications industrielles. Elle assure également une vision centrée sur l'humain, afin de développer un jumeau numérique modulaire à l'aide de modèles standardisés.

V. REFERENCES

[1] M. GRIEVES. " Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication ", Digital Twin White Paper, 2014.

[2] F. TAO, M. ZHANG, et al. "Digital Twin Driven Smart Manufacturing", Academic Press, Elsevier, 2019.

[3] C. BARBIERI, S. WEST, et all. "Are practitioners and literature aligned about digital twin?", 26th EurOMA Conference Operations Adding Value to Society, Helsinki, Finland, 2019.

[4] S. BOSCHERT, C. HEINRICH et al. "Next Generation Digital Twin", Proceedings of TMCE 2018, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 2018.

[5] K. KRITZINGER, M. KRAMER, et al." Digital Twin in Manufacturing: A categorical literature review and classification", IFAC PapersOnLine, 51-11 1016–1022, 2018.

[6] Y. LU, C. LIU, et al. "Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues", Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 61 101837, 2020.

[7] E. NEGRI, L. FUMAGALLI, et al. "A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems",27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, 27-30 June 2017, Modena, Italy, 2017.

[8] J.F. UHLENKAMP, K. HRIBERNIK, et al. "Twin Applications - A first systemization of their dimensions", IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation ICE/ITMC19, 2019

[9] N. JULIEN, E. MARTIN. "Le jumeau numérique, de l'intelligence artificielle à l'industrie agile", Dunod, France, 2020.

[10] Y. LU, K.C. MORRIS, et al. "Current Standards Landscape for Smart Manufacturing Systems", NIST Report, NISTIR 8107, 2017.

Applications	Usages	Modèles	Données	IHM
Formation d'opérateur	Analyse Conceptualisation Comparaison	Environnement 2D Modèles comportementaux	Scénario d'assemblage Instructions	Environnement de réalité virtuelle Casque et gants de réalité virtuelle
Aide au diagnostic	Analyse Conceptualisation Cognition Collaboration	Modèles 3D Modèles cognitifs	Données techniques État des capteurs Historique des pannes Expertise Diagnostic de panne	Lunettes de réalité virtuelle Expert à distance Connexion Tablette
Reconfiguration de ligne	Simulation Optimisation	Architecture de l'équipement Modèles RAMI de l'équipement	KPI du MES Scénarios adaptatifs	Écran

Tableau 4. APPLICATIONS ET USAGES RELATIFS AUX DONNEES ET MODELES

Conception et évaluation d'un jumeau numérique pour l'évaluation de la motrice fine de patients atteints de troubles neuromusculaires

Application à l'échelle d'évluation de la MFM

Adriana Gomes Losboa de Souza
Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, G-SCOP, 38000 Grenoble, France
* Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes
Grenoble – France
anairdasouza@yahoo.com.br

Guillaume Thomann
Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, G-SCOP, 38000 Grenoble, France
* Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes
Grenoble – France
guillaume.thomann@grenoble-inp.fr

Résumé— La surveillance précise et régulière de la progression des Maladies Neuro Musculaire est très importante pour évaluer l'efficacité du traitement médicamenteux. Dans la pratique, elle peut être réalisée par des échelles d'évaluation telle que la Mesure de la Fonction Motrice (MFM). Il a toutefois été prouvé l'existence de variabilité inter et intra évaluateurs lors de l'utilisation de cette échelle. La proposition de concevoir et d'évaluer un jumeau numérique sur tablette a pour but de la diminuer en accompagnant le kinésithérapeute dans sa cotation. Deux études seront réalisées pour évaluer les trois interfaces numériques développées à partir des supports conventionnels. La première étude consiste à comparer les valeurs des cotations entre des patients effectuant l'évaluation d'une part de manière conventionnelle et d'autre part sur tablette. La seconde étude permettra d'évaluer le paramétrage mathématique effectué (logiciel TabMe2) en comparant les propositions de cotations des kinésithérapeutes avec celles effectués automatiquement par TabMe2 sur les tracés d'un même patient. Il sera conclu d'une part que l'influence du support sur les résultats du test est très faible et d'autre part que les scores donnés automatiquement par le logiciel TabMe2 sont très similaires aux scores donnés par les kinésithérapeutes, pour deux des trois items paramétrés.

Mots-clés— jumeau numérique, tablette, échelle d'évaluation, motrice fine, évaluation automatique

I. INTRODUCTION

Cet article traite de la conception d'une application numérique sur tablette pour assister l'évaluation, par les kinésithérapeutes, de la motricité fine chez les patients atteints d'amyotrophie spinale infantile (ASI).

La motricité fine consiste à mobiliser des compétences localisées pour effectuer des tâches qui nécessitent maîtrise et dextérité. Son acquisition se produit généralement en parallèle avec le développement cognitif et dans une séquence de contrôle partant des grands groupes musculaires vers les plus petits, en association avec le feedback visuel [1][2]. Après l'acquisition de la motricité fine, son amélioration se réalise par la répétition des activités et par l'entrainement de l'individu.

La perte de motricité est un symptôme commun chez les patients avec déficiences neurologiques chez qui la perte des capacités de marcher et de s'asseoir est observée en premier. Dans les cas des maladies neuromusculaires (MNM), où la faiblesse musculaire et l'atrophie sont assez variées, la motricité fine est en général la dernière fonction perdue.

Dans le domaine des MNMs, plusieurs méthodes d'évaluations peuvent être adoptées pour évaluer la force et la fonctionnalité motrice des patients. Les tests musculaires manuels constituent la méthode la plus simple pour évaluer la force d'un muscle ou d'un groupe musculaire. Il consiste à évaluer la force qui est développée par le patient lors de l'exécution d'un mouvement contre une résistance produite par l'évaluateur. Le niveau de force est alors coté sur une certaine échelle. La plus utilisé est la MRC (Medical Research Council) dont les scores varient entre 0 - pas de contraction musculaire visible et 5 - force normale [3][4][5]. Son avantage est son faible coût, mais les inconvénients sont son manque de sensibilité et de reproductibilité inter-examinateur [6].

Parmi toutes les échelles développées pour réaliser des évaluations neuromusculaires et fonctionnelles, la MFM (Mesure de la Fonction Motrice) a été validée pour évaluer la gravité du déficit moteur sur les principales MNMs [7]. C'est cette échelle fonctionnelle, validée et pratiquée à l'international, que nous allons utiliser dans ce présent projet de recherche. Elle a été développée pour évaluer l'impact des progressions de la maladie sur les extrémités distales. Elle comporte des items dédiés aux membres supérieurs et inférieurs. Chaque item est évalué sur une échelle de 0 - ne peut réaliser la tâche ou la position de départ ne peut être tenue à 3 - réalise complètement, "normalement" l'exercice, le mouvement étant contrôlé, maîtrisé, dirigé et réalisé à vitesse constante. Sur les 32 items que comporte cette échelle, les items 17 à 22 sont ainsi dédiés à l'évaluation la motricité de la main (Tableau 1).

Items	Tâches
17	Prend successivement des pièces et en stock 10 pièces dans une main en 20 secondes.
18	Fait le tour du CD avec le doigt.
19	Prend le crayon puis dessine une série continue de boucles dans le cadre.
20	Déchire une feuille pliée en 4, en commençant par le pli.
21	Prend la balle, la soulève, puis retourne la main complètement en tenant la balle.
22	Soulève le doigt puis pose-le successivement sur les 8 dessins de la figure sans toucher le quadrillage.

Tableau 1. ITEMS DE LA MFM DEDIES A L'EVALUATION DE LA MOTRICITE FINE

Malgré des sessions standardisées d'entrainement à la MFM pour les kinésithérapeutes, il persiste une variabilité intra et inter individuelle dans les résultats de cotation des items de la MFM, dépendant principalement de l'évaluateur et de ses qualités intrinsèques de cotateur. Ainsi la formation, l'expérience, l'humeur ou la motivation du thérapeute par exemple sont autant de facteurs difficilement contrôlables ayant des conséquences sur la cotation et sur la mesure. La fatigue, la lassitude ou la motivation du patient peuvent eux aussi affecter les résultats de l'évaluation. Cette situation est à l'origine de ce projet de recherche dont l'objectif est de proposer un outil d'évaluation, précis, reproductible et ludique de la fonction motrice, basé sur l'échelle de la MFM.

La présente recherche vise à proposer et à évaluer un outil pour aider le kinésithérapeute à évaluer la perte de la motricité fine, réduisant les variabilités définies précédemment. Pour cela, il est important de pouvoir capter, enregistrer et analyser les mouvements de motricité fine du patient, dans le but de réaliser des mesures précises pour son diagnostic et son suivi.

II. TECHNOLOGIES POUR LE SUIVI DES MOUVEMENT DE LA MAIN

Les technologies spécifiques telles que les dispositifs de détection magnétique ou électromécanique, des gants et les marqueurs colorés sont largement explorés dans la recherche impliquant le suivi de la main. Les gants de données sont les outils les plus efficaces pour capturer le mouvement de la main, ils fournissent les données de mouvements les plus fiables [8][9]. Il s'agit des gants équipés de capteurs angulaires haute précision permettant de retranscrire l'ensemble des mouvements de la main et des doigts. Malgré la grande précision des données, ils peuvent gêner le mouvement naturel de la main (surtout pour des sujets déjà faibles musculairement) et leur utilisation nécessite des procédures d'étalonnage et de configuration complexe pour obtenir des mesures précises. De plus, si leur utilisation n'est qu'occasionnelle, son coût très onéreux constitue un inconvénient supplémentaire.

Avec l'arrivée récente des capteurs infrarouges 3D (sans marqueurs), de nouveaux capteurs peuvent reconnaître les gestes corporels, permettant une nouvelle forme d'interaction, plus naturelle et intuitive que les solutions précédentes. La Kinect, globalement très efficace pour le suivi les mouvements du corps humain, peut reconnaître les expressions faciales, mais a pour le moment des limites importantes pour suivre les variétés de gestes des mains. Pour les applications qui nécessitent de la reconnaissance du mouvement des mains, le Leap Motion est plus adapté. C'est un dispositif périphérique USB, conçu pour reconnaitre les mouvements des mains pour la réalité virtuelle (Figure 1).



Figure 1. SUIVI DES MAINS PAR LE LEAP MOTION ; SOURCE : LEAP MOTION CONTROLLER

Dans le domaine de la santé, le Leap Motion peut être utilisé pour la rééducation à domicile de la paume ou du doigt [10][11]. Cependant, pour une mesure et une détection correcte de la main avec cet appareil, les doigts de la main doivent être visibles et suffisamment séparés. Les deux mains ne doivent pas être en contact et la posture de la main "poignet cassé" n'est pas recommandée [12][13]. La main doit toujours effectuer des mouvements larges et fluides, dans un espace bien délimité et les mains doivent être positionnées en permanence entre 15 et 25 cm au-dessus du capteur. Ces paramètres ont été étudié lors d'un travail de recherche précédent et il a été validé que les limitations étaient trop importantes pour pouvoir utiliser le Leap Motion avec les patients avec MNMs.

Une autre catégorie de systèmes, basée sur la détection tactile, peut être envisagée pour les items de la MFM concernées par l'évaluation de la motricité fine et qui nécessite des contacts (items 18, 19 et 22 du Tableau 1). La technologie tablette (Figure 2) est arrivée en masse au début des années 2010, notamment avec le lancement du célèbre iPad d'Apple.



Figure 2. DETECTION TACTILE PAR LA TABLETTE ; SOURCE : ÉCRAN MULTITOUCH - WIKIPEDIA.

Elle a été largement acceptée par le public et a été introduite pour plusieurs applications dans les environnements les plus divers : école, bureau, industrie, loisirs et autres. La tablette a démontré un grand potentiel d'applications dans les domaines de la santé et de la réhabilitation [14][15]. La grande force de cette technologie est sa portabilité.

L'interface d'utilisateur construite autour d'un écran permet l'entraînement de la force, la coordination et la mobilité des doigts et des mains par des actions consistant à glisser, tapoter et écrire, chez les patients présentant des séquelles d'AVC [16]. La tablette permet également d'analyser la dextérité, par la réalisation de mouvements fins, de dessins et d'écritures réalisées à l'écran, en tenant compte de paramètres tels que le temps, la vitesse et l'accélération [17].

La tablette peut être considérée comme un ordinateur avec des plateformes ouvertes, ce qui permet le développement d'applications en mettant l'accent sur les besoins des utilisateurs. Des exemples typiques sont des jeux développés

spécifiquement pour la rééducation, qui favorisent l'attribution de thérapies avec des tâches plus motivantes et spécifiques aux besoins et aux intérêts des patients. Les jeux sérieux peuvent également augmenter le niveau d'implication et d'engagement du patient, augmentant encore l'efficacité du traitement [18].

III. Methodes et materiels pour l'evaluation du jumeau numerique

A. *Etape1 : évaluation des nouvelles interfaces numériques développées*

Le terme de jumeaux numérique est utilisé ici pour nommer la reproduction en version numérique, des items papier standard utilisés dans la MFM. L'objectif de cette étape est de valider la pertinence des items numérisés proposés. Pour cela, des passations sur les supports conventionnels et sur tablette sont effectuées et évaluées par le kinésithérapeute. Les niveaux de cotations obtenus seront comparés en fonction du type de support, et pour les trois items sélectionnés. 37 patients, enfants et adultes, de 5 à 60 ans, porteurs d'une MNM reconnue et ayant une évaluation MFM prévue dans leur suivi habituel sont inclus dans cette étude. Le patient et/ou le tuteur légal du patient doivent/doit être favorable(s) pour participer à l'étude.

Au cours de l'évaluation MFM proposée, les patients devaient effectuer les items 18, 19 et 22 deux fois : une fois de manière conventionnelle et une fois en utilisant la tablette et le stylet. L'ordre d'exécution entre le support papier et le support de la tablette numérique a été fait de manière aléatoire. Les tracés des dessins correspondant aux touchers des doigts des patients ont été enregistrés en PDF sur la tablette. Les thérapeutes qui faisaient partie de l'étude ont été informés du protocole expérimental et formés sur l'utilisation de la tablette.

Le critère de jugement est la comparaison des cotations données par le kinésithérapeute lors des évaluations conventionnelles avec les évaluations données suite à l'utilisation des interfaces tablette pour les items 18, 19 et 22 de la MFM. Les données ont été analysées à l'aide du logiciel statistique SPSS Statistics (IBM SPSS 2.0).

Le test de Wilcoxon[1] est une méthode non paramétrique pour comparer deux échantillons appariés. Le but du test est de comparer les performances de chaque sujet (ou paires de sujets) afin de vérifier s'il existe des différences significatives entre leurs résultats dans les deux situations. Il a été utilisé pour comparer si les deux cotations (échantillons appariés) sont différentes.

B. *Etape2 : évaluation de l'outil de cotation automatique TabMe2*

L'objectif principal de cette étape est de comparer les résultats des cotations du kinésithérapeute avec des cotations réalisées automatiquement grâce au logiciel TabMe2. Lors de cette étape, le kinésithérapeute effectue sa cotation à partir d'un tracé effectué par le patient sur le support tablette. La validation du logiciel TabMe2 permettra de réaliser la passation des 3 items de la MFM de manière plus standardisée et avec un outil d'assistance, afin d'améliorer la reproductibilité de l'évaluation MFM.

44 patients enfants (4 - 16 ans) porteurs d'une MNM identifiée et ayant une évaluation MFM prévue dans leur suivi habituel sont inclus dans cette étude. Les passations ont été réalisées dans 2 centres de références des MNMs: CHU de Lyon et de Grenoble. Un total de 43 patients a participé aux tests du logiciel TabMe2. L'âge moyen des sujets était de 9,8 ± 4,07 ans.

Au cours de l'évaluation MFM proposée, en plus de réaliser les items 18, 19 et 22 sur matériel conventionnel, les patients étaient invités à les réaliser également sur la tablette. Le thérapeute n'a pas eu accès aux cotations attribuées par le logiciel TabMe2 avant de proposer sa propre cotation. Les animations qui permettent de revoir les tracés des dessins correspondant aux touchers des doigts des patients ont toutefois été mises à disposition du thérapeute comme cela serait envisagé dans l'utilisation future. Les résultats des cotations (donnés par kinésithérapeute et par le logiciel TabMe2) ont été enregistrés sur un fichier PDF, dans la tablette. Les coordonnées x et y des tracés et leur temps de réalisation ont également été enregistrés. Les thérapeutes qui faisaient partie de l'étude ont été informés du protocole expérimental et formés sur l'utilisation de la tablette.

Le critère de jugement est la comparaison des cotations données par le kinésithérapeute et par le logiciel TabMe2 lors des évaluations données suite aux passations sur la tablette pour les items 18, 19 et 22 de la MFM. Les données ont été analysées à l'aide du logiciel statistique SPSS Statistics (IBM SPSS 2.0). Le coefficient de corrélation de Spearman[2] a été utilisé pour vérifier le degré d'association de deux cotations.

C. *Modélisation des 3 items identifiés de la MFM*

L'étape de modélisation des items consiste à numériser le matériel standard et à créer les interfaces de gestion de ces items. Les versions numérisées du matériel standard utilisé dans les items 18, 19 et 22 du MFM ont donc été développées (Figure 3). Pour un protocole d'évaluation tel que la MFM, cette numérisation, constitue un défi important, puisque la reproduction doit respecter la totalité des caractéristiques originales. Effectivement, cette échelle est validée à l'international par la communauté des kinésithérapeutes, elle est utilisée quotidiennement et aucune modification de protocole ne peut être autorisée. Les représentations graphiques numériques doivent donc être fidèles aux équipements physiques pour permettre une activité de réalisation de l'item par les patients en tout point identique.

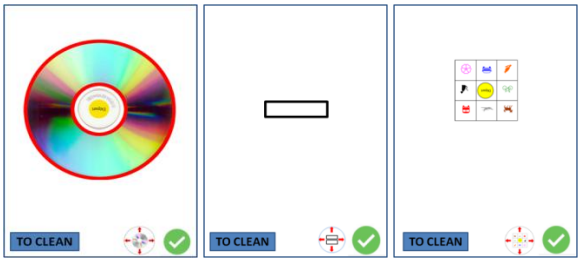


Figure 3. Interphases numerisees des materiels, respectivement des items 18, 19 et 22

[1] http://perso.ens-lyon.fr/lise.vaudor/test-de-wilcoxon-mann-whitney/

[2] http://www.biostat.ulg.ac.be/pages/Site_r/corr_spearman.html

Malgré tout, dans ces propositions, les représentations graphiques peuvent être repositionnées rapidement par le kinésithérapeute sur l'écran de la tablette (utilisation des boutons ronds à flèches rouges disponible sur le bas de l'écran, Figure 3), en fonction des contraintes et capacités fonctionnelles du patient. Le bouton "TO CLEAN" permet de réinitialiser la passation. Grâce au bouton vert, le kinésithérapeute déclenche l'enregistrement les données du patient qui correspondent aux instants ou ce dernier touche l'écran. Pour la réalisation de l'item 19, l'utilisation d'un stylet actif est nécessaire.

D. Paramétrage mathématique et critères d'évaluation

La MFM est un protocole très strict de 32 items, chacun étant constitué d'instructions précises à suivre par le patient, en partant systématiquement d'une position ou situation initiale et en allant vers une position ou situation finale. En fonction des items, un ou plusieurs des critères suivants sont analysés par le thérapeute : l'amplitude des mouvements, de la résistance à l'effort, la position articulaire, la transition d'une position à une autre, le niveau d'achèvement de la tâche et le temps de réalisation de la tâche.

Pour le développement du logiciel TabMe2 dédié à l'évaluation automatique des 3 items sélectionnés de la MFM, deux axes de travail ont été étudiés avec des kinésithérapeutes :

- La recherche de règles mathématiques pour la réalisation de modèles paramétriques 2D caractérisant les tracés des items. Ceci dans le but d'évaluer objectivement la qualité du tracé ou du pointage du patient pour chaque item.
- L'utilisation complémentaire judicieuse des paramètres de temps et d'espace rendus disponibles par la technologie. Les coordonnées x et y et les temps d'exécution du toucher sur l'écran sont ainsi enregistrés pour pouvoir qualifier davantage les tracés ou pointages.

Les modélisations et paramétrages qui sont définis ci-dessous pour chacun des trois items 18, 19 et 22 de la MFM ont été implémentés sur la tablette (logiciel TabMe2) et ont permis une analyse comparative entre les cotations effectuées par les thérapeutes et les cotations automatiques. L'implémentation du logiciel TabMe2 a été réalisée en Java, sur Androïde Studio.

1) Item 18

L'item 18 consiste à faire le tour d'un CD avec un doigt, en commençant par un toucher initial en son centre. Le matériel conventionnel utilisé dans cet item est un CD collé sur une feuille A4 cartonnée (Figure 4a). Pour cet item, la force et la dextérité du membre supérieur et la mobilité des articulations de l'épaule et du coude sont évaluées dans le contexte fusionnel spécifique. Les scores possibles sont : 0 (ne fait pas le tour du petit cercle intérieur du CD avec un doigt), 1 (le patient peut faire le tour du petit cercle intérieur du CD avec un doigt), 2 (le patient peut faire le tour extérieur du CD avec un doigt, avec compensation ou difficulté), et 3 (le patient peut faire le tour extérieur du CD avec le même doigt, sans appui de la main sur la feuille ou la table).

Pour pouvoir identifier automatiquement la qualité des tracés réalisés lors de l'item 18, les définitions préliminaires suivantes sont nécessaires : zones, angle minimum pour l'achèvement du cercle, distance entre les tracés adjacents et seuil de vitesse (minimum).

L'image du CD est ainsi divisée en 3 zones, comme illustré sur la Figure 4b. Le premier toucher du patient doit être à l'intérieur de la zone identifiée A1 (intérieur du plus petit cercle gris). Dans le cas contraire, le score sera nul. Un score de 1 nécessite un dessin circulaire complet entièrement à l'intérieur de la zone A2 (identifiée par l'aire comprise entre le petit cercle gris et le cercle gris moyen). À l'intérieur de la zone A3 (entre le cercle gris moyen et le grand cercle gris), un dessin circulaire complet sans compensation sera noté 3 ou 2 si une compensation est observée ou mesurée.

L'angle minimum pour qu'un dessin circulaire soit considéré comme terminé est de 335°, ce qui représente environ 93% d'un cercle à 360°. Ces valeurs ont été déduite des discussions avec les thérapeutes et est totalement transparente pour eux.

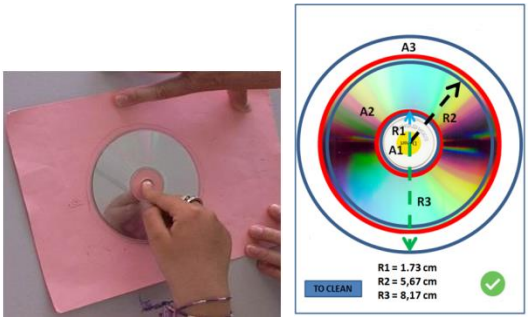


Figure 4. ITEM 18. A. MATERIEL CONVENTIONNEL. B. INTERFACE NUMERIQUE ASSOCIEE

2) Item 19

Pour l'item 19, le patient doit dessiner une série continue de boucles dans un rectangle, avec un crayon, en touchant les bords supérieur et inférieur du rectangle, disponible sur la feuille de cotation (Figure 5a). Les dimensions du rectangle sont de 1 cm x 4 cm, avec une épaisseur de trait du bord du rectangle de 0,1 cm. Dans cette tâche, la force de préhension, la mobilité du poignet et la coordination de la main sont évaluées. Les scores suivants sont possibles : 0 (le patient ne prend pas le crayon ou ne laisse pas de trace écrite), 1 (le patient peut prendre le crayon et laisser une trace écrite à l'intérieur du rectangle), 2 (le patient peut prendre le crayon et dessiner au moins 1 boucle qui touche les bords supérieur et inférieur du cadre) et 3 (le patient peut prendre le crayon et dessiner une série continue de boucles sur toute la longueur du cadre en touchant les bords supérieur et inférieur du cadre).

Pour pouvoir identifier automatiquement la qualité des tracés réalisés lors de l'item 19, les définitions préliminaires suivantes sont nécessaires : zones et seuil de vitesse (minimum). L'image du rectangle est divisée en zones, comme illustré sur la Figure 5b.

Sur la Figure 5b, les différentes zones sont définies de la manière suivante : surface X = 1 cm x 4 cm, surfaces Z1 = Z2

= Z3 = Z4 = 0,4 cm x 0,4 cm et Y est une surface entourant X dont la largeur de bande est de 0,2 cm. T est une surface entourant Y dont la largeur de bande est 0,5 cm.

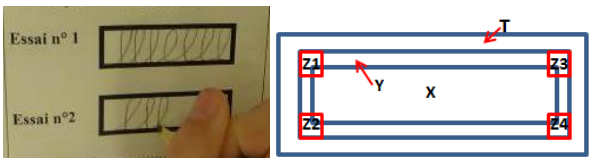


Figure 5. ITEM 19. A. MATERIEL CONVENTIONNEL. B. INTERFACE NUMERIQUE ASSOCIEE

Pour pouvoir distinguer la forme des boucles (triangulaires par exemple), un traitement dynamique du dessin est effectué. Comme le montre la Figure 6, une boucle a 4 points d'inflexion (2 verticaux et 2 horizontaux) et les boucles adjacentes ont des points d'inflexion horizontaux communs (point D sur la Figure 6). De plus, chaque point d'inflexion horizontal est suivi d'un point d'inflexion vertical. Les points d'inflexion horizontaux doivent être à l'intérieur de la zone Y pour une cotation 3.

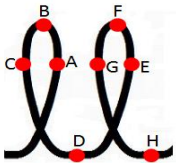


Figure 6. POINTS D'INFLEXION DES BOUCLES. HORIZONTAUX : A, C, E ET G. VERTICAUX : B, D, F ET H

Une vitesse minimale doit être observée pour un score de 3, comme dans le cas de l'item 18. Cependant pour cet item 19, une réduction naturelle de la vitesse aux points d'inflexion est observée (principalement aux points d'inflexion horizontaux). Pour être en phase avec ce comportement attendu, le seuil de vitesse minimum a été fixé à 0,1 cm/sec (il correspond à 10 pixels/sec sur le modèle choisi de tablette).

3) Item 22

L'item 22 de l'échelle MFM propose que, à partir d'un touché initial sur le dessin central d'une figure, le patient touche ensuite tous les autres dessins qui sont disposés en carré autour de ce dessin central (Figure 7). La bonne position initiale est imposée pour initialiser la tâche. Dans le cas contraire la cotation sera de 0.

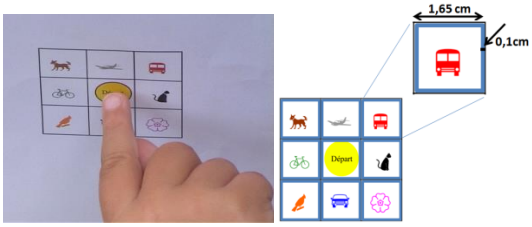


Figure 1. ITEM 22. A. MATERIEL CONVENTIONNEL. B. INTERFACE NUMERIQUE ASSOCIEE

Le score maximum dans l'item 22 est associé à la capacité du patient à toucher de manière enchaînée une série de dessins dans une figure. Dans ce cas, faire glisser le doigt d'un dessin à l'autre est considéré comme une compensation et doit être détecté. Pour pouvoir détecter ce glissement, il est nécessaire de définir les limites géométriques de chacune des cases contenant les 9 dessins de cet item (Figure 7).

Pour un score de 3, le patient doit toucher initialement l'objet central, puis toucher chacun des 8 objets qui l'entourent, sans toucher les limites bleues visibles.

IV. RESULTATS ETAPE 1

L'hypothèse selon laquelle deux groupes d'échantillons dépendants ont des valeurs égales ne peut être rejetée pour aucun des items. Effectivement, le test de Wilcoxon donne comme résultats p-value = 0,157 > 0,05 pour l'item 18, p-value = 0,096 > 0,05 pour l'item 19 et p-value = 0,317 > 0,05 pour l'item 22.

Items	Même score Tablette / Conventionnel				Wilcoxon
	Score 0	*Score 1*	*Score 2*	*Score 3*	*p-value*
18	1	1	2	30	0,157
19	2	2	16	6	0,096
22	1	0	2	33	0,0317

Tableau 2. RESULTATS DE TESTS DE CORRELATION ET DE WILCOXON. NIVEAU DE SIGNIFICATION 5%

Les relations entre les scores donnés suite aux passations sur matériel conventionnel et sur la tablette sont illustrées sur la Figure 9. Elles reprennent les nombres de scores identiques donnés par le thérapeute entre deux types de passation du Tableau 2. Plus le cercle représenté est épais, plus il y a de nombre de scores donnés de valeur correspondante (0, 1, 2 ou 3) identique.

Pour comprendre ces graphiques, prenons l'exemple de l'item 18 : le kinésithérapeute a toujours donné les mêmes scores de 0 aux patients ayant effectuée la passation sur matériel conventionnel et sur la tablette. Idem pour les scores de 1. Des patients évalués avec un score de 2 sur la tablette, ont été évalués parfois à 2, parfois à 3 lorsqu'ils ont effectué le test sur matériel conventionnel. Des patients évalués avec un score de 3 sur matériel conventionnel ont reçu un score de 2 ou de 3 lorsqu'ils ont effectué ce même item sur la tablette. Ces résultats graphiques montrent qu'il y a plus de désaccords concernant l'item 19.

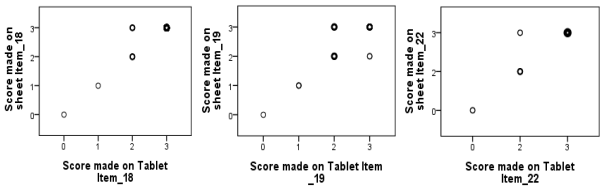


Figure 2. COMPARAISON DES VALEURS DES COTATIONS ENTRE LES PASSATIONS SUR MATERIEL CONVENTIONNEL ET SUR LA TABLETTE

L'accord de 97% entre les cotations pour l'item 22 valide une similitude importante entre les deux supports (papier et tablette). Ainsi, l'influence du support sur les résultats du test est très faible.

V. RESULTATS ETAPE 2

Le protocole MFM autorise jusqu'à 2 essais par item. 29 essais ont été réalisés pour l'item 18, 49 essais pour l'item 19, et

37 essais pour l'item 22. La plupart des évaluations non analysées ont été ignorées parce qu'elles étaient en dehors du protocole d'évaluation. L'hypothèse selon laquelle deux groupes d'échantillons dépendants ont des valeurs égales ne peut être rejetée pour aucun des items. Effectivement, le test de Wilcoxon donne comme résultats p-value = 0,096 > 0,05 pour l'item 18, p-value = 0,099 > 0,05 pour l'item 19 et p-value = 0,083 > 0,05 pour l'item 22 (Figure 10). Des corrélations de 69% pour l'item 18, 99,8% pour l'item 19 et 89% pour l'item 22 ont été obtenues. Ainsi, il est vérifié que les scores donnés par le logiciel TabMe2 sont très similaires des scores donnés par les kinésithérapeutes, notamment pour les items 19 et 22.

Items	**Même score TabMe2 / kinésithérapeutes**				**Wilcoxon**
	Score 0	***Score 1***	***Score 2***	***Score 3***	***p-value***
18	0	0	2	18	0,096
19	3	4	33	9	0,099
22	1	0	8	25	0,083

Tableau 3. COMPARAISON DES VALEURS DES COTATIONS ENTRE L'OUTIL TABME2 ET LES KINESITHERAPEUTES. NIVEAU DE SIGNIFICATION 5%

VI. DISCUSSION, CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Concernant l'étape1, un grand nombre des désaccords des cotations observés pour l'item 19 peuvent être liés au changement du crayon par un stylet dédié à la tablette. Par contre, le stylet choisi dans cette étude offre une précision suffisante et son poids est compensé par la vitesse d'écriture. Pour l'étape2, en utilisant des données spatiales et temporelles, TabMe2 peut attribuer un score selon les critères recommandés par le protocole MFM. Le plus grand défi a été d'interpréter les paramètres subjectifs utilisés par les kinésithérapeutes experts pour créer un algorithme d'analyse à mettre en œuvre sur la tablette (la contractions des muscles, la synchronisation des membres par exemple n'ont évidemment pas pu être configurés en utilisant la tablette). Finalement, l'utilisation de la tablette pourrait être intégrée au protocole de la MFM comme interface numérique pour l'évaluation des items 18, 19 et 22 pour remplacer les supports papiers.

VII. REFERENCES

[1] HOUWEN, S., et al. Motor skill performance of school-age children with visual impairments. DevelopmentalMedicine& Child Neurology, v. 50, n. 2, p. 139-145, 2008

[2] REIMER, A. M., et al. Improvement of fine motor skills in children with visual impairment: an explorative study. Research in developmentaldisabilities, v.32, n.5, p. 1924-1933, 2011

[3] PATERNOSTRO-SLUGA, T, et al. Reliability and validity of the Medical Research Council (MRC) scale and a modified scale for testing muscle strength in patients with radial palsy. Journal of rehabilitation medicine, v.40, n.8, p. 665-671, 2008

[4] HOGREL, J. Y.; OLLIVIER, G.; DESNUELLE, C. Testing musculaire manuel et quantifié dans les maladies neuromusculaires. Comment assurer la qualité des mesures de force dans les protocoles cliniques? Revue neurologique, v. 162, n.4, p. 427-436, 2006

[5] FLORENCE, J. M., et al. Intrarater reliability of manual muscle test (Medical Research Council scale) grades in Duchenne's muscular dystrophy. Physical therapy, v.72, n.2, p. 115-122, 1992

[6] RAPIN, A., et al. Actualités de l'évaluation clinique dans les maladies neuromusculaires lentement progressives à l'âge adulte. Journal de Réadaptation Médicale : Pratique et Formation en Médecine Physique et de Réadaptation, v. 31, n.3-4, p. 115-118, 2011

[7] BÉRARD, C., et al. A motor function measure scale for neuromuscular diseases. Construction and validation study. Neuromusculardisorders, v. 15, n. 7, p. 463-470, 2005

[8] FANG, B. et al. 3D human gesture capturing and recognition by the IMMU-based data glove. Neurocomputing, v. 277, p. 198-207, 2018

[9] SHUKOR, et al. A new data glove approach for Malaysian sign language detection. Procedia Computer Science, v. 76, p. 60-67, 2015

[10] VAMSIKRISHNA, K. M.; DOGRA, D. P; DESARKAR, M. S. Computer-vision-assisted palm rehabilitation with supervised learning. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, v. 63, n.5, p. 991-1001, 2015

[11] ELLIOTT, M. T., et al. Feasibility of using the Leap Motion hand gesture sensor for tracking wrist fracture physiotherapy, 2017. <https://pdfs.semanticscholar.org/ac81/655cd5fd703c750d6eea81c703ce5292edf5.pdf>

[12] BUTT, A. H., et al. Objective and automatic classification of Parkinson disease with Leap Motion controller. Biomedical engineering online, v.17, n.1, p. 168, 2018

[13] COTON J, VEYTIZOU J, THOMANN G, Villeneuve F. Feasibility study of hand motion analysis by the Leap Motion Sensor Key words. AMSE JOURNALS-AMSE IFRATH Publication –2016- Modelling C. v.77, p.73–83, 2016

[14] IOSA, M. et al. Seven capital devices for the future of stroke rehabilitation. Stroke research and treatment, v. 2012, 2012

[15] MUSKENS, L., et al. Never too old to use a tablet: designing tablet applications for the cognitively and physically impaired elderly. In: International Conference on Computers for Handicapped Persons. Springer, Cham, p. 391-398, 2014

[16] CARABEO, C. G. G. et al. Stroke patient rehabilitation: A pilot study of an android-based game. Simulation & Gaming, v. 45, n. 2, p. 151-166, 2014

[17] LARSEN, L. H. et al. Changes in corticospinal drive to spinal motoneurones following tablet-based practice of manual dexterity. Physiological reports, v. 4, n. 2, 2016

[18] PARASKEVOPOULOS, I. T.,et al. Design guidelines for developing customised serious games for Parkinson's Disease rehabilitation using bespoke game sensors. Entertainment Computing, 5(4), 413-424, 2014

Identification des situations dangereuses au sein de l'approche WSHM

Romain Duponnois, Pascal Lamy

Institut National de Recherche et de Sécurité

1 rue du Morvan

Vandœuvre-lès-Nancy – France

romain.duponnois@inrs.fr, pascal.lamy@inrs.fr

Eric Levrat

Université de Lorraine, CNRS, CRAN

Faculté des Sciences et Technologies, BP 70239
Vandœuvre-lès-Nancy – France

eric.levrat@univ-lorraine.fr

Ali Siadat

Arts et Métiers ParisTech, ENSAM, Université de Lorraine, LCFC

4 rue A. Fresnel

Metz – France

ali.siadat@ensam.eu

Résumé— La méthode Working Situation Health Monitoring (WSHM) a pour objectif de surveiller l'apparition de potentielles situations dangereuses en cas de réponse d'un opérateur à une dérive technique (dysfonctionnement machine ou dérive de flux de produits) à l'aide d'un indicateur d'état de santé de la situation de travail. Cette méthode se décompose en 3 étapes : modélisation, identification des situations potentiellement dangereuses et définition de l'indicateur d'état de santé. Lors de la 2ème étape, « Identification », il est proposé d'identifier les différentes situations potentiellement dangereuses suite à une réponse d'un opérateur à une dérive technique. Pour réaliser cette analyse, l'approche proposée au sein de cette 2ème étape se base sur les liens de causalité entre les dérives techniques (analysées par AMDEC-HazOp), les interactions Homme-machine-produits (dont les réponses de l'opérateur) et les potentielles situations dangereuses pouvant en résulter. Cette analyse utilise les informations présentes dans le modèle de données généré lors de la 1ère étape de la méthode WSHM et produit une liste des potentielles situations dangereuses suite à une réponse d'un opérateur à une dérive technique et leurs causes respectives. Cette liste sert par la suite, lors de la 3ème étape de la méthode WSHM, à définir un indicateur de santé de la situation de travail. Cet indicateur permet la surveillance automatique et continue de l'apparition de situation dangereuse au sein de la situation de travail d'intérêt.

Mots-clés— Accident du travail, Dérive, Estimation des risques, Interaction Homme-machine, Working Situation Health Monitoring ;

I. INTRODUCTION

En 2016, 55 044 accidents de travail avec arrêt de travail de plus de 4 jours sont survenus sur machines. Ce chiffre représente près de 10% de la totalité des accidents de travail en France sur cette même année (574478 accidents du travail en France en 2016). Les secteurs industriels (métallurgie, bois, papier, …) sont les plus touchés, avec environ un quart des accidents de travail liés aux machines. Ces chiffres s'expliquent par une grande présence des machines dans ces secteurs [1].

La même année, les accidents sur machines ont été à l'origine de plus de 4000 incapacités permanentes (12% de la totalité des incapacités permanentes sur l'année) et de 3 millions de jours d'arrêt de travail (7,5% de la totalité des jours d'arrêt de travail sur l'année) [2].

Les conditions d'occurrence d'un dommage (accident) sont présentées Figure 1.

Pour mettre sur le marché de la Communauté Economique Européenne, tout concepteur ou fabriquant de machines doit respecter les « exigences essentielles de santé et sécurité » présentes dans la Directive Machine (Directive Machine 2006/42/CE [3], transposée dans le Code du travail par les articles R. 4311 et R. 4312). Il peut, pour cela, s'appuyer sur les normes harmonisées donnant présomption de conformité à cette directive (ex. ISO12100 :2010 [4]).

Pour prévenir ces accidents, « les solutions à apporter visent en priorité la prévention intrinsèque, afin de supprimer ou réduire le risque dès la conception, en intégrant les caractéristiques de fonctionnement de la machine et sa maintenance. » [2]. Ces solutions ont pour but de limiter ou de supprimer l'apparition de situations de travail dangereuses

pour l'opérateur de l'équipement de travail en réduisant ou en supprimant l'exposition de l'opérateur à une source de phénomènes dangereux (danger).

Cependant, même si des mesures de réductions des risques sont prises à la conception, il faut également prendre en compte les spécificités liées à l'utilisation de la machine. Ceci se fait dans le cadre de la Directive Utilisation 2009/104/CE [5] transposée elle aussi dans le Code du travail par les articles R4321-1 à R4321-5. Ici, nous nous intéresserons à l'impact du contexte d'exploitation qui fait que l'équipement ou le processus de production dérive. Cela peut amener l'opérateur de la machine à réagir pour maintenir les performances de sa machine [6-8].

Cela peut se traduire par des modifications de la machine (désactivation de protections/capteurs [9, 10]) ou de l'activité de travail réalisée par l'opérateur (adaptation/ résilience de l'activité [11-13]).

Ces réactions sont appelées « réponses de l'opérateur à une dérive technique » (dysfonctionnements machines, dérives flux de produits, …) et peuvent le placer dans une situation potentiellement dangereuse.

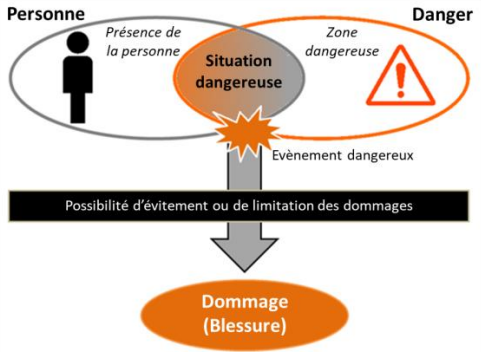


Figure 1. CONDITION D'OCCURRENCE D'UN DOMMAGE (D'APRES L'ISO/TR 14121-2 [14])

Cet article présente une approche pour l'identification de ces potentielles situations dangereuses (suite à une réponse de l'opérateur à une dérive technique d'une machine d'assemblage automatisée). Il sera structuré de la manière suivante :

La section II définit ce que sont les potentielles situations dangereuses suite à une réponse d'un opérateur de machine à une dérive technique.

La section III donne une vue d'ensemble de la méthode Working Situation Health Monitoring (WSHM) et explique son but. Elle présente également rapidement la première étape de cette méthode « Modélisation »

La section IV présente de façon détaillé la deuxième étape de la méthode WSHM « Identification ».

La section V conclut cet article et propose des perspectives pour la suite de ces travaux et du développement de la méthode WSHM.

II. LES SITUATIONS DANGEREUSES SUITE A UNE REPONSE D'UN OPERATEUR DE MACHINE A UNE DERIVE TECHNIQUE

Le lien entre dérive technique, réponse de l'opérateur et situation dangereuse est définit dans Lamy & Perrin :

« Lors de l'utilisation d'une machine […], des dysfonctionnements tels que le blocage d'une pièce peuvent survenir et perturber le fonctionnement normal de la machine […]. Pour résoudre ce dysfonctionnement, l'opérateur peut se placer dans une situation dangereuse. » [12]

Ces « réponses d'un opérateur à une dérive technique » sont assimilables à ce que l'on retrouve dans l'ISO12100 :2010 [4] pour la prise en compte des facteurs humains lors de l'estimation des risques : « interactions de(s) personne(s) avec la machine, y compris la correction de dysfonctionnement ».

Pour mieux comprendre les liens de cause à effet entre les différents événements menant à une situation dangereuse suite à une réponse d'un opérateur de machine à une dérive technique, il est proposé dans un premier temps de définir ce que l'on entend par « réponse d'un opérateur ».

A. *Qu'est ce qu'une réponse d'un opérateur ?*

Lors d'une dérive technique, un opérateur peut prendre la décision de s'adapter à la nouvelle situation [15]. Cette réponse contribue à la résilience de la situation de travail mais peut également mettre un opérateur en danger. Une réponse de l'opérateur à une dérive technique menant à un accident rentre dans la catégorie des « erreurs humaines » et/ou « facteurs humains » [10, 16-19].

Van Elslande rappelle qu'« il ne faut pas analyser cette erreur [humaine] comme la cause première des accidents, mais plutôt comme la conséquence de dysfonctionnements qui se situent en amont. Si l'homme se trompe, ce n'est rarement pas parce qu'il l'a cherché ; c'est le plus souvent parce que les conditions tant externes (environnementales) qu'internes (humaine) de son activité ne lui ont pas permis à un moment donné de faire face aux exigences de la tâche [prescrite] à laquelle il était confronté » [17].

Dans ce cas, la réponse d'un opérateur à une dérive technique est liée à la perception de la situation dans laquelle celui-ci se trouve [20]. Un opérateur supervisant la ou les machines ainsi que le ou les flux de produits pourra en percevoir les dérives [21-24].

B. *De la dérive technique à la réponse d'un opérateur*

Cette perception des machines et des flux de produits se fait par des interactions (informationnelles et/ou sensorielles [25, 26]) entre Homme et machine, ou Homme et produits. Une dérive d'interaction (interaction existante qui ne se déroule pas nominalement) ou une émergence d'interaction (nouvelle interaction), de type informationnelle ou sensorielle peut indiquer à un opérateur la potentielle existence d'une dérive technique.

Pour expliquer le passage de dérive technique à perception par un opérateur, la Figure 2 présente les liens de causalité entre les dérives techniques et les dérives / émergences d'interactions pouvant permettre la perception des dérives techniques par un opérateur.

C. *De la réponse d'un opérateur à la situation dangereuse*

Lorsqu'un opérateur perçoit une dérive technique, celui-ci peut y « répondre » pour contribuer à la résilience de la situation de travail (ex. permettre la continuité de la production, permettre de maintenir la cadence de production, …) [13, 21, 27]. Parmi les réponses possibles nous nous limiterons à celles raisonnablement prévisibles [4, 14] par un expert en analyse des risques.

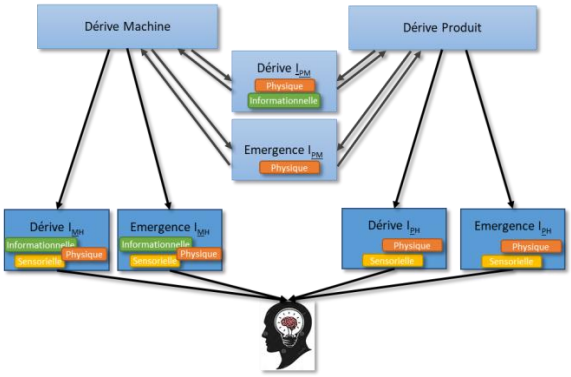


Figure 2. DERIVES ET EMERGENCES D'INTERACTIONS POUVANT MENER A LA PERCEPTION D'UNE DERIVE TECHNIQUE PAR UN OPERATEUR

Ces réponses peuvent générer des dérives d'interactions ou des émergences d'interactions de type physique [25, 26] ou informationnelle d'un opérateur sur une machine ou un flux de produits. Lors d'une dérive ou émergence d'interaction physique, il se peut que l'opérateur contourne des protecteurs [12, 28] et/ou s'expose à un ou des phénomènes dangereux.

Les liens de causalité entre la réponse d'un opérateur et les dérives / émergences d'interactions générées par la réponse d'un opérateur sont présentés Figure 3.

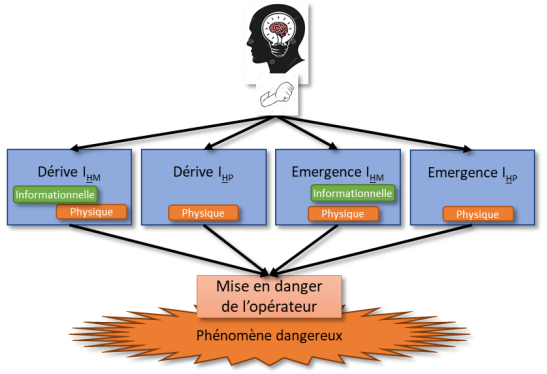


Figure 3. DERIVES ET EMERGENCES D'INTERACTIONS SUITE A UNE REPONSE D'UN OPERATEUR A UNE DERIVE TECHNIQUE

III. METHODE WORKING SITUATION HEALTH MONITORING

A. *Description de la méthode WSHM*

Pour surveiller de manière automatique et continue l'apparition de ces potentielles situations dangereuses, ces travaux ont pour but de développer une méthode nommée Working Situation Health Monitoring. Cette méthode vise à surveiller les signaux rares annonciateurs de ces situations potentiellement dangereuses identifiées, en utilisant un indicateur d'état de santé de la situation de travail [26, 29].

La méthode WSHM se déroule en trois étapes dont les grandes lignes ont été présentées lors du GIS-SMART précédant (2019) [29] :

- La Modélisation de la situation de travail d'intérêt par instanciation d'un modèle générique de situation de travail [26] ;
- L'Analyse de la situation de travail pour l'identification des potentielles situations dangereuses suite une réponse d'un opérateur à une dérive technique ;
- La définition d'un indicateur de santé de la situation de travail permettant la surveillance automatique et continue de l'apparition de situation potentiellement dangereuse suite à une réponse d'un opérateur à une dérive technique (non présentée dans ce document).

Cet article a pour but de présenter plus particulièrement la deuxième étape de la méthode WSHM (voir Section IV).

B. *Modélisation de la situation de travail*

La méthode WSHM propose de considérer la situation de travail comme un système. Cette hypothèse permet de représenter la situation d'un point de vue santé-sécurité au travail ; son environnement ; ses interactions avec son environnement ; sa structure ; son comportement.

Pour permettre la modélisation de la situation de travail d'intérêt (situation que l'on souhaite étudier), la méthode WSHM propose d'instancier le modèle de situation de travail [26].

Cette instanciation se déroule en trois phases :

- L'instanciation de la structure et du comportement de la situation de travail d'intérêt en vue « boite noire » (étude de l'activité de la situation ainsi que de ces flux entrants et sortants);
- L'instanciation de la structure et du comportement de la situation de travail d'intérêt en vue « boite blanche » (étude des flux à l'intérieur de la situation ainsi que des éléments la composant) et des machines au sein de la situation de travail d'intérêt en vue « boite noire » ;
- L'instanciation de la structure et du comportement des machines au sein de la situation de travail d'intérêt en vue « boite blanche » (les opérateurs sont modélisés mais en vue « boite noire » uniquement) ;

Le résultat de cette instanciation permet d'obtenir un ensemble de données, contenant toutes les informations

nécessaires à l'analyse des impacts des dérives techniques pour la sécurité d'un opérateur.

IV. Identification des potentielles situations dangereuses suite a une reponse d'un operateur a une derive technique de machine automatisee d'assemblage

A. Analyse de risques professionnels

Cette étape de la méthode WSHM a pour but de réaliser l'analyse des risques professionnels pour l'opérateur liés à une dérive technique au sein de la situation de travail dont il fait partie.

Les méthodes courantes d'analyse de risques (Analyse Globale des Risques [30], Analyse Préliminaire des Risques [31], HACCP [32], HAZOP [33], ou encore la méthode Nœud papillon [34]) identifient le danger en étudiant un élément de la situation de travail (machine, flux, …). La proposition de cette étape de la méthode WSHM est d'identifier les dangers pour un opérateur de machine par l'étude de sa situation de travail dans son ensemble. Cela dans le but d'identifier les liens de causes à effets entre les dérives techniques, les réponses possibles de l'opérateur et les potentielles situations dangereuses en cas de réponse de l'opérateur.

Cette étape se déroule en quatre phases :

- L'identification des dérives techniques par une analyse dysfonctionnelle de la machine et des flux au sein de la situation de travail ;
- L'identification des dérives et émergences d'interactions au sein de la situation de travail permettant à l'opérateur de percevoir la dérive technique ;
- L'identification des réponses potentielles de l'opérateur et des dérives/ émergences d'interactions au sein de la situation de travail suite à ces réponses ;
- L'estimation des risques liés à chaque réponse potentielle de l'opérateur à une dérive technique.

Les sous-sections suivantes présentent chacune de ces phases.

B. Identification des dérives techniques

A partir des informations contenues dans le modèle de situation de travail instancié à la situation de travail d'intérêt, une analyse dysfonctionnelle est réalisée.

Cette analyse dysfonctionnelle est réalisée en utilisant une AMDEC-HazOp [35] et a pour but d'identifier les dérives techniques : mode de défaillance, dérives de flux d'entrée et de sortie, ainsi que leurs causes et leurs effets sur plusieurs niveaux d'abstractions (situation de travail « boite noire », situation de travail « boite blanche » / machine(s) « boite noire » et machine(s) « boite blanche »).

Cette analyse dysfonctionnelle AMDEC-HazOp résulte en une liste de modes de défaillance (situation, machines et composants de machine), leurs causes et leurs effets. Les effets sont divisés en deux catégories : « locaux » (impact sur le flux de produits au sein de l'activité « boite blanche ») et « au niveau supérieur » (impact sur l'élément composé de l'acteur qui dérive et sur le flux de produits en sortie de l'élément composé de l'acteur qui dérive). A partir de ces dérives techniques identifiées, on peut étudier les potentielles dérives et émergences d'interactions permettant à un opérateur de percevoir ces dérives techniques.

C. Identification des dérives et émergences d'interactions permettant la perception de la dérive technique par un opérateur

Chaque mode de défaillance et/ou dérive de flux peut engendrer une ou des dérives d'interactions qui peuvent indiquer à un opérateur une potentielle existence d'une dérive technique.

Une dérive d'interaction peut se caractériser par une dérive d'une ou plusieurs caractéristiques (temps, espace et/ou forme) d'une interaction existante au sein de la situation de travail. Chaque interaction est caractérisée par :

- Des caractéristiques d'Espace : le centre de la zone ainsi que la forme de la zone dans laquelle l'interaction peut avoir lieu ;
- Des caractéristiques de Forme : l'énergie et/ou l'information transmise entre les deux acteurs ;
- Des caractéristiques de Temps : le temps nominal de début d'interaction ainsi que la durée et la fréquence de celle-ci ;

Ces interactions sont représentées dans le modèle de situation de travail au formalisme SysML sous la forme d'un Block présenté Figure 4.

Une interaction pouvant être considérée comme un flux, les dérives d'interactions sont caractérisées comme des dérives de flux et on peut utiliser l'HazOp pour les décrire (en utilisant des mots clés HazOp associé aux paramètres d'interaction).

En plus des dérives d'interactions existantes, les dérives techniques peuvent générer de nouvelles interactions entre Homme et machines, ou Homme et produits : les émergences d'interactions.

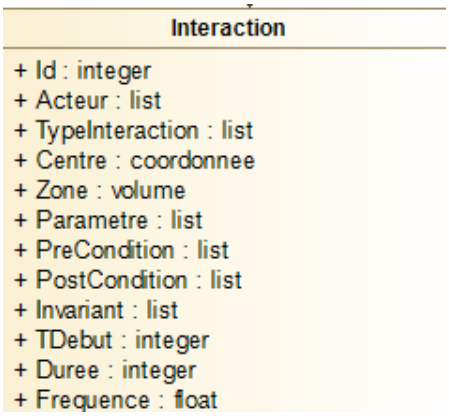


Figure 4. Block « Interaction » (SysML) au sein du modele de situation de travail propose par la methode WSHM

Identifier les interactions émergentes demande une certaine expertise des systèmes industriels avant de les caractériser, du

fait de la complexité d'une situation de travail (grand nombre d'émergences possibles). Un exemple d'émergence d'interaction sensorielle entre une machine et un opérateur : un moteur triphasé dont les charges sont déséquilibrées peut vibrer, cette vibration peut générer une interaction sensorielle entre la machine et un opérateur sous la forme d'un bruit.

Les dérives d'interactions et les émergences d'interactions ainsi identifiées permettent d'identifier les dérives techniques potentiellement perceptibles par un opérateur. A partir de ces dérives d'interaction permettant la perception par un opérateur d'une dérive technique, on peut étudier les réponses potentielles d'un opérateur à ces dérives techniques perçues.

D. Identification des dérives d'interactions suite à une réponse d'un opérateur

A partir des informations sur les dérives techniques perçues par l'opérateur et par expertise, les différentes réponses de l'opérateur sont identifiées.

Chaque réponse d'un opérateur peut engendrer une ou des dérives d'interactions et/ou une ou des émergences d'interactions (celles-ci sont caractérisées de la même manière que la section précédente).

Certaines de ces interactions dérivées ou émergentes peuvent se situer dans une zone dangereuse.

E. Estimation des risques de la réponse

Les phénomènes dangereux et les zones dangereuses associées ont été identifiées lors de la première étape de la méthode WSHM (modélisation).

Sur une machine automatisée d'assemblage, les phénomènes dangereux potentiellement rencontrés [4] sont majoritairement (mais pas uniquement) les phénomènes d'origine mécanique.

Pour chaque interaction dérivée ou émergente, la « zone de réalisation potentielle » (caractéristique d'Espace de l'interaction) de celle-ci au sein d'une zone dangereuse peut indiquer que cette réponse peut placer l'opérateur dans une situation dangereuse.

Les résultats de l'identification des situations potentiellement dangereuses suite à une réponse d'un opérateur à une dérive technique sont regroupés dans un tableau au format présenté dans le Tableau 1. Les valeurs de F Fréquence (F), Non-détection (ND) et Gravité, sur la sécurité d'un opérateur (G) permettent le calcul de la Criticité (C). Cette valeur de criticité est utilisée pour estimer les risques de chaque situation potentiellement dangereuse suite à une réponse d'un opérateur à une dérive technique.

Cela permet d'obtenir la liste des situations potentiellement dangereuses ainsi que leurs causes techniques associées qui serviront à construire l'indicateur d'état de santé de la situation de travail.

V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'approche proposée dans cet article permet une identification de situation dangereuse suite à une réponse d'un opérateur de machine à une dérive technique.

Actuellement, l'approche permet l'identification des situations accidentelles mais pas les maladies professionnelles telles que les troubles musculo-squelettiques. Une collaboration avec des ergonomes du travail pourrait permettre d'identifier ces maladies professionnelles.

Au sein de la méthode WSHM, les résultats de cette identification (liste des potentielles situations dangereuses et de leurs causes) sont ensuite utilisés pour définir un indicateur d'état de santé de la situation de travail. Cet indicateur d'état de santé de la situation de travail sera construit par la fusion d'indicateurs de situations dangereuses, eux-mêmes fusion d'indicateurs de performance et de dégradation des propriétés des activités, d'interactions et de paramètres au sein de la situation de travail.

Cet indicateur d'état de santé permet la surveillance continue et automatique de la situation de travail pour y détecter l'apparition potentielle de situations dangereuses suite à la réponse d'un opérateur à une dérive technique.

Acteur	**Activité**	**Analyse dysfonctionnelle**							**Perceptions**		**Réponses**			**C**
		Mode de défaillance	***Causes internes***	***Causes externes***	***F***	***Effets locaux (/Produits)***	***Effets au niveau supérieur***		***Interactions dérivées ou émergentes M sur H ou P sur H***	***ND***	***Interactions dérivées ou émergentes H sur M ou H sur P***	***Phénomènes dangereux***	***G***	
							(/Acteur)	***(/Produits)***						
Situation de travail														
Machine														
…														
Composant														
…														

Tableau 1. TABLEAU POUR RECUEILLIR LES RESULTATS DE L'IDENTIFICATION DES SITUATIONS POTENTIELLEMENT DANGEREUSES SUITE A UNE REPONSE D'UN OPERATEUR A UNE DERIVE TECHNIQUE

VI. References

1. Demasy, S., et al., *Le risque machine, encore une réalité ?* Hygiène et Sécurité du travail, 2020(259): p. 78-82.
2. Brasseur, G., C. Ravallec, and D. Vaudoux, *Le risque machine.* Travail & Sécurité, 2019(802): p. 12-25.
3. CE, *DIRECTIVE 2006/42/CE* 2006.
4. ISO, *ISO 12100 : Safety of machinery -- General principles for design -- Risk assessment and risk reduction*, in *BS EN ISO*. 2010. p. 12100-2.
5. CE;, *DIRECTIVE 2009/104/CE* 2009.
6. Pariès, J., *De l'obéissance à la résilience, le nouveau défi de la sécurité.* Les entretiens du Risques 2011, 2011.
7. Pariès, J. and J. Wreathall, *Resilience engineering in practice: a guidebook*. 2017: CRC Press.
8. Léger, A., *Contribution à la formalisation unifiée des connaissances fonctionnelles et organisationnelles d'un système industriel en vue d'une évaluation quantitative des risques et de l'impact des barrières envisagées*. 2009, Université Henri Poincaré-Nancy I.
9. Polet, P., F. Vanderhaegen, and P. Millot, *Human behaviour analysis of barrier deviations using a benefit-cost-deficit model.* Advances in Human-Computer Interaction, 2009. **2009**: p. 4.
10. Vanderhaegen, F., et al., *A Benefit/Cost/Deficit (BCD) model for learning from human errors.* Reliability Engineering & System Safety, 2011. **96**(7): p. 757-766.
11. Pariès, J. *Rule-based vs managed safety : from compliance to resilience*. in *8th International Conference Safety of Industrial Automated Systems*. 2015. Königswinter, Germany.
12. Lamy, P. and N. Perrin, *Approach to analyse hazardous situations tied to recurrent production dysfunctions, by observing the work situation.* International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 2020: p. 1-9.
13. Hollnagel, E., *Achieving system safety by resilience engineering.* 2006.
14. ISO;, *ISO/TR 14121–2: Safety of Machinery-risk Assessment–Part 2: Practical Guidance and Examples of Methods*. 2012, ISO Geneva.
15. Le Bot, P., *Suivre la prescription et prendre l'initiative pour être sûr: la résilience en situation.* 29 et 30 novembre 2011, 2011: p. 95.
16. Reason, J., *Human error*. 1990: Cambridge university press.
17. Van Elslande, P., *L'erreur humaine dans les scénarios d'accident cause ou conséquence?* Recherche-Transports-Sécurité, 2000. **66**: p. 7-31.
18. Chauvin, C., *Le facteur humain et la sécurité maritime.* Revue Maritime, 2010(489): p. 14.
19. Larouzée, J., F. Guarnieri, and D. Besnard, *Le modèle de l'erreur humaine de James Reason*. 2014, MINES ParisTech.
20. Endsley, M.R., *From here to autonomy: lessons learned from human–automation research.* Human factors, 2017. **59**(1): p. 5-27.
21. Boyd, J., *OODA loop*. Center for Defense Information, Tech. Rep, 1995.
22. Endsley, M.R. and D. Garland, *Theoretical underpinnings of situation awareness: A critical review.* Situation awareness analysis and measurement, 2000. **1**: p. 24.
23. Hoc, J.-M., *La relation homme-machine en situation dynamique.* Revue d'Intelligence Artificielle, 2000. **14**: p. 55-71.
24. Boy, G.A. *On the complexity of situation awareness*. in *Proceedings 19th Triennial Congress of the IEA*. 2015.
25. Guiochet, J., *Hazard analysis of human–robot interactions with HAZOP–UML*. Safety science, 2016. **84**: p. 225-237.
26. Duponnois, R., et al. *Working situation reference model for risk assessment on automated assembly lines*. in *30th European Safety and Reliability Conference and 15th Probabilitic Safety Assessment and Management Conference, ESREL 2020 PSAM 15*. 2020.
27. Braune, R. and W.R. Foshay, *Towards a practical model of cognitive/information processing task analysis and schema acquisition for complex problem-solving situations.* Instructional Science, 1983. **12**(2): p. 121-145.
28. Haghighi, A., Y. Chinniah, and S. Jocelyn, *Literature review on the incentives and solutions for the bypassing of guards and protective devices on machinery.* Safety science, 2019. **111**: p. 188-204.
29. Duponnois, R., et al. *Vers le WSHM (Working Situation's Health Monitoring) pour la prévention des accidents du travail*. in *16ème colloque national S-mart/AIP-PRIMECA*. 2019.
30. Desroches, A., *Analyse globale des risques (AGR).* 2017.
31. MORTUREUX, Y., *Analyse préliminaire de risques.* 2002.
32. FEDERIGHI, M., *Méthode HACCP–Approche pragmatique.* 2015.
33. IEC, N.E., *NF EN IEC 61882: 2016 Hazard and operability studies (HAZOP studies) - Application guide*. 2016, AFNOR.
34. IDDIR, O., *Nœud papillon: une méthode de quantification du risque.* 2015.
35. Reitz, A., et al., *Systematic approach for dysfunctional analysis in radiotherapy.* Cancer radiotherapie: journal de la Societe francaise de radiotherapie oncologique, 2012. **16**(8): p. 667-673.

Analyse des aspects santé-sécurité lors du démantèlement / de-manufacturing

Heng Hu [1]
Xavier Godot [1]
xavier.godot@ensam.eu

Bruno Daille-Lefevre [2]
bruno.daille-lefevre@inrs.fr
Patrick Martin [1]
Patrick.martin@ensam.eu

1 : Arts et Metiers Institute of Technology, Université de Lorraine, LCFC, HESAM Université, F-57070 Metz,
2 : Institut national de recherche et de sécurité (INRS), Département Ingénierie des Equipements de Travail, 1 rue du Morvan, F-54519 Vandœuvre-Lès-Nancy cedex,

Résumé— Cette étude se positionne dans le cadre de la prise en compte des aspects humains et de gestion des matières premières dans le contexte de l'industrie du futur (Industrie 5.0). Elle porte particulièrement sur les aspects santé-sécurité des opérateurs lors des opérations de démantèlement (ou de-manufacturing) de produits, activités qui vont se développer à grande échelle. L'analyse de l'état de l'art sur différents axes : évaluation des risques, gestion de la fin de vie des produits, analyse de santé-sécurité des opérateurs, a permis d'identifier les activités clés représentatives du processus de démantèlement, les concepts et approches liées à la problématique de la santé – sécurité des opérateurs lors de la conception et de l'exploitation de système de production. Par contre le manque de travaux sur la santé et la sécurité au travail lors du démantèlement du produit a été constaté. Aussi une approche de formalisation du processus de démantèlement permettant de prendre en compte les éléments caractéristiques de la santé-sécurité comme de l'ensemble des activités et de leurs interactions est présentée dans ce papier.

Mots-clés— industrie du futur, santé-sécurité, démantèlement, Homme au travail, industrie 5.0

I. INTRODUCTION

De nombreuses études [1, 2, 3, 4 ,5] soulignent l'importance de la prise en compte de l'humain dans les nouveaux challenges liés à l'industrie du futur. D'autre part les contraintes associées au dérèglement climatique, aux économies d'énergie, à la réduction des ressources en matières premières conduisent au nouveau paradigme de l'industrie 5.0 : industrie 4.0 augmentée par l'écologie et l'humain [5, 6, 7]. La réutilisation et le recyclage, l'économie circulaire sont des réponses très pertinente à cet enjeu majeur. Mais, pour que cette solution soit massivement déployée, il est indispensable qu'elle ne présente aucun danger et qu'elle soit économiquement et socialement soutenable. Pour cela, cette phase de recyclage et démantèlement est largement préparée lors de la conception des produits actuels (DFD- Design for disassembly). Mais, cette approche n'est mise en œuvre que sur les produits récents. Qu'en est-il des produits anciens qui n'ont pas été conçus en vue de leur recyclage ou de ceux dont l'historique a tout simplement disparu ? Force est de constater que ces opérations ne permettent plus de respecter simultanément les objectifs économiques et les impératifs de santé-sécurité des opérateurs de démantèlement, le travail humain représentant une part importante de cette activité. Par conséquent, leur recyclage est très problématique. Il est important de noter que ce cas de figure représente aujourd'hui une part très importante du volume total de produits à recycler, (à titre d'exemple, la Directive Européenne [8] pour le secteur automobile impose 85 % de recyclage et 95 % de valorisation). Aussi, ce problème constitue un enjeu majeur dans le cadre de la transition écologique de l'industrie et de la société dans un objectif de service et produit durable [9].

Le démantèlement (ou de-manufacturing) comprend l'ensemble des technologies/systèmes, outils et méthodes pour récupérer et réutiliser les fonctions et les matériaux des déchets industriels et des produits usagés dans une perspective d'économie circulaire. Les réglementations actuelles comme les processus structurés de démantèlement visent des produits manufacturés produits en très grande série. La réglementation établit un cadre normatif pour organiser les tâches et pour traiter certaines fins de vie des produits, mais les performances globales dépendent de la qualité et de l'efficacité des systèmes de démantèlement. En raison des avantages financiers et sociétaux potentiels associés à la récupération de la valeur économique et environnementale restante dans les produits usagés, le démantèlement se justifie pleinement et est amené à se développer.

De plus, il est important de noter que les considérations sur la santé et la sécurité du travailleur ne sont pas particulièrement étudiées dans ces règlementations ou manuels de démantèlement. Ainsi cette présentation se positionne au niveau de la phase de démantèlement complet ou partiel du produit afin de proposer une approche d'analyse de la santé et de la sécurité. Celle-ci a pour objectif d'identifier les activités génériques associées au processus de démantèlement, les informations disponibles en fonction de l'état d'avancement du processus permettant ainsi de prendre les décisions adéquates pour le choix de l'opération suivante prenant en compte en particulier les aspects santé-sécurité. Le processus de démantèlement ne peut se ramener au processus inverse de l'assemblage, compte tenu des coûts minimum, des défauts, usures, blocages liés à la diversité des usages des produits, de la diversité des matériaux. L'état réel du produit se révèle au fur et à mesure du processus, ce qui introduit des incertitudes et des variabilités fortes. A la suite d'une analyse de l'état de l'art sur différents axes : évaluation des risques, gestion de la fin de vie des produits, analyse de santé-sécurité des opérateurs, ce

document présentera les caractéristiques et activités clés associées au processus de démantèlement, puis les aspects spécifiques aux impacts sur la santé/ sécurité des opérateurs.

II. ANALYSE DE L'ETAT DE L'ART

A. Méthode d'évaluation des risques sans tenir compte de l'incertitude

Il existe de nombreuses recherches sur l'évaluation des risques et sur les différentes méthodes appliquées dans les multiples scénarios. A la suite d'une analyse bibliographique portant sur les années de 1976 à 2008, Aven [10] a identifié onze définitions du risque. Il a ensuite proposé de les diviser en trois catégories :

- Le risque est exprimé au moyen de probabilités et de valeurs attendues (méthode qualitative et quantitative) ;
- Le risque est défini comme un événement ou une conséquence (méthode qualitative) ;
- Le risque est exprimé par des événements / conséquences et incertitudes.

Au niveau des aspects santé- sécurité, nous partons sur du postulat que les phénomènes dangereux ne se manifestent qu'en présence d'énergie généralisée apportée par un produit, une machine, un outil ou l'Homme (cinétique, potentielle mécanique/ hydraulique, électrique, hydraulique, chimique / biologique, thermique, rayonnement, éléments structurels : matériaux, état de surface, géométrie). L'identification des phénomènes dangereux se base alors à l'identification de la relation entre le flux d'énergie et le risque (type, conséquence, importance) dans un système de production, ceci constitue le socle de la méthode EZID (« Analyse énergétique pour l'identification systématique des dangers pendant la conception ») proposée par N. de Galvez [11]. Cette notion a été approfondie en ajoutant le concept de volume d'influence (VI) qui est l'espace physique où une ou plusieurs propriété(s) des éléments dangereux (fixes ou en mouvement) peuvent agir. Chaque VI qui peut être décrit dans le modèle CAO du poste de travail est défini par les propriétés associées aux risques pour la santé-sécurité au travail en termes de type comme de quantification du niveau de risque définis par la normalisation [12].

Ces méthodes sont pertinentes et efficaces pour répondre aux questionnements en termes de santé-sécurité au travail liées à la mise en œuvre de nouveaux équipements et à l'organisation de la production. Néanmoins, dans le cas où il existe de fortes incertitudes, lors du démantèlement par exemple, les méthodes d'évaluation des risques qui tiennent compte de l'incertitude sont nécessaires.

B. Méthode d'évaluation des risques compte tenu de l'incertitude

La méthode d'analyse d'incertitude en évaluation des risques proposée par le groupe de travail de l'ANSES (Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail) [13] couvre un large spectre de domaines : la santé alimentaire, environnementale, au travail, … et comporte les étapes suivantes :

- Identification et description de l'ensemble des incertitudes rencontrées tout au long du processus d'évaluation ;
- Evaluation des sources d'incertitude retenues à l'issue de l'étape précédente ;
- Evaluation de l'impact combiné des sources d'incertitude retenues sur le résultat final de l'évaluation des risques, et éventuellement sur certains résultats intermédiaires jugés importants pour le gestionnaire ;
- Hiérarchisation des différentes sources d'incertitudes selon l'importance de leur impact sur les résultats de l'évaluation.
- Communication des incertitudes et de leur impact sur le résultat de l'évaluation.

D'autre part D. J. Pons [14] a proposé différentes formes d'incertitude existant dans la conception technique, exprimables par trois dimensions orthogonales : épistémique, aléatoire, abstraction (Figure1).

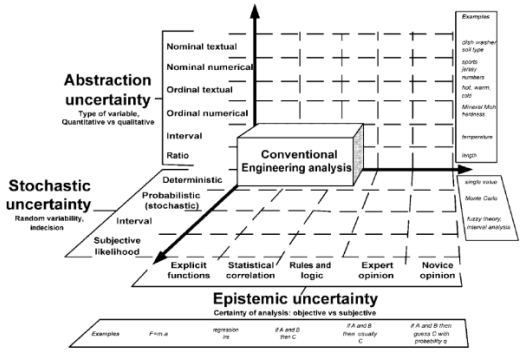


Figure 1. LES DIMENSIONS D'INCERTITUDES [14]

C. Démantellement

Le de-manufacturing ne peut pas simplement se considérer comme l'antonyme de fabrication (manufacturing). Par sa définition « décomposer un produit en composants dans le but de réutiliser et de re-fabriquer ses composants, ou de recycler le reste des composants », ce terme peut se traduire dans 3 aspects principaux :

- Recycler : Il existe 2 manières de recyclage. Dans le recyclage en boucle fermée, les propriétés inhérentes du matériau recyclé ne sont pas considérablement différentes de celles du matériau vierge (upcycling), la substitution est donc possible. Dans le recyclage en boucle ouverte, les propriétés inhérentes du matériau recyclé diffèrent de celles du matériau vierge, il n'est utilisable que pour d'autres applications compte tenu de la dégradation des propriétés inhérentes des matériaux (downcycling) ;
- Réutiliser : un terme générique couvrant toutes les opérations où un produit de retour est remis en service, essentiellement sous la même forme, avec ou sans réparation ;
- Reconditionner : Le reconditionnement fait référence aux actions effectuées pour remettre un produit ou un composant dans un état de fonctionnement après la détection d'une défaillance de fonction. Le produit ou la pièce reconditionnés récupèrent la fonction similaire à l'état original ;

Le démantèlement a donc pour objectif de décomposer un produit en composants, pièces, matériaux homogènes permettant ainsi de répondre aux exigences de réutilisation ou de traitement en fin de vie.

Le processus de démantèlement a fait l'objet de différentes études [15, 16, 17, 18]. La taxonomie (Figure 2) représente les composants fondamentaux des systèmes de de-manufacturing et permet de positionner chaque activité dans une étape de de-manufacturing typique, en mettant en évidence sa fonction et sa portée. Les processus de démantèlement comprennent généralement : désassemblage et réduction de taille, tri et séparation, recyclage, inspection, nettoyage, reconditionnement, logistique. Les technologies physiques et numériques associées et potentiellement les plus pertinentes sont présentées tableau 1. Alors que de nombreux concepts avancés ont été étudiés dans la communauté des systèmes de fabrication, établissant la base des concepts modernes de fabrication intelligente et d'Industrie 4.0, ils ont été abordés dans le domaine du démantèlement de manière moins structurée. Le tableau 2 résume les défis pour les systèmes de de-manufacturing associés à des challenges de l'industrie 4.0.

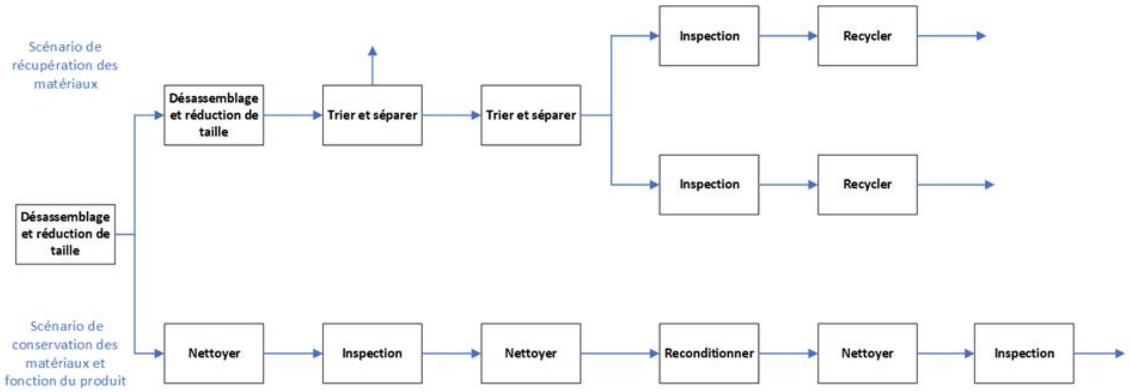


Figure 2. REPRESENTATION D'UNE TAXONOMIE SIMPLE DES PROCESSUS DU DE-MANUFACTURING [15]

Étape du processus	Technologies	Outils typiques
Démontage	Démontage manuel	Marteau, pince, tournevis, perceuse ou tronçonneuse portative
	Démontage automatisé	Système de transition automatique, dispositif de serrage flexible
	Coopération homme-robot	Robot
Réduction de taille	Broyage, déchiquetage ou pulvérisation	Broyeurs à marteaux, granulateurs, broyeurs à couteaux, cisailles
Recyclage	Traitement thermique	Lit fluidisé, pyrolyse
	Traitement chimique	Hydrolyse/glycolyse/acide Réacteur,
	Recyclage à l'état liquide	Four à induction
	Recyclage à l'état solide	Reforge à froid ou à chaud, équipement de reformage Machine de métallurgie des poudres

Tableau 1. TECHNOLOGIES POTENTIELLES [15]

L'analyse de la bibliographie a permis d'identifier les activités clés représentatives du processus de démantèlement, les concepts et méthodes liées à la problématique de la santé – sécurité des opérateurs lors de la conception et de l'exploitation de système de production. Cette analyse nous a permis de séparer les notions de risque avéré et de risque potentiel. Les retours d'expérience permettent d'identifier les risques avérés et de définir les processus à mettre en œuvre, leur niveau dangerosité comporte une certaine incertitude. Les risques potentiels par contre sont plus ou moins probables et leur niveau de dangerosité se positionne dans une certaine plage identifiée par l'expérience. Ainsi les

Tendances mondiales	Défis
Cycle de vie court des produits et grande variété de produits	Flexibilité et reconfigurabilité
Manque d'information sur les produits en retour	Traçabilité produit Inspection en ligne
Augmentation de la complexité du produit	Connaissances approfondies sur les produits Implication des organismes professionnels
Fluctuation élevée de la valeur des matériaux	Modèles d'affaires Planification de la production
Pression sur les coûts, la qualité et l'efficacité	Automatisation hybrides Assurance qualité
Attention accrue sur la sécurité et l'ergonomie	Conception des postes de travail centrée sur l'humain Processus de démantèlement sécurisés

incertitudes sur la santé-sécurité associent à la fois celles des risques avérés et des risques potentiels.

Tableau 2. LES DÉFIS DU DEMANTELLEMENT [15]

Compte tenu du manque de travaux sur la santé et la sécurité au travail lors du démantèlement du produit, il nous est paru nécessaire de d'identifier les éléments caractéristiques et génériques de activités et de leurs interactions lors du démantèlement permettant ensuite de prendre en compte les éléments spécifiques à la santé-sécurité. Cette formalisation sous forme de diagrammes IDEF0 (SADT) [19] permet d'être partagée entre l'ensemble des acteurs concernés.

III. METHODOLOGIE DEVELOPPEE

Seul le niveau A0 du modèle SADT est présenté ici (Figure 3). Six activités principales ont été identifiées : Recueillir des informations, Analyser, Séparer, Nettoyer, Trier et Capitaliser l'expérience, elles sont décrites ci-dessous.

A1- Recueillir des informations : Contrairement à la fabrication, les informations sur le produit sont très limitées. Donc il est nécessaire de recueillir des informations avant la prise de décision concernant l'organisation de l'activité. Les incertitudes introduites par le procédé d'inspection dépendent directement des moyens de mesure (sens de l'opérateurs, caméra, ultra-sons, rayonnement, ...) et d'évaluation utilisés : (physique, expérience, plan de collecte), caméra, …). D'autre part les énergies mises en œuvre sont de faible niveau.

A2-Analyser en vue de la prise de décision en analysant toutes les informations disponibles par la capitalisation des connaissances et les données recueillies. Ceci permet de définir le plan de démantèlement partiel permettant les actions à réaliser à l'étape suivante.

A3-séparer, A4-nettoyer et A5-trier ont été préalablement présentées dans la synthèse de processus du de-manufacturing (tableaux 1 et 2). Séparer signifie la séparation de 2 éléments recyclables, tandis que nettoyer désigne la séparation de 2 éléments dont 1 est un déchet. En plus de la répartition des éléments produits dans des conteneurs spécifiques, le tri comporte aussi les transports dans le système de démantèlement.

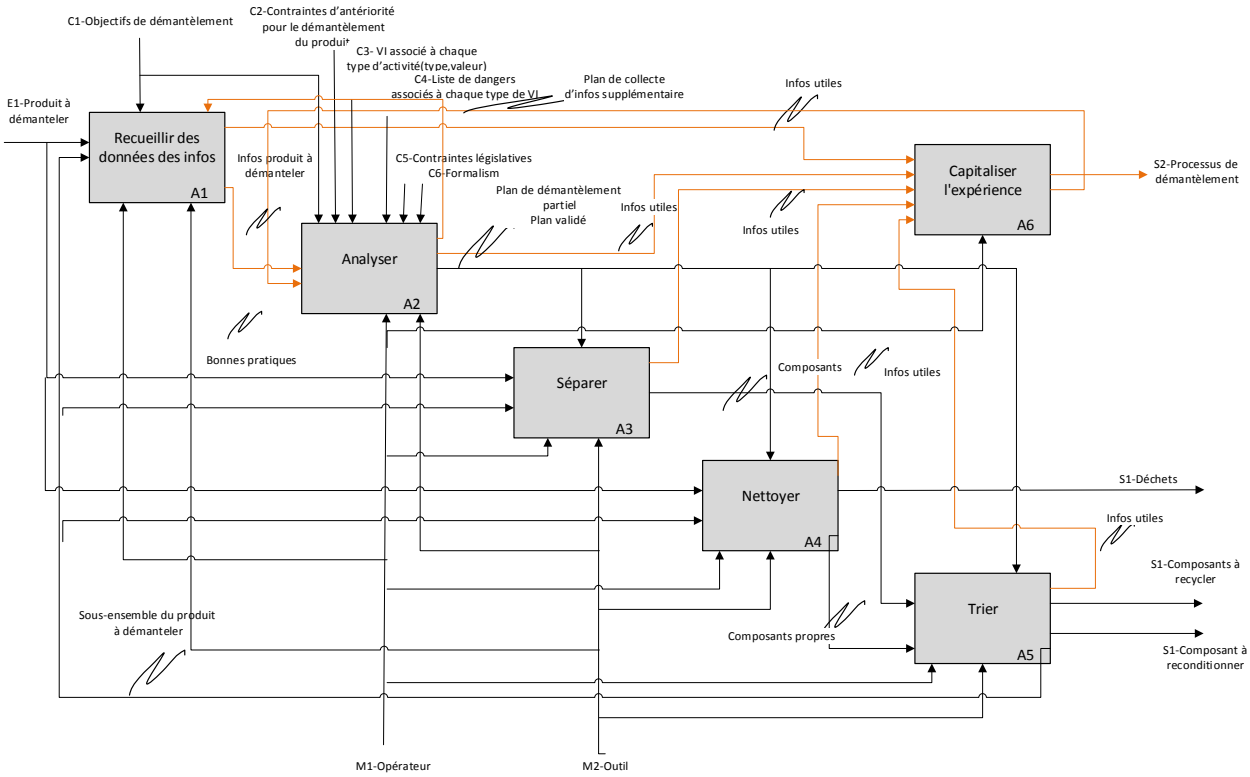


Figure 3. MODELISATION DU PROCESSUS DE DEMANTELEMENT

A6-Capitaliser l'expérience est une démarche complémentaire pour la structuration des données et informations et la construction dynamique du processus de démantèlement. En particulier cette activité assure la capitalisation des données pertinentes associées aux risques ainsi que les niveaux de maturité de ces connaissances. Capitaliser l'expérience prend en compte l'évolution du système dans son environnement au fil du temps et informe les décideurs de l'impact de leurs choix, cela permet de surveiller et de réduire les risques dynamiquement.

IV. PRISE EN COMPTE DE LA SANTE-SECURITE

Il s'agit de préciser ici les éléments (activités, paramètres, traitements) associés à la prise en compte de la santé- sécurité des opérateurs dans le processus de démantèlement, ceci concerne particulièrement l'activité A2 -Analyser (figure 3), lors desquelles l'opérateur est amené à réaliser les activités suivantes:

- Définir les opérations postérieures immédiates à réaliser (plan de démantèlement partiel). Pour certaines industries traitant de grandes quantités de produits comparables (automobiles – électroménager, [17] [20]) des procédures ont été définies (Figure 4), mais elles comportent un niveau de détail insuffisant au niveau des risques avérés, donc une certaine incertitude. Les opérations pour lesquelles l'opérateur ne dispose que d'informations partielles et comportant des incertitudes sur l'état du produit et de son historique d'utilisation, présentent des risques potentiels. Plus précisément l'opération aura à réaliser les tâches à réaliser immédiatement à partir de données obtenues sur chaque produit, des données et modèles capitalisés ;
- Evaluer le risque de santé-sécurité en tenant compte à la fois les flux énergétiques (tableau, schéma) [11], des volumes d'influence [12] qui peuvent être mise en évidence sur le modèle CAO (Figure 5), et du niveau des flux pour une évaluation de la dangerosité définie par la normalisation (Tableau 3).

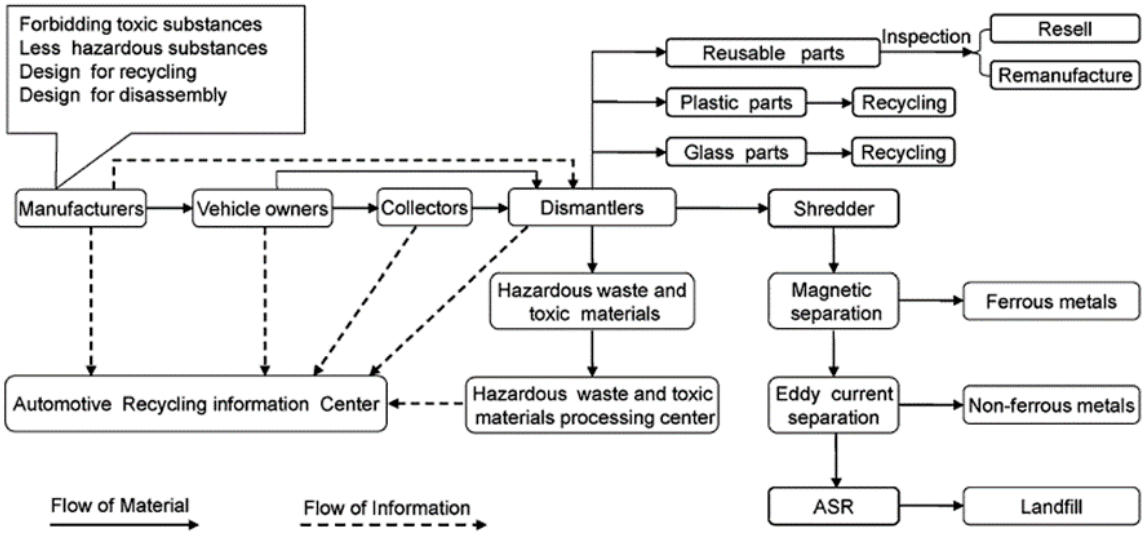


Figure 4. PROCESSUS DE DEMANTELEMENT D'UN VEHICULE [20]

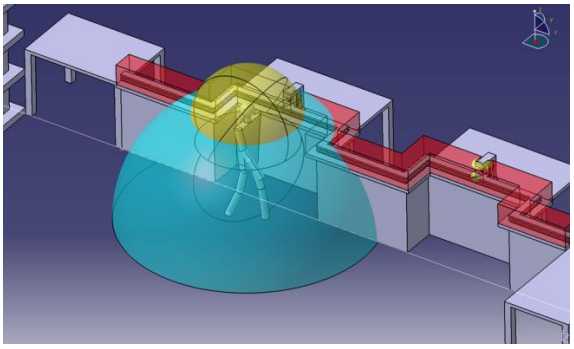


Figure 5. REPRESENTATION DES VOLUMES D'INFLUENCE [12]

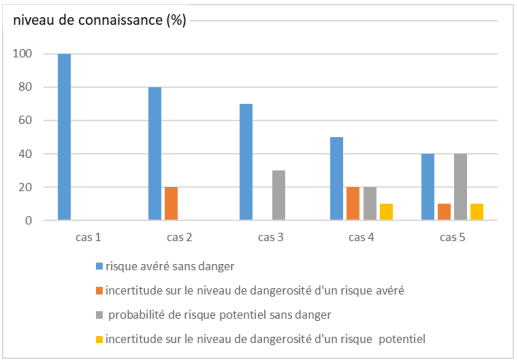


Tableau 3. LIEN VOLUME D'INFLUENCE / NORMES/ PARAMETRES POUR LA PRISE EN COMPTE DES EFFETS CINETIQUES DANS LES ROBOTS COLLABORATIFS

Volume d'Influence et énergies associées	Norme(s)	Paramètre(s)	Périmètre Couvert
Choc Potentielle	• Spécifications techniques, ISO/TS 15066:2016(E), Robots et dispositifs robotiques — Robots coopératifs	• Énergie (Joules)	• Tête • Cou • Thorax et abdominaux • Membres inferieurs • Membres supérieurs

- Identifier les interactions humaines entre le produit et l'outillage. Comme toute activité de fabrication, une activité de démantèlement comporte trois éléments : action, contrôle et commande, impliquant un produit, un outillage et un opérateur en interaction. Les différentes possibilités d'interactions entre les activités utiles sont schématisées tableau 4, notre attention se portera uniquement sur les colonnes 1 et 2.
- Qualifier la nature des [11] dangers et quantifier leur niveau en s'appuyant sur les normes [21] [12]. Celles-ci fournissent les valeurs limites permettant de classer les risques en 3 ou 4 niveaux (pas de risque, important, grave, très grave) pour l'ensemble des flux identifiés.
- Evaluer les incertitudes sur les connaissances dont dispose l'opérateur sur l'état du produit et de son comportement au cours d'une opération de démantèlement afin d'aider l'opérateur. Elle permet de préciser les incertitudes associées au risque avéré (niveau de dangerosité) et le risque potentiel (incertitude sur l'occurrence et niveau de dangerosité) pour chaque élément significatif de l'état du produit (produit, composant, interfaces, finalité). La figure 6 présente quelques cas types : pas de risque potentiel sans (cas 1) ou avec (cas 2) incertitude pour les risques avérés, risques avérés et potentiels sans (cas3) ou avec (cas 4 et 5) incertitude.

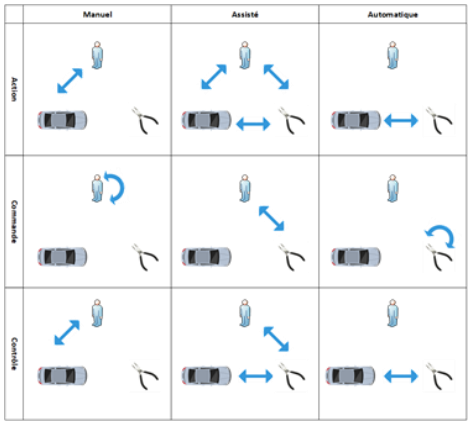


Tableau 4. INTERACTIONS ACTIVITÉS / OPERATEUR

-

Figure 6. ANALYSE QUANTITATIVE DU RISQUE REPOSANT SUR LES INCERTITUDES SUR LA MATURITE DES CONNAISSANCES.

Ceci permet d'élargir autant que possible « la zone de connaissance » pour que l'opérateur puisse maitriser les risques et choisir le meilleur processus.

V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les législations concernant le taux de récupération et de valorisation des produits de grande consommation en fin de vie se déploient de plus en plus, ce qui conduira au développement de procédures et d'activités de démantèlement. Une première validation de la pertinence de la démarche proposée (gestion des flux matière et d'informations entre les procédés et les parties prenantes, paramètres, activités) et été effectuée par comparaison avec la procédure de démantèlement de véhicules automobile défini par un groupement professionnel [20], (figure 4). L'analyse des liens entre les deux modèles a permis de montrer que l'ensemble des informations utiles et activités définies dans la procédure étaient bien identifié dans notre démarche (Tableau 5). Cette validation n'est que partielle, en effet compte tenu du manque de données réelles disponibles sur les incertitudes avérées et potentielles, nous n'avons pas encore permis d'approfondir ce point.

Démarche proposée	**Processus démentellement automobile [20]**
Activités:	
Collecter les infos	Reusable parts - inspection
	Automotive recycling information center
Capitaliser l'expérience	Automotive recycling information center
Séparer	Shredder
	Magnétique separation
	Eddy current separation
Sorties:	
Sortie de séparer: flux de matériau	Shredder
	Magnetic separation
	Eddy current separation
Sortie de nettoyer : déchets	ASR-Landfill
Sortie de trier: composant à recycler	Plastic parts, glass parts, ferrous metals, non-
Sortie de trier: composant à reconditionner	Reusable parts
Supports - ressources:	
Activité: collecter les informations	Vehicule owners, collectors
Activité: analyser	Vehicule owners, collectors
Activité: séparer	Collectors, dismantlers
Activité: nettoyer	Collectors, dismantlers
Activité: trier	Collectors, dismantlers
Activité: capitaliser	Manufacturers, collectors, dismantlers

Tableau 5. VALIDATION DE LA DEMARCHE : LIEN MODELE PROPOSE – PROCEDURE INDUSTRIELLE

Les technologies d'interface avec l'Homme (interface haptique, réalité virtuelle et augmentée, ...) constituent des pistes à explorer pour aider l'opérateur dans ses actions d'évaluation et de prise de décision.

L'approche proposée porte sur une première étape d'analyse de la problématique, par l'identification des activités fondamentales auxquelles seront attachées les paramètres de qualification de la santé- sécurité. La quantification qui devra suivre doit permettre d'obtenir des indicateurs sur la conduite du processus de démantèlement.

Pour l'évaluation du risque de démantèlement d'un produit inconnu, le modèle propose une démarche de démantèlement associée à l'évaluation du risque. Ces deux phases font une boucle fermée permettant une proposition pertinente du plan de démantèlement. Pour un produit qui est systématiquement étudié pour son démantèlement ce modèle sert à représenter et affiner les facteurs essentiels et de capitaliser les connaissances pour une utilisation efficace quel que soit l'expérience des opérateurs.

De plus très peu de données sont disponibles sur les aspects santé – sécurité. La validation de l'approche sera à approfondir sur des cas industriels. L'identification de méthodes et outils d'estimation et du traitement des imprécisions et des incertitudes pour ce type d'application serait à développer.

REMERCIEMENTS

Ce projet s'inscrit dans le cadre du laboratoire LC2S (Laboratoire mixte pour la conception sûre de situations de travail) soutenu par l'INRS et le LCFC / ENSAM dont l'objectif est de fournir aux concepteurs d'équipements de travail une démarche structurée et outillée pour passer de la conception de systèmes techniques à la conception des situations de travail pour concilier performance et prévention des risques professionnels.

VI. REFERENCES

[1] EUROPEAN FACTORY OF THE FUTURE ASSOCIATION: Effra vision for a manufacturing partnership in Horizon Europe, 2019, www.effra.eu

[2] WORLD MANUFACTURING FORUM, recommendations for the Future of Manufacturing, 2018, https://www.worldmanufacturingforum.org/

[3] P. VELTZ, T. WEIL L'industrie, notre avenir, La Fabrique de l'Industrie, Eyrolles, ISBN : 978-2-212-56115-9, 2015

[4] FUTURPROD: Les systèmes de production du futur, Atelier de Réflexion Prospective de l'ANR, 2013, www.cluster-gospi.fr,

[5] EU: Industry 5.0: Towards more sustainable, resilient and human-centric industry https://ec.europa.eu/info/news/industry-50-towards-more-sustainable-resilient-and-human-centric-industry-2021-jan-07_en

[6] BUSINESS ACT GRAND EST, 2020, https://www.grandest-ba.fr/

[7] S. NAHAVANDI, Industry 5.0 – A human centric solution, MDPI journal, 2019 www.mdpi.com/journal/sustainability

[8] Décret n° 2011-153 du 4 février 2011 portant diverses dispositions d'adaptation au droit communautaire en matière de gestion des véhicules hors d'usage et des déchets d'équipements électriques et électroniques

[9] RAHMAN S.M., PERRY N., MULLER J., KIM J.J. , LARATTE B.,,. End-of-Life in Industry 4.0: Ignored as before?. Resources Conservation and Recycling, 2020 154. 10.1016/j.resconrec.2019.104539.

[10] T. AVEN, (2008), "A semi-quantitative approach to risk analysis, as an alternative to QRAs". Reliability Engineering & System Safety, Volume 93, Issue 6.

[11] N. DE GALVEZ, J. MARSOT, P. MARTIN, A. SIADAT, A. ETIENNE, A new approach to hazard

identification during the design process by analysing energy transfers. Safety Science, 95, Elsevier, 2017, pp. 1–14.
[12] J.C. GOMEZ ECHEVERRI, X. GODOT B. DAILLE-LEFEVRE, J.H. MORALES ARISTIZABAL, P. MARTIN. Prise en compte de la santé-sécurité dans la conception et l'exploitation des systèmes reconfigurables, MOSIM'20 : 13ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation-– 12 au 14 novembre 2020
[13] ANSES (Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail) : Prise en compte de l'incertitude en évaluation des risques : revue de la littérature, 2016, 90p.
[14] D. J. PONS, J. K. RAINE. Design with uncertain qualitative variables under imperfect knowledge, IEEE Engineering Management Review, IEEE, sept.2007, 35(3):92-92.
[15] T. TOLIO, A. BERNARD, M. COLLEDANI, M., KARA, S., Seliger, G., Duflou, J.,Takata, S.. Design, management and control of demanufacturing and remanufacturing systems. CIRP Annals, 66 (2), 2017, 585–609. doi:10.1016/j.cirp.2017.05.001
[16] P. VANEGAS, J.R. PEETERS, D. CATTRYSSE, P. .TECCHIO, F. ARDENTE, F. MATHIEUX, J.R. DUFLOU, Ease of disassembly of products to support circular economy strategies. Resources, Conservation and Recycling, 135, 2018, 323–334
[17] Kaya, M.. Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. Waste Management, 57, 2016 64–90. doi:10.1016/j.wasman.2016.08.004
[18] I. Nurul Hannal, P. Zwolinski, G. Mandil, D. Brissaud, Decision Making System for Designing Products and Production Systems for Remanufacturing Activities, CIRP LCE Conference, 2017, Kamakura, Japan. pp.Pages 212-217,
[19] M. GALINIER, P. SAULENT, SADT, un langage pour communiquer - Editions EYROLLES, Paris, 1989.
[20] J. LI,, K. YU, P. GAO, (2014). Recycling and pollution control of the End of Life Vehicles in China, Journal of Material Cycles and Waste Management, 16(1), (201431–38. doi:10.1007/s10163-013-0226-6
[21] Norme EN 1005-2 -2003, Sécurité des machines, performance physiques humaines

Session 3-A : Innovations pédagogiques

Tumble it

Développement et mis en œuvre d'une étude de cas explicitant le Principe Fondamental de la Statique dans le cadre d'une phase d'Apprentissage Par Problèmes en Licence 1

Pascal LEVEL
UPHF – INSA Hauts-de-France
Laboratoire De Visu
Campus du Mont Houy
59313 VALENCIENNES Cedex 9
pascal.level@uphf.fr

Jean-Dominique GUERIN
UPHF – INSA Hauts-de-France
LAMIH UMR CNRS 8201
Campus du Mont Houy
59313 VALENCIENNES Cedex 9
Jean-dominique.guerin@uphf.fr

Résumé

Cette communication décrit un dispositif innovant d'enseignement de la mécanique pour les néo entrant dans notre université. Par innovant, il faut entendre ici qu'il s'agissait, pour notre établissement à la rentrée 2019-2020, d'une véritable rupture par rapport à la situation précédente. L'innovation de rupture portait sur deux points : le programme et les modalités d'enseignements.
Le programme portait préalablement, et classiquement, sur la mécanique du point étendu en fin de programme à des solides très simples. Il a été décidé que tous les étudiants débuteraient désormais par une approche mécanique du solide en progressant de la statique à la dynamique de façon à pouvoir illustrer les principes fondamentaux à l'aide de cas pratiques dès leurs débuts. Seul le cas de la statique est décrit ici.
Ainsi, dès leur première heure de cours, les étudiants se sont vus confié l'étude d'un cas concret, ici le basculement d'une grue. Avec la mise en place d'une séquence d'enseignement en Apprentissage Par Projet (APP) ils ont progressivement été mis en situation d'analyser, comprendre et modéliser le phénomène de basculement. De façon très originale, ils disposaient, pour cela, d'une maquette physique, spécialement conçue à cet égard, et leur permettant d'expérimenter et de visualiser autant que de besoin. Un challenge est venu conclure cet APP. Les étudiants ont eu à résoudre un problème concret de basculement avec comparaison effective, en direct, de leurs prédictions au comportement réel du cas qui leur avait été confié.

Mots-clés : PFS, APP, basculement, Licence 1, statique.

I. INTRODUCTION

Après plusieurs années de réflexion au sein du département mécanique de l'Institut de Sciences et Techniques de Valenciennes[1] un dispositif nouveau et innovant d'enseignement de la mécanique a été mis en place à la rentrée universitaire 2019-2020. Comme il sera décrit dans la suite du texte, l'innovation porte tant sur le programme que sur les modalités d'enseignement et vient en rupture avec les pratiques qui prévalaient alors.

C'est bien d'un dispositif dont il fait cas dans cette communication et qui va y être décrit. Il intègre des aspects extrêmement divers tels que la pédagogie, le contexte administratif et réglementaire, la nature des bacheliers qui nous rejoignent, les objectifs de formation en mécanique sur plusieurs années et l'articulation des séquences d'enseignement qu'ils supposent, la professionnalisation, les ressources humaines, matérielles et techniques, les usages… autant de points de vue plus ou moins usuels qui ont conduit progressivement à sa définition et à sa mise en œuvre.

En matière d'innovation pédagogique, outre les modalités d'organisation humaine, temporelle et séquentielle qui vont être décrites, il est important de mentionner dès cette introduction que les ressources de conception et production dont disposait et dispose encore l'équipe d'enseignement ont permis d'imaginer de doter les étudiants de maquettes expérimentales.

Outils d'un enseignement adossé à des cas pratiques, ces maquettes ont, par leur existence, grandement influencé l'organisation même de l'APP et donc du dispositif global.

II. MISE EN SITUATION : CONTEXTE ET ENJEUX

A. Contexte

1) l'établissement, le public

Le dispositif APP décrit dans cette communication a été mis en place, à la rentrée 2019-2020 au sein de l'INSA Hauts-de-France, nouvellement crée par fusion de trois composantes de l'Université Polytechnique Hauts-de-France alors nouvellement créée. La réflexion préalable à cette mise en place a été conduite par les membres du département mécanique de l'ISTV, une des trois composantes mentionnées ci-dessus. Le

[1] Depuis la création de l'INSA Hauts-de-France, issue de la fusion de l'ENSIAME, l'ISTV et la FSMS, ce département a été consolidé dans le nouveau département mécanique de l'école.

dispositif, dans sa configuration actuelle, concerne uniquement les étudiants du cycle Licence sciences et techniques dont l'INSA HdF assure le développement et le fonctionnement en subsidiarité de l'UPHF.

Par définition, il concerne donc des étudiants (environ 250) inscrits en premier semestre de la première année d'études universitaires. Ces étudiants n'ont subi aucune sélection. Ils débutent un cycle universitaire avec, pour une grande partie d'entre eux, une idée vague voire inexistante des possibilités et filières qui leur sont offertes. Le premier semestre est un semestre quasiment indifférencié, construit pour leur permettre de se familiariser avec l'établissement et découvrir les possibilités qu'il leur offre.

2) Les enjeux

Les enjeux du dispositif décrit ici sont multiples. Il est positionné au début d'un cursus que beaucoup espèrent voir durer 5 ans. Un des objectifs principaux est d'éveiller les étudiants à l'ingénierie et aux disciplines et matières qui en relèvent dont ici la mécanique.

La conduite d'un projet d'ingénierie suppose, au-delà de la maîtrise scientifique et technique, de savoir travailler en groupe, savoir échanger et savoir communiquer. Arrivant pour la plupart du lycée, les étudiants concernés ont peu ou pas de culture du travail en commun avec leurs enseignants. Nous cherchons ici à les positionner dans une situation d'interaction avec ces derniers de façon à ce qu'ils prennent le plus rapidement possible cette habitude de travail dans leur parcours de formation. Ce qui est recherché dans leur relation au travail avec les enseignants doit l'être avec également avec les autres étudiants. Un troisième objectif est la mise en place de réflexes, attitudes et méthodes de travail en groupe, et plus généralement toutes les interactions utiles aux fins de résoudre un problème d'ingénierie « complexe ». S'adressant à tous les étudiants, quelles que soient leurs orientations futures, le dispositif totalement articulé autour de la mécanique du solide doit être mobilisateur et attractif pour tous. Il doit donc, entre autres, permettre d'établir des parallèles avec l'ingénierie dans des domaines très variés comme le génie civil, la mécatronique, l'informatique…

Bien qu'il cherche à répondre à des objectifs d'apprentissage de la conduite en groupe de projets actuels ou futurs en ingénierie, le dispositif n'en reste pas moins fondamentalement inscrit dans un cycle d'apprentissage de la mécanique qui pour certains étudiants durera 5 ans en s'orientant progressivement vers le génie mécanique. Cette inscription dans le temps long est à l'origine du passage d'un enseignement basé sur la mécanique du point à un enseignement de la mécanique du solide. Le dispositif doit permettre aux étudiants de se familiariser le plus vite possible avec une approche 3D, tant d'un point de vue cinématique que d'un point de vue de la description spatiale des actions mécaniques. Cela sous-entend la prise en compte des mouvements de rotation. Cette familiarisation rapide n'est pas neutre. Elle vise à permettre aux étudiants d'acquérir le vocabulaire, les réflexes, et attitudes permettant d'aborder sereinement les enseignements de mécanique qui se spécialisent dès la seconde année et d'éviter ainsi des périodes ultérieures où s'accumulent à la fois acquisition de concepts nouveaux et méthodologies de base.

Appropriation, travail de groupe, ingénierie, dialogue avec les enseignants, solide 3D, autant d'objectif et d'enjeux qui ont conduit à orienter le dispositif vers la mise en place d'un Apprentissage Par Projet (APP) au cours duquel une part importante sera donnée à la manipulation, à l'expérimentation, au tâtonnement, à la confrontation de l'observation aux résultats des modèles.

En cela le dispositif ne présente plus aujourd'hui une très grande originalité tant les expériences du type « la main à la pâte » ont permis de diffuser ces pratiques où l'on cherche à donner ou à avoir envie de comprendre après avoir constaté et observé.

III. Objectifs, modalites et sequencement des phases d'apprentissage du module

Les enjeux du module décrit ci-dessus trouvent un écho favorable et légitime dans une modalité d'apprentissage par problèmes. Les objectifs regroupés de façon synthétique dans le tableau 1 sont cruciaux de notre point de vue et représentent les prémices des qualités qu'il est souhaitable de voir germer et de cultiver dans nos cursus universitaires.

Objectifs de la mise en situation au travers de l'APP
Responsabilisation
Autonomie et auto-évaluation
Recherche individuelle/en groupe
Travail collaboratif et itératif
Manipulations autonomes
Motivation (Challenge)
Priorité à la curiosité et au questionnement

Tableau 1. Objectifs de la mise en situation en APP.

La responsabilisation de l'étudiant est ici favorisée par la mise en place d'un jeu de rôles qui alternativement permet à tous d'avoir une position de référent vis-à-vis du professeur et d'être mis en situation d'animer un petit groupe de travail. Ce jeu de rôle consiste à attribuer successivement aux étudiants les rôles : d'animateur, de « scribe » et de « maître du temps ». Dans la configuration initiale (hors crise sanitaire COVID), tout étudiant de l'équipe, constituée de 4 à 5 individus, a accès à la manipulation (« main à la pâte » pour tous).

Le contenu et l'organisation de l'APP permettent d'une part à l'étudiant de revoir et d'expliciter des notions de base, par des

recherches individuelles consolidées en groupe et, d'autre part, d'alterner quotidiennement travail en autonomie et vis-à-vis pédagogique, pour notamment aborder les notions connexes (Tableau 2). Ce travail, collaboratif et itératif, articulé sur un triplet étudiant/groupe/enseignant est selon nous très formateur, tout particulièrement pour des apprenants qui se destinent à l'ingénierie.

Notion de base	Notion connexe à acquérir
Repérage dans l'espace	
Vecteurs	Calculs vectoriels
Référentiel	Paramétrage
Actions mécaniques : forces, moment	Actions mécaniques extérieures
Equations analytiques, paramétriques	Résolution numérique (tableur)
Trigonométrie	
Centre de gravité	Polygone de sustentation (droite, triangle)
Equilibre	PFS
Hors équilibre	Basculement, instabilité
Solides indéformables	Système matériel, actions mécaniques internes
Mesures expérimentales	Incertitudes

Tableau 2. Notions de base et notions connexes à acquérir durant l'APP.

Le module est organisé sur 15 jours, l'étudiant étant mobilisé quasi-exclusivement sur la discipline. Cette organisation engendre une certaine sérénité de l'apprenant, lui permettant de se concentrer sur l'APP. La promotion est scindée en groupe d'environ 20 étudiants, le groupe donnant naissance à 4 ou 5 équipes qui selon les activités sont invitées à collaborer ou à être mises en légère concurrence. Un séquencement strict du module permet la réalisation des différentes étapes de façon coordonnée (Tableau 3).

Etape	Descriptif	Livrable/évaluation
1	Mise en contexte (grue)	s/o
2	Règles & modalités APP	s/o
3	Travail d'analyse et d'expérimentation + exercices en autonomie	CR Moodle
4	Evaluation individuelle	QCM
5	Enoncé Challenge	s/o
6	Challenge	Concours

Tableau 3. Séquencement de l'APP et livrables associés

L'évaluation des activités de l'équipe d'étudiants est réalisée dans un premier temps au travers des compte-rendus déposés quotidiennement sur la plateforme Moodle et, dans un second temps, sur le challenge. Le challenge non détaillé dans ce document consiste à prédire le basculement plan d'une structure représentant une grue. L'évaluation des activités individuelles est réalisée par un contrôle sous la forme d'un QCM conçu via Moodle, avec les avantages de permettre une évaluation simultanée à distance et une correction rapide. Un bonus/malus (± 1 point) reste attribuable par l'enseignant de façon individuelle (Une évaluation individuelle de chaque rôle pris est possible mais non mise en pratique ni expérimentée à ce jour).

IV. Etude de cas : le Tumble it

A. *Mise en situation*

Une maquette « fil rouge » a été spécialement conçue pour ce module. Ce démonstrateur dénommé *Tumble it* [renverse-le] permet d'expliciter une rupture d'équilibre correspondant au basculement d'un portique. Les deux objectifs principaux sont ici de mettre en défaut le Principe Fondamental de la Statique, afin d'en comprendre les tenants et aboutissants, et de traiter un problème 3D simple, multi-paramétrable et suffisamment riche du point de vue pédagogique.

Les manipulations sont facilitées par une maquette très accessible (conçue spécifiquement) tant au niveau de la prise en main (de la mécanique, rien que de la mécanique) qu'au niveau des notions/évidences qu'elle permet d'expliciter. De par une mise à disposition d'outils « rudimentaires », le travail expérimental demandé et/ou suggéré est tout spécialement propice à favoriser la curiosité et le questionnement. Le tableau 4 reprend l'ensemble de matériels mis à disposition de chaque équipe d'étudiants.

Trousseau de l'étudiant pour la manipulation sur le démonstrateur *Tumble it (1 par équipe)*	
1 portique « Tumble it »	1 feuille de papier A2
1 Poids + chaine (1 Kg)	1 planche format A2
Feutres de couleur	1 fil à plomb
1 réglet (50 cm)	

Tableau 4. Ensemble de matériels mis à disposition.

B. *Description de l'étude de cas, Conception et réalisation des maquettes*

Tumble it est un portique, une potence modulable sur 3 appuis simples, ayant les caractéristiques/particularités suivantes :

- Positions des appuis paramétrables (ouverture du compas, …),
- Point de fixation de la charge modulable (charge limite environ de 2 Kg),
- Dispositifs de blocage par serrage des positions angulaires,

- Hormis l'interface de fixation en partie centrale basse, les éléments de structure sont en acier.

La figure 1 donne une vue CAO du dispositif. Le choix de l'acier pour les éléments de structure est justifié par la recherche d'une bonne rigidité -l'étudiant ne comprendrait pas que l'on s'éloigne trop des hypothèses du solide indéformable- et de par une influence marquée de la position (décalage par rapport à l'axe vertical) du centre de gravité du système (c'est l'étudiant qui au travers de ses mesures expérimentales met en évidence cette influence).

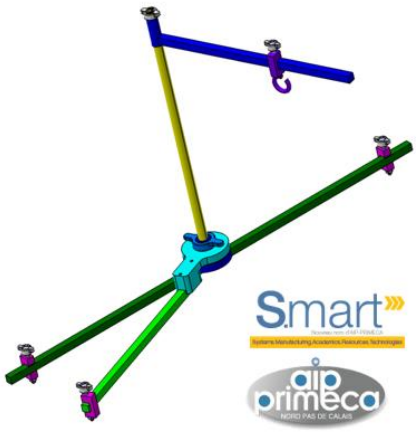


Figure 1. *Tumble it* : vue CAO en phase de basculement

Lors des manipulations, les positions angulaires sont reportées et/ou projetées -à l'aide du fil à plomb- sur la feuille de papier. L'étudiant est à même de déterminer les angles par mesures et calculs trigonométriques (chaque équipe dispose d'un réglet et est incitée à fabriquer une équerre en recourant aux pliages d'une feuille de papier)

Les maquettes (démonstrateur *Tumble it* et maquettes du challenge) ont été conçues et réalisées avec le support du pôle AIP-PRIMECA S-mart Nord-Pas de Calais via la plateforme de Valenciennes. Les moyens humains et matériels mis en œuvre autour de ce projet ont grandement contribués à sa réussite. Les maquettes dans ce contexte sont peu onéreuses et peuvent être reproduites en petites séries.

V. RETOUR D'EXPERIENCE

L'expérience peut être observée selon plusieurs points de vue. Concernant celui de la structure d'enseignement, il est impossible de le relater ici. L'équipe dirigeante qui avait fortement appuyé la mise en place de l'APP a été depuis remplacée par une équipe dont les préoccupations actuelles sont plus centrées sur le démarrage de la nouvelle structure sous pavillon INSA que les dispositifs pédagogiques.
La conception puis la réalisation opérationnelle des deux premières années sont le travail de toute une équipe. S'agissant d'une expérience nouvelle, le groupe d'intervenants a su rester mobilisé avec un débriefing/briefing chaque jour après que les étudiants aient fini leur séance. La confrontation journalière des vécus et ressentis, dépendant de chaque enseignant mais également de la nature du groupe qui lui avait été confié, a permis d'adapter le dispositif « en live ». Ce dernier s'est donc révélé suffisamment robuste et résilient pour supporter des modifications et adaptations au jour le jour. Au-delà des adaptations fonctionnelles et conjoncturelles que l'on peut aisément imaginer, il est important de noter que sur le fond, le travail continu d'adaptation a permis à l'équipe enseignante d'épurer la formule selon ses attentes en termes de notions et concepts à acquérir par les étudiants.
En ce qui concerne les étudiants, premiers destinataires du dispositif, ils ont exprimé leur satisfaction globale via une enquête réalisée en fin d'APP. Ils ont été un peu surpris par l'immersion totale et exclusive dans un environnement mécanique dès la rentrée mais s'y sont adapté extrêmement bien. Ils ont profité de cette immersion pour développer des stratégies de groupe continues avec, par exemple, la mise en évidence de compétences individuelles et l'exploitation de ces compétences au profit de l'ensemble.
Si on adopte le vocabulaire classique d'un APP, nous pouvons affirmer que le savoir être de ces étudiants a progressé et qu'ils se sont inscrit également dans une attitude de savoir agir, notamment lorsqu'il s'est agi de participer au challenge final avec découverte du sujet à J-1 pour une confrontation des résultats de leurs prédictions calculées au comportement réel le jour J. 100% des équipes ont été en situation de proposer une prédiction dont presque toutes étaient correctes. De façon encore plus significative, les quelques équipes pour lesquelles ce n'étaient pas le cas, ont été capables de réagir en direct, d'identifier la ou les sources d'erreurs et de soumettre une solution correcte dans la demi-heure qui a suivi leur premier « échec ».
En matière de savoir et de savoir-faire, nous pouvons en outre observer, depuis la rentrée 2020-2021, les apports en seconde année pour ceux qui sont passés dans le dispositif l'année dernière (2019-2020). Assez clairement, les savoirs sont renforcés par rapport aux promotions précédentes. Ils ont une vision plus globale de la réalité d'un problème de mécanique, sont moins craintifs quant à la difficulté supposée et en conséquence mettent plus aisément en place une démarche de résolution cohérente. Ils ont surtout une base de reflexes d'analyse plus solide et sont globalement capables de la mobiliser. Enfin, même si cela peut sembler anecdotique, certains d'entre eux proposent systématiquement une numérisation de la solution en recourant à un tableur.
Un indicateur factuel est l'augmentation du nombre d'étudiants choisissant l'option mécanique dans leur cursus de mathématiques ou de physique-chimie en seconde année par comparaison aux années précédentes.

VI. Conclusions et perspectives

Après plusieurs années de réflexion au sein de l'équipe enseignante en mécanique, une profonde modification du programme d'étude destiné aux néo entrants en licence dans notre cycle scientifique a été mise en œuvre à la rentrée 2020-2021. Sur le fond, la réforme consiste à aborder la mécanique via l'étude du comportement des solides en se substituant à l'approche précédente classique adossée à la mécanique du point. Sur la forme, l'ensemble de l'enseignement est organisé en APP (Approche Par les Problèmes) avec une immersion totale et exclusive des étudiants dès la rentrée.

Appelés à résoudre un problème concret, ici le basculement d'une grue de manutention, les étudiants disposent, de façon très originale, de maquettes physiques paramétrables leur permettant, par la manipulation, de caractériser le phénomène de basculement, de le quantifier expérimentalement et de se doter d'une base de comparaison objective pour leurs futurs résultats théoriques. La séquence d'enseignement se termine par un challenge, commun à tous les étudiants, où les étudiants découvrent les paramètres d'un problème réel de basculement de grue avec 24h de modélisation et de résolution avant confrontation de leurs prédictions au comportement réel.

Globalement, on peut affirmer que, passé l'effet de surprise d'une immersion totale en mécanique dès leurs premières semaines universitaires, les étudiants adhèrent au projet, se prêtent au jeu et acquièrent, des savoirs, savoir être et savoir-faire indéniables selon la trilogie désormais classique. La mise en situation de challenge démontre également l'acquisition d'un savoir agir.

Tous ces savoirs et attitudes sont décelables dès la deuxième année avec clairement une moindre crainte des étudiants quant à la résolution de problèmes mécaniques à complexité croissante.

Seule la partie « statique » de l'APP a été présentée sans cette communication. La cinématique, la cinétique et la dynamique ont été abordées selon des modalités similaires tout le reste de l'année mais cependant en mode temporel diffus. La suite de cette première année d'APP a donc été impactée par les mesures liées à la crise du COVID. L'équipe enseignante, restée très mobilisée, est dès lors passée assez aisément à un mode d'encadrement en distanciel pur tendant à démontrer ainsi la flexibilité et la robustesse de l'approche.

Aujourd'hui aucun membre de l'équipe enseignante en mécanique n'a émis le souhait d'un retour en arrière.

Hors la nécessaire consolidation des acquis et méthodes, les perspectives sont nombreuses. Elles concernent l'évolution de la maquette de basculement vers une plus grande modularité avec, si besoin, la capacité de mettre en évidence l'influence de la position du centre des inerties. Elle concerne également et déjà la recherche d'autres sujets d'étude mécanique compatibles.

D'ores et déjà, une extrapolation à l'enseignement des bases de la mécatronique est en réflexion.

Enfin la robustesse de l'approche nous laisse également penser qu'elle pourrait être le support du développement d'un mode d'enseignement hybride présentiel/distanciel utilisant un plus large éventail de technologies numériques.

VII. Remerciements

Nous tenons à remercier l'équipe enseignante pour sa contribution : MM. Fabien BECHET, Bruno BENNANI, André DUBOIS, Yassine EL ATTAOUI, Oussama FILALI, Grégory HAUGOU, Bertrand LALLEMAND, Nicolas LECONTE, Tarik SADAT, Jérémy SADET et David UYSTEPRUYST. Nous remercions aussi le pôle AIP-PRIMECA S-mart Nord-Pas de Calais, tout particulièrement M. Frédéric MOREAU pour sa contribution à la conception et réalisation des maquettes. Enfin, nous faisons une amicale dédicace à notre collègue Elisée LEROY, aujourd'hui retraité, fervent défenseur de la mécanique universitaire, qui par son enthousiasme, sa dévotion et sa dynamique « fluide et solide » nous a inspiré ce travail.

VIII. Annexes

A. *Paramétrage, mise en équation et résolution*

On considère le système mécanique représenté en figure A1. Il s'agit d'un portique appelé «Tumble it» articulé en B, composé de solides (poutres) considérés ici comme indéformables. Il a été spécialement conçu pour étudier les conditions d'équilibre et de basculement d'un système. L'analyse du système mécanique est réalisée dans le repère orthonormé $\mathcal{R}(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})$

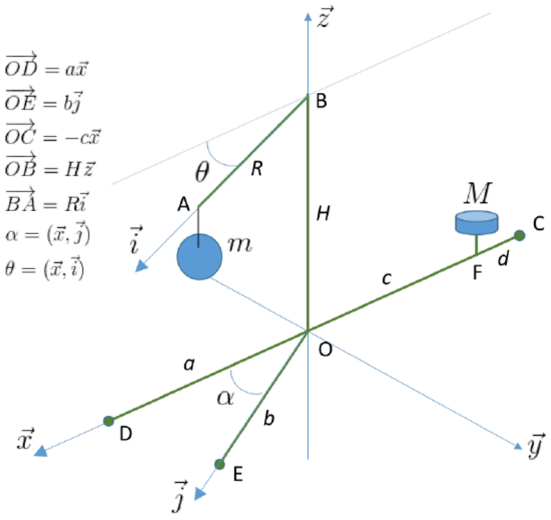


Figure A1. *Tumble it* : schéma de principe du portique

Le paramétrage proposé est propice à une relative simplification de expressions vectorielles et scalaires à déterminer, les principaux paramètres étant :

a, b, c	les distances respectives du point O au trois points d'appui D, E et C
H	la distance (hauteur) du point O au point B
R	la distance (rayon) du point B au point A
α	l'angle d'appui (OD,OE)
θ	l'angle de déport (OD,BA)

Des vecteurs de base i et j sont introduits pour effectuer plus facilement les changements de base nécessaires, ils ne sont toutefois pas indispensables à la résolution du problème pour des étudiants en Licence 1.
La possibilité d'ajouter un contre-poids *M* est envisagée de façon à permettre une éventuelle modulation de la position du centre de gravité du système. Une extension future du dispositif expérimental pourrait permettre de positionner ce contre-poids sur un arc de cercle de rayon *c* centré en O.

La mise en équation résulte de la mise en œuvre du Principe Fondamental de la Statique selon la procédure décrite en Figure A2. A noter qu'il a été jugé préférable de ne pas introduire à ce stade (début du premier semestre – Licence 1) le formalisme lié au Torseur d'actions mécaniques. Ce formalisme sera introduit dans les modules suivants du cursus.

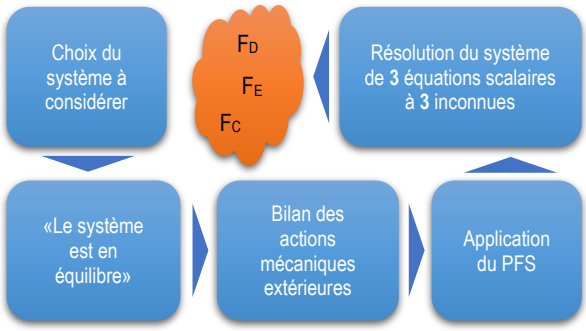


Figure A2. Démarche « classique » de résolution

L'objectif ici est de déterminer les actions mécaniques aux appuis (considérés ici comme ponctuels) à partir des trois équations scalaires issues de l'application du PFS (une issue du théorème de la résultante en *z* ; deux issues du théorème du moment en *y* et en *x*). Les expressions paramétriques des actions mécaniques (PFS en C) s'expriment comme suit[2] :

$$F_E = F_E\left(m, g, R, \tilde{\theta}, b, \alpha\right)$$

$$F_D = F_D\left(F_E, m, M, g, R, \tilde{\theta}, a, b, c, d, \alpha\right)$$

$$F_C = F_C\left(F_E, F_D, m, M, g\right)$$

Pour une masse *m* suspendue connue et un contre-poids fixé *M*, on peut facilement mettre en évidence le basculement en observant le signe des composantes des actions mécaniques aux points C, D et E. En fait si toutes les composantes sont positives, le système est en équilibre stable. Si par contre l'une des composantes est négative, il y a rupture d'équilibre et basculement du système. La figure A3 illustre les conditions d'équilibre suivant les valeurs de l'angle θ pour une configuration donnée pour des caractéristiques fictives (hors de portée des capacités de la maquette actuelle).

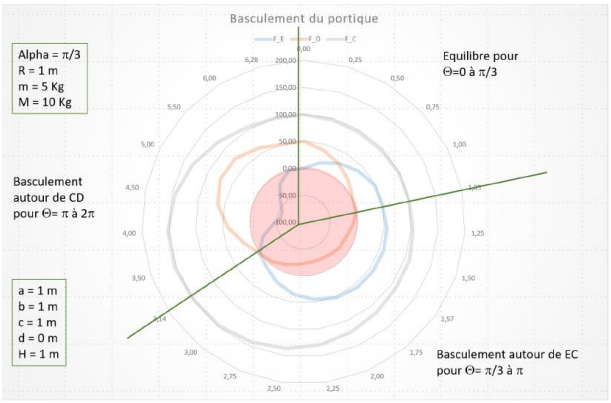


Figure A3. Illustration des configurations de basculement (zone de basculement en rouge)

B. *Exemple d'un livrable produit*

L'un des livrables qui a été source de nombreuses inspirations et de quelques inquiétudes, sans doute puisqu'il s'agissait du premier de la série demandée aux étudiants, est justement le tracé des configurations de basculement du portique *Tumble it*. La figure B1 reprend pour exemple le document fourni par l'une des équipes.

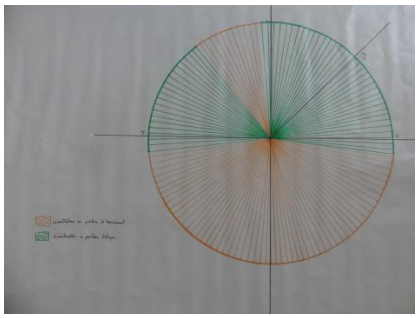


Figure B1. Tracé des configurations de basculement par une équipe d'étudiants (zone de basculement en rouge)

[2] Les expressions analytiques ne sont pas fournies dans ce document de façon à ne pas « divulgacher » les résultats, dans la mesure où ce manuscrit est susceptible d'être accessible pour les étudiants. Ces expressions seront bien entendu fournies aux collègues sur simple demande aux auteurs.

Ingénierie pédagogique d'un module international

Retour d'expérience d'un projet européen confronté à la crise COVID-19

Dominique Deneux, François Proriol
INSA Hauts-de-France, Le Mont-Houy
Valenciennes Cedex 9, France
dominique.deneux@uphf.fr

Lisa Raab, Christian Götz, Klaus Homann
DHBW Stuttgart, Jägerstrasse 56,
70174 Stuttgart, Allemagne
lisa.raab / christian.goetz@dhbw-stuttgart.de

Robin Westacott
Heriot-Watt University
Edinburgh, EH14 4AS, Royaume-Uni
robin.westacott@hwu.uk

Jorma Säteri, Markku Leino
Metropolia University of Applied Sciences
Myllypurontie 1, 00920 Helsinki, Finlande
jorma.sateri@metropolia.fi

Résumé— Cette communication vise à diffuser les premiers résultats d'un projet de partenariat stratégique Erasmus+ (2018-1-DE1-KA203-00423) réalisé entre septembre 2018 et août 2021 par 4 universités européennes de sciences appliquées. Le projet InT#Tech (International Transfer of cooperative study programmes in Europe) a pour objectif de développer un module international dédié aux apprentis ingénieurs, axé sur la transformation digitale en ingénierie. Après avoir comparé les différents modèles d'alternance, identifié les attentes communes et expérimenté un premier niveau de coopération (une université d'été), la tâche la plus délicate du projet fut d'imaginer, développer et mettre en œuvre une unité d'enseignement innovante valant 5 crédits ECTS, en contexte de crise sanitaire mondiale. Le document détaille la démarche d'ingénierie pédagogique de cette unité d'enseignement pensée en distantiel par la force des événements de 2020.

Pédagogie, Alternance, International, Transformation digitale, Données massives.

I. INTRODUCTION

La transformation digitale de la société est désormais évidente pour tout le monde. Les achats commerciaux, les opérations bancaires, la recherche de services et même l'interaction avec l'administration publique se font majoritairement en ligne. En ingénierie, la réalité virtuelle est utilisée pour optimiser les performances des futurs produits sur la base de leur maquette numérique, tandis que la réalité augmentée accroît le volume d'informations émises par les artefacts physiques du monde réel. Le monde physique et le monde numérique interagissent de plus en plus l'un avec l'autre, rapprochant toujours plus le jumeau numérique de son modèle réel. Les produits, les véhicules, les machines et les installations sont tous affectés. Dans l'industrie, les robots prennent le relais dans les usines intelligentes, les systèmes d'exécution de la fabrication contrôlent la planification et la supervision des processus automatisés répartis dynamiquement sur des cellules flexibles contrôlées par des capteurs intelligents. Le monde industriel est confronté à une transformation digitale exponentielle. Dans ce contexte, les Ecoles et les instituts de sciences doivent préparer les futurs cadres de l'industrie à prendre en charge immédiatement cette transformation, au moyen de toutes nouvelles aptitudes (« skills 4.0 »), qui nécessitent de maîtriser à la fois les enjeux de terrain et les potentiels d'innovations. De nombreux pays, en particulier en Europe, développent pour cela les formations en alternance dans l'enseignement supérieur. Ce système apporte conjointement aux apprenants des compétences en techniques numériques innovantes et l'expérience du contexte industriel dans lequel ils sont appelés à les mettre en œuvre. Il offre des avantages significatifs pour toutes les parties prenantes: entreprises, apprentis, instituts, mais aussi pour les territoires où ces rencontres se produisent. Pour les entreprises, les programmes d'enseignement en alternance sont une réponse à l'évolution démographique et à la pénurie de travailleurs hautement qualifiés. Pour les apprentis, les programmes en alternance offrent un enseignement supérieur de qualité axé sur les compétences de terrain, combiné à un travail rémunéré en entreprise et à la démonstration permanente et in-situ des acquis de l'expérience. Pour les instituts, il offre la possibilité de développer de nouveaux programmes d'études et d'adapter l'offre de formation aux enjeux locaux. Les régions augmentent d'autant plus leur attractivité vis-à-vis des jeunes à former que de nombreuses formations qualifiantes en étroite relation avec des emplois locaux de qualité sont disponibles. La mondialisation des pratiques industrielles représente cependant un sérieux défi pour les programmes de formation en alternance, qui doivent aussi intégrer une formation au travail en contexte international. Il peut sembler facile de développer des échanges bilatéraux entre instituts européennes partenaires, mais en ce qui concerne spécifiquement l'alternance, les premières tâches du projet InT#Tech ont révélé l'ampleur des défis.

II. DEFIS DE L'INTERNATIONALISATION POUR L'ALTERNANCE

A. Etudes supérieures d'ingénierie en alternance

Les étapes de mise en œuvre des programmes d'études en alternance et les niveaux de coopération entre les entreprises et les instituts diffèrent selon les pays. En Europe, trois modèles d'alternance prédominent actuellement. Les programmes doubles avec une composante d'expérience professionnelle combinent un programme d'études avec des phases pratiques prolongées chez un employeur. Les apprenants obtiennent un

diplôme universitaire, mais pas une qualification professionnelle reconnue. Un programme dual avec une composante d'emploi s'adresse en priorité aux personnes ayant déjà suivi une formation professionnelle et/ou disposant déjà de plusieurs années d'expérience. Il est conçu pour offrir un développement professionnel plus poussé et combine un programme d'études et une expérience professionnelle en rapport direct avec le contenu académique. Les apprenants peuvent s'inscrire à ce type de cours sans avoir besoin d'obtenir un diplôme. Un programme dual avec composante de formation combine un programme d'études avec une formation à un métier reconnu. En plus du diplôme, les étudiants obtiennent une qualification professionnelle officielle. Dans ce modèle, la coopération entre le monde académique et les entreprises est renforcée. C'est le modèle concerné par la présente communication, en particulier aux niveaux Licence 3 ou Master 1, lorsque le profil académique et les compétences professionnelles ont atteint un niveau de maturité suffisant pour envisager le volet de l'internationalisation.

B. Internationalisation de l'alternance

Indépendamment du modèle d'étude, il existe plusieurs difficultés dans le développement et la mise en œuvre de programmes en alternance au niveau international. D'une part, la période que les étudiants passent à l'étranger doit être discutée non seulement au sein des instituts, mais aussi avec les entreprises partenaires. Il en résulte de nombreux modèles, déjà rien qu'en France, mais a fortiori dans les différents pays européens. Un modèle de coopération approprié doit être trouvé dans chaque cas et être réglementé de manière compatible par un accord de coopération. En outre, les apprentis doivent tenir compte des exigences et des attentes de leur entreprise dans leur pays d'origine lorsqu'ils choisissent leur séjour à l'étranger. Toutes les entreprises ne montrent pas une extrême bienveillance pour les stages à l'étranger de leurs apprentis. Elles peuvent craindre un risque de fuite de propriété intellectuelle. La durée du séjour à l'étranger dans le cadre des programmes d'ingénieurs en alternance est généralement limitée à quelques semaines (12 semaines minimum pour satisfaire aux exigences actuelles de la Commission des Titres d'Ingénieur). Même courte, cette période perturbe forcément le déroulement de l'activité en entreprise de l'apprenti. Un découpage en très courtes périodes qui se cumuleraient atténue ce problème, mais l'aspect financier devient alors un obstacle. Il n'existe actuellement aucun programme de bourses d'études en Europe adapté au cas de très courtes mobilités. S'il s'agit de mobilité académique de courte durée, un autre point important est la reconnaissance des résultats académiques obtenus à l'étranger. Là encore, il n'existe pas de procédure normalisée au niveau de l'UE (Unité d'Enseignement), à l'exception de l'ECTS (European Credit Transfer System), chaque crédit valant un effort de travail significatif (30 crédits par semestre pour une formation à temps plein). En outre, il existe des différences significatives entre les instituts du consortium en termes de rythme d'alternance et de programmes d'enseignements (de la demi-semaine à l'INSA-HdF jusqu'au trimestre, à la DHBW). Or la coopération internationale nécessite une synchronisation des rythmes d'alternance.

C. Comparaison des 4 modèles d'alternance des partenaires

Avant d'essayer de mettre en place une unité d'enseignement en collaboration, il était nécessaire pour les partenaires de comprendre les modèles d'alternance des autres afin d'identifier les obstacles et les opportunités. Deux tâches du projet ont été consacrées à cette fin. La première était axée sur l'identification des modèles d'alternance eux-mêmes, la seconde sur la comparaison des modèles de coopération entre les entreprises, les instituts et les apprentis.

1) Différents modèles d'alternance

Les modèles d'alternance chez les partenaires du projet dépendent fortement de la maturité des pratiques d'alternance dans le pays ou la région où ils sont appliqués, ainsi que de l'expérience de chaque partenaire dans leur mise en œuvre. Si la formation en alternance est une tradition bien ancrée en Allemagne [1], notamment dans le Baden Württemberg (34000 étudiants par an en alternance à la DHBW), elle est également bien implantée dans les écoles d'ingénieurs en France [2], suite au "rapport Decomps" de 1989 et à l'initiative, en 1990, du réseau ITII (Institut des techniques d'Ingénieurs de l'Industrie): 2500 diplômés par an), alors qu'il n'est qu'émergent à l'Université Heriot-Watt [3] et à Metropolia [4]. Afin d'effectuer un comparatif analytique précis des 4 partenaires, plusieurs thèmes ont été listés dans un long questionnaire complété par chaque partenaire. Les thèmes couvrent: l'identité, le cadre juridique, le modèle économique, les soutiens financiers, la relation avec le gouvernement et avec la région, l'impact sur le développement économique régional, les données et enquêtes disponibles, l'insertion professionnelle des diplômés, les spécificités des formations en alternance, le rythme d'alternance, le contrôle qualité et les points d'audit, le personnel, la mobilité internationale... Cette analyse comparative a été extrêmement utile pour les partenaires, en tant qu'enquête de lancement, et elle a révélé l'extrême variété des approches. Aucun des thèmes n'était susceptible d'être ajusté par un partenaire pour améliorer sa capacité à coopérer avec les autres, puisque les contraintes ont généralement une origine externe à l'institut.

2) Différents modèles de coopération avec les industriels

Afin d'englober tous les aspects d'un programme en alternance, le parcours de l'apprenti a été scruté suivant une approche « analyse du cycle de vie »: chaque phase du parcours a été analysée séparément, de manière à recueillir itérativement toutes les spécifications pertinentes. Cette fois, pour chaque phase du parcours d'un apprenti, chaque partenaire a été invité à décrire le rôle de son institut, le rôle de l'apprenti et le rôle de l'employeur, depuis le recrutement de l'apprenti jusqu'à ce qu'il exerce son métier (et éventuellement s'implique comme tuteur industriel d'autres apprentis ou enseignant vacataire dans l'institut qui l'a formé).

Les phases de la vie d'un apprenti (Figure 1) comprennent (1) être recruté (candidature et processus de sélection), (2) être formé (apprendre la théorie / apprendre la pratique / apprendre l'internationalisation), méthode de supervision / méthode de communication entre les 3 parties prenantes, (3) progresser jusqu'à obtenir son diplôme (évaluation des unités d'enseignement, de la pratique, des sessions, des semestres, de

la diplomation), (4) rejoindre le marché du travail (exercer son métier d'ingénieur et, éventuellement, enseigner à son tour).



Figure 1. CYCLE DE VIE DE L'APPRENTI

Après la collecte et la synthèse de nombreuses données provenant des 4 partenaires, les 4 modèles ont été évalués de 2 manières (I) et (II).

(I) les modèles ont été synthétisés (Figure 2) puis comparés 2 à 2 (Figure 3) pour mettre en évidence les similitudes et les différences qui peuvent avoir un impact sur la capacité des partenaires à collaborer, dans le cadre de l'internationalisation des programmes. Un exemple est présenté ci-après, en fonction de la phase du cycle de vie "être formé", sous-point "partie théorique en institut".

Partner	Student's role	Company's role	University's role
DHBW	Attend class 24 W/Y	Teach 60 % of courses	Teach 40 % of courses
INSA HdF	Attend class ½ W	Teach 20 % of courses	Teach 80 % of courses
HWU	Attend class 1 day/W		Teach 100 %
Metropolia	Attend class 28 W/Y	Teach 20%	Teach 80%

Figure 2. TABLEAU DE SYNTHESE DE « ETRE FORME DANS L'INSTITUT »

Estim. similarity	DHBW	INSA HdF	HWU	Metropolia
DHBW		**4**	2	2.5
INSA HdF	**4**		2	1.5
HWU	2	2		**1**
Metropolia	2.5	1.5	**1**	

Figure 3. COMPARAISON DES MODELES

Dans la Figure 3, les valeurs indiquées correspondent à la valeur moyenne d'une évaluation croisée : Estimation de la similarité = ½*(estimation de la similarité de A considérant B + estimation de la similarité de B considérant A). 0 signifie « complètement différent » et 5 signifie « identique ».

(II) Sur la base d'une liste de critères que les instituts, les apprentis et les entreprises souhaitent satisfaire au maximum, la performance de chaque modèle a été évaluée par les 3 autres partenaires (et par eux-mêmes, à des fins d'étalonnage), afin de favoriser l'émergence de recommandations aux universités désireuses de mettre en œuvre des programmes de coopération internationale. La courte liste de critères suivante a été sélectionnée : (pour les instituts) augmenter le nombre et la qualité des apprentis, augmenter le nombre de collaborations avec les entreprises ; (pour les entreprises) augmenter l'attrait pour les nouveaux talents, augmenter le savoir-faire du personnel ; (pour les apprentis) augmenter leur propre qualification et employabilité (expérience), augmenter leur revenu (salaire plus élevé, frais réduits). Les évaluations moyennes de l'impact de chaque élément du modèle sur les 6 critères ont été reportées sur des graphiques en radar. Un exemple (extrait) est présenté ci-après, qui compare l'impact du « processus de formation » de la DHBW et de l'INSA-HdF sur les 6 critères de satisfaction.

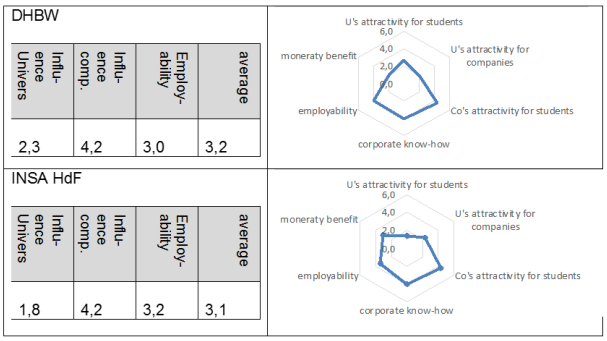


Figure 4. COMPARAISON MULTICRITERES DES PROCESSUS DE FORMATION DES PARTENAIRES DU CONSORTIUM

Les scores sur les graphiques en radar de la Figure 4 doivent être interprétés comme suit : 5 signifie que le modèle a un fort impact positif sur le critère. Le chiffre 0 signifie que le modèle n'a aucun impact sur le critère. Les scores ne correspondent pas du tout à un jugement de valeur sur les partenaires. Ils n'ont pas non plus l'intention de suggérer un quelconque classement. Si l'institut A obtient un score proche de 5 sur un critère, alors que l'institut B obtient un score proche de 0, cela ne signifie pas que l'institut A obtient de meilleurs résultats que l'institut B. Le contexte, la réglementation, les contraintes existantes ou non dans la région ou dans le pays, le modèle financier et social, l'expérience de l'enseignement coopératif sont autant de facteurs qui déterminent ce qui peut et ne peut pas être fait. Les critères que les auteurs ont utilisés pour comparer leurs programmes peuvent également être étendus ou modifiés. Pour d'autres modèles d'évaluation, les résultats seraient différents. Une note très positive pour un item, cependant, suggère que l'élément du modèle peut être recommandé comme bonne pratique pour établir un programme d'études coopératif, parce qu'il donne satisfaction à ses parties prenantes (apprentis, entreprise, institut). Cela signifie également que la coopération est étroite. Dans certains cas, une coopération étroite peut également entraîner des difficultés. Après avoir comparé tous les éléments et leurs impacts, le consortium a pu établir une liste de recommandations objectives.

D. Recommandations

Le processus de recrutement des apprentis peut apporter une satisfaction être maximisé par toutes les parties prenantes car chacune a une influence sur ce processus et peut prendre une décision. L'institut doit décider quel jeune elle souhaite recruter et avec quelles entreprises elle souhaite coopérer. L'entreprise doit décider quel apprenti elle souhaite former et dans quel institut il acquerra la théorie. L'apprenti doit décider du programme qu'il souhaite suivre et de l'entreprise dans laquelle il souhaite être formé en pratique.

Le rythme de l'alternance, qui est très différent dans chaque institut, n'influence pas le niveau de satisfaction du processus d'enseignement théorique. Ce processus influence principalement la satisfaction de l'institut. L'implication des industriels dans l'enseignement théorique, qui est généralisée dans chaque institut, semble être une bonne pratique. Le processus d'enseignement pratique influence principalement la satisfaction de l'entreprise, puisque la pratique est effectuée au sein de l'entreprise. La meilleure pratique semble être que les apprentis réalisent des projets de plus en plus difficiles dans l'entreprise, sous le contrôle étroit d'un maitre d'apprentissage de l'entreprise et l'approbation périodique du programme de travail pratique par l'institut partenaire.

Le facteur déterminant pour la satisfaction de tous les acteurs en matière d'internationalisation est le fait qu'un séjour à l'étranger soit recommandé (voire imposé) par le programme de formation, avec une période clairement identifiée. L'apprenti acquiert une expérience culturelle (généralement aussi linguistique), l'entreprise améliore son expertise en termes d'ouverture internationale, l'institut gagne en attractivité. La situation idéale est celle où un séjour à l'étranger est en cohérence avec l'activité de l'entreprise et les grands thèmes des programmes.

Une bonne pratique en matière de supervision s'observe lorsque l'institut participe au contrôle de l'activité de l'apprenti dans l'entreprise, par le biais de visites régulières, et lorsque l'entreprise participe également au contrôle de la progression académique de l'apprenti dans l'institut et est régulièrement invité à retrouver l'apprenti dans l'institut (réunion d'information ou participation aux présentations orales).

Malgré des mises en œuvre différentes de la communication entre les acteurs et des niveaux de contraintes différents dans le consortium, l'apprenti est souvent l'élément clé (la progression de l'apprenti est l'objet des échanges ; les apprentis organisent généralement les rencontres entre l'entreprise et l'institut). L'utilisation d'un serveur de données partagées standardisé, pour assurer la traçabilité de l'effectivité du suivi, peut être suggérée comme une bonne pratique.

La satisfaction maximale de toutes les parties, concernant le processus d'évaluation des pratiques, est obtenue lorsque l'activité industrielle est évalués à la fois par l'entreprise (évaluation des travaux et présentation écrite et/ou orale de ces travaux) et par l'institut (sur la base d'un rapport et/ou d'une présentation orale des travaux). L'auto-évaluation par l'apprenti peut également être recommandée, en plus, comme une bonne pratique.

La plupart du temps, les apprentis n'ont aucun rôle dans le processus de validation du semestre et d'obtention du diplôme et il est difficile de satisfaire à leurs critères, sauf en leur offrant une seconde chance de réussir. L'institut est le principal acteur de ces processus, qui peuvent parfois être considérés comme automatiques (lorsqu'ils sont basés sur des notes avec un seuil de réussite/échec). L'entreprise peut obtenir satisfaction si on lui accorde un rôle dans le processus d'obtention du diplôme (par exemple, en participant au jury).

L'impact du processus de recherche d'emploi n'est pas observable à HWU et Metropolia en raison de la mise en œuvre trop récente des programmes en alternance. Dans les deux autres instituts, la satisfaction est élevée pour toutes les parties. La proposition de programmes de coopération est probablement bénéfique pour les instituts en termes d'attractivité. Les diplômés des programmes en alternance bénéficient d'une excellente employabilité, ce qui procure un avantage financier aux diplômés, tandis que les entreprises bénéficient de nouveaux collaborateurs expérimentés, à condition qu'elles puissent les retenir.

En gardant à l'esprit ces recommandations, le consortium a expérimenté un premier niveau de coopération vers la mise en œuvre conjointe d'un programme de formation international de courte durée qui a pris la forme d'une université d'été : "InT#Tech Summer School".

III. PREMIER NIVEAU DE COOPERATION : UNIVERSITE D'ETE

L'université d'été a été organisée par HWU à Edimbourg au cours de la dernière semaine de mai 2019, juste après la semaine locale de fin de semestre, afin d'assouplir un grand nombre de contraintes concernant la disponibilité des salles de classe et des logements sur le campus. Cette semaine a également été la plus commode pour les 3 autres partenaires. La session était ouverte à 5 apprentis de niveau Licence3 de chaque institut (20 apprentis en tout). 2 enseignants de chaque institut ont dispensé des cours et guidé le travail des équipes internationales. La semaine était axée sur le développement du numérique et les nouveaux besoins en "Skills 4.0". Ces compétences comprennent : travailler de manière autonome au sein d'équipes internationales sur des questions nouvelles, intégrer leurs connaissances dans de nouvelles tâches, travailler sur des questions multidisciplinaires, utiliser et partager leurs connaissances scientifiques et techniques, utiliser et partager leur expérience pratique, améliorer leur présentation, gérer un projet de courte durée, réfléchir à l'apport du digital dans leurs domaines respectifs, faire évoluer leur propre projet grâce aux autres. La valeur ajoutée pour les participants est bien sûr d'acquérir de nouvelles compétences et connaissances, mais aussi d'apprendre à réfléchir sur un thème d'innovation en contexte multiculturel. Le programme de la semaine (cf Figure 5) comprenait des conférences, des visites industrielles, et un travail d'équipe en trinômes ou quadrinômes hétérogènes en termes d'origine et de spécialité (génie industriel, génie mécanique, génie électrique, gestion d'installations, énergétique).

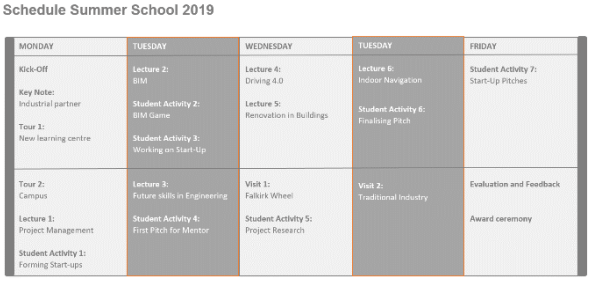


Figure 5. PROGRAMME DE L'UNIVERSITE D'ETE

Les conférences ont été dispensées soit devant le public, soit par visioconférence en direct, et ont mis en évidence certains défis en matière de modélisation, d'ingénierie et de fabrication, de mobilité ou d'économie d'énergie. Les visites ont mis en lumière l'expertise technique et la culture locales (notamment les équipements remarquables de HWU, un ascenseur à bateau unique et une distillerie de whisky écossais). Les activités des apprentis étaient axées sur des besoins sociétaux non satisfaits nécessitant des connaissances techniques et une pensée créative. La dernière demi-journée a été consacrée à la présentation orale des propositions des apprentis. Le jury international composé des enseignants partenaires, a élu le projet le plus convaincant. L'équipe gagnante a proposé un prototype d'application de partage de parking en temps réel pour smartphones et ce projet est toujours en développement dans le cadre d'une start-up. Cette expérience a évidemment été fortement appréciée par tous les participants (apprentis et enseignants), qui se sont réjouis de pouvoir poursuivre l'expérimentation proposée par le projet InT#Tech. Les thèmes abordés par les conférences, le mélange de présentiel et de distanciel, le travail d'équipe sur l'ingénierie innovante basé sur des chalenges, le contexte international avec une touche de culture locale ont contribué à ce succès.

Elle présentait néanmoins des inconvénients majeurs : les apprentis ne pouvaient obtenir aucune reconnaissance académique de leur implication ; les apprentis et le personnel écossais ne vivaient pas vraiment un événement international, puisque l'université d'été se déroulait dans leur propre université. De plus, cette expérience a été soutenue financièrement par le budget du projet. Ainsi, la participation (voyages, conférences, visites, hébergement) était sans frais pour tous les participants, mais néanmoins coûteuse, ce qui n'est pas viable sur le long terme.



Figure 6. EQUIPE INTERNATIONALE LORS DE L'UNIVERSITE D'ETE

Afin de combiner les enseignements tirés de l'identification des bonnes pratiques et d'atténuer les manques de l'université d'été, la préparation d'un second niveau de coopération a été lancée dès l'automne 2019, avec l'objectif de mettre en place une unité d'enseignement collaborative dans un contexte international, avec une reconnaissance académique officielle.

IV. SECOND NIVEAU DE COOPERATION : COURS INTERNATIONAL

Les exigences étaient les suivantes : 5 ECTS pour les participants qui réussissent les épreuves (la plus petite récompense acceptable pour une unité d'enseignement au sein du consortium), une charge de travail équilibrée entre théorie et pratique, une série cohérente de conférences principales liées au thème général "transformation digitale", des TPs sur des équipements remarquables, une immersion dans le monde du travail en multiculturalité géographique et technique, l'assimilation de nouvelles connaissances, un travail en autonomie et un travail en équipes, l'implication des 4 instituts, un scénario répétable et bien sûr un budget tenable. L'apparition de la crise sanitaire de 2020 a apporté de nouvelles contraintes. Il était en effet implicite que chaque apprenti serait amené à effectuer une mobilité physique, ce qui nécessitait au moins 2 instituts d'accueil. La DHBW et l'INSA-HdF étaient pressentis pour jouer ce rôle en 2020, les 2 autres instituts lors de la réitération du cours en 2021. La COVID-19 nous a amenés à penser l'ensemble du cours en distanciel, ce qui a réduit considérablement le budget à allouer à l'expérimentation. La suite de ce papier se focalise sur l'ingénierie du module en actant d'emblée le mode distanciel comme une contrainte initiale (ce qui n'était pas le cas).

A. Ingénierie pédagogique du cours international

L'expérimentation a été dimensionnée pour correspondre à une classe de TD de 24 apprentis assemblés en 6 quadrinômes. Pour justifier l'ocroi de 5 ECTS, il fallait une charge de travail minimale équivalente à un mois de formation. Mais ni les enseignants ni les apprentis ne pouvaient se rendre disponibles de façon synchrone pendant un mois dans tous les instituts. Les très rares intersections communes des disponibilités dans le consortium se situent au printemps et ne durent pas plus d'une semaine (en dehors des congés, des jours fériés et des examens). C'est pourquoi il a été décidé de mobiliser une seule semaine pour l'enseignement synchrone, mais d'étaler la durée du module sur deux mois, pour que la charge de travail soit à la fois tenable dans un emploi du temps d'apprenti déjà chargé, tout en restant compatible avec les 5 crédits ECTS. La semaine comportant 5 jours pour 4 partenaires, il a été décidé de confier l'organisation d'une journée à chaque institut. Une journée d'enseignement doit combiner un cours et une application pratique mobilisant un dispositif expérimental remarquable, générateur de données numériques. Une durée standard de 3 heures, pour un cours comme pour un TP a été retenue, incluant une pause médiane. Les cours magistraux ont été placés le matin (9h00 à 12h00) pour une meilleure réceptivité des apprentis, et les TPs l'après-midi (13h00 à 19h00, en deux lots de 12 apprentis). La cinquième journée est consacrée à donner la parole à des représentants de l'Europe politique et des industriels proches des instituts du consortium.

Le premier mois est dédié à l'acquisition de connaissances requises pour pouvoir suivre le cours. Le démarrage du premier mois et donc du cours consiste en une réunion virtuelle de quelques heures, afin que les participants se présentent et que les équipes soient formées.

La semaine de cours est placée au milieu de l'expérimentation (Figure 4).

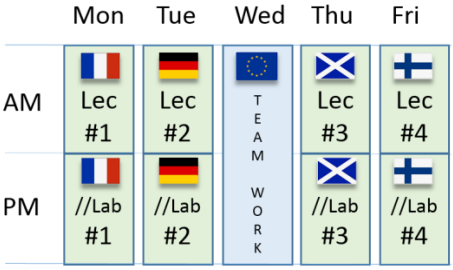


Figure 7. LA SEMAINE INTERNATIONALE

Le second mois est dédié à la production des livrables (retour d'expérience et compte rendus de TPs en quadrinômes). La fin du second mois et donc du cours consiste en une réunion, que nous souhaitons organiser en présentiel à Bruxelles. Ce cadre étant fixé, il s'agit ensuite d'identifier les contenus de l'unité d'enseignement (thèmes, ressources, organisation et modalités d'évaluation).

B. Identification du contenu de l'unité d'enseignement

La recherche d'enseignants locaux susceptibles de contribuer au module a été différente pour le cours et pour les TPs. Pour le cours, un appel d'offres détaillé a été lancé et l'offre la plus cohérente avec la thématique a été sélectionnée. Pour les TPs, une enquête sur les équipements les plus remarquables de l'institut a été réalisée, et les enseignants référents pour chaque équipement ont été invités à contribuer. Ainsi, un groupe de contributeurs potentiels a été rapidement identifié. En gardant à l'esprit qu'un ECTS représente environ 16 heures d'enseignement mais que la semaine internationale n'implique que 30 heures de face à face pédagogique, un travail supplémentaire de 50 heures était donc nécessaire (donc 6,25 heures pour chacun des 8 intervenants de la semaine), soit avant la semaine (travail préparatoire, lectures suggérées, principalement pour la conférence), soit après la semaine (compte rendus, principalement pour les TPs). Ces demandes ont été transmises au groupe d'enseignants, notamment en ce qui concerne la contrainte de la charge de travail, l'organisation des TPs (tâches individuelles ou travail en équipe ou compétition entre les groupes), et la méthode d'évaluation, afin d'obtenir une définition précise de chaque contribution. Pour la question de la charge de travail, des lectures préparatoires ont été choisies pour le cours. La conférence débutera par un quizz évalué portant sur la lecture et la compréhension des documents préparatoires. Un deuxième quiz évalué sera donné après la conférence pour vérifier sa bonne assimilation. Pour les TPs, l'évaluation dépend de l'enseignant. Elle peut être basée sur une présentation classique, ou un rapport écrit.

En ce qui concerne l'INSA-HdF, la conférence sera axée sur l'impact du Big Data et de l'apprentissage automatique dans diverses situations liées à la planification et au contrôle de la production. En ce qui concerne les TPs, les équipements remarquables de l'INSA-HdF mobilisables pour des travaux pratiques en distantiel sont : (1) la plate-forme de développement durable (détermination, par le biais de mesures à distance, d'une stratégie de rafraîchissement d'un bâtiment instrumenté de plus de 1000 capteurs), (2) un dispositif de télédiagnostic (supervision des pannes contrôlables d'une machine de déroulage de bande et de poinçonnage). Le second sera finalement retenu car plus disponible. Les équipements de conduite autonome et de réalité virtuelle, bien que remarquables, n'ont pas été sélectionnés car trop difficilement utilisables à distance.



Figure 8. LES MAQUETTES DE TP A DISTANCE DE L'INSA-HDF

D'un point de vue administratif, une nouvelle unité d'enseignement a été créée et référencée dans le système d'information pédagogique, afin que les apprentis puissent être officiellement inscrits à cette UE et que les enseignants intervenants et les salles puissent être officiellement identifiés comme ressources pédagogiques. Le statut des apprentis participants sera "Erasmus+ incoming students" en mobilité virtuelle de courte durée.

V. CONCLUSION

InT#Tech est un projet européen passionnant, donnant l'opportunité à 4 instituts européens de développer une unité d'enseignement reproductible sur l'ingénierie innovante dans un contexte international. La première mise en œuvre était axée sur la transformation numérique des compétences nécessaires pour satisfaire les besoins actuels de l'industrie 4.0. Les partenaires ont comparé leurs modèles d'alternance et leurs modèles respectifs de coopération avec les entreprises. Malgré une variété de situations, induisant de nombreux obstacles à la mise en œuvre d'une unité d'enseignement mutualisée, un premier niveau de collaboration a été atteint avec l'université d'été, qui a suggéré les caractéristiques qu'il fallait préserver. Un an plus tard (2 à cause de la COVID-19), la mise en œuvre effective de l'Unité d'Enseignement est à présent imminente. Cette expérience est largement reproductible, en présentiel comme en distanciel. Elle peut facilement intégrer de nouveaux partenaires internationaux et semble totalement transposable dans d'autres consortiums et d'autres thématiques.

VI. REMERCIEMENTS

Le consortium du projet InT#Tech est très reconnaissant de faire partie du réseau européen de partenariats stratégiques Erasmus+. Au nom de tous les membres et des apprentis participants, le consortium remercie le programme Erasmus+ qui lui a donné l'opportunité de valoriser et d'expérimenter ses idées en soutenant l'internationalisation des programmes d'études supérieures en alternance.

VII. REFERENCES

[1] Bundesinstitut für politische Bildung. “Empfehlung des Hauptausschusses des Bundesinstituts für Berufsbildung vom 21. Juni 2017 zum dualen Studiums”. 2016. Https://www.bibb.de/dokumente/pdf/HA169.pdf

[2] CEREQ, Essentiels N° 1. "20 ans d’insertion professionnelle des jeunes: entre permanences et évolutions". 2018. https://www.cereq.fr/collection/cereq-essentiels

[3] Skills Development Scotland website. Graduate Apprenticeships. Https://www.skillsdevelopmentscotland.co.uk/what-we-do/apprenticeships/graduate-apprenticeships/

[4] Metropolia University of Applied Sciences. Official Website (2019c). Metropolia Strategy. Https://www.metropolia.fi/en/about-us/strategy-2020/

Conception et Réalisation d'une Maquette de Palan

Travaux Pratiques d'OPI : Gestion de Projet Appliquée à l'Université de Lorraine

Jean-François ANTOINE
LCFC EA3495, CER ENSAM de Metz
IUT Nancy-Brabois, Dépt. GMP
Rue du doyen Urion
NANCY, France
jean-francois.antoine@univ-lorraine.fr

William DERIGENT
CRAN CNRS UMR 7039, Université de Lorraine
IUT Nancy-Brabois, Dépt. GMP
Rue du doyen Urion
NANCY, France
william.derigent@univ-lorraine.fr

Muriel LOMBARD
IUT Nancy-Brabois, Dépt. GMP
Rue du doyen Urion
NANCY, France
muriel.lombard@univ-lorraine.fr

Résumé— Dans le cadre de la première année de DUT GMP, et à l'occasion de travaux pratiques d'*Organisation et Pilotage des Entreprises (OPI) : Conduite et Gestion de Projet*, les étudiants confrontent leur organisation de travail avec la réalité du travail en groupe, afin de respecter la qualité, les coûts et les délais. Afin de dissocier la difficulté technique de réalisation du produit et la gestion du projet, les risques liés à la fabrication sont réduits par le choix du thème, consistant à réaliser une maquette en papier d'un palan au un-dixième. Le projet proposé permet d'apprendre la gestion de projet mais aussi de réutiliser et de consolider des connaissances d'autres modules. Dans l'optique de susciter une réutilisation, les différentes tâches demandées dans ce TP, le matériel développé et le retour de cette expérience pédagogique sont présentés, en y incluant une courte projection vers le futur B.U.T.

Mots-clés— Apprentissage par projet, OPI, Réalisation

I. INTRODUCTION

L'objectif de ce papier est de présenter une pratique pédagogique développée dans le cadre du second semestre de DUT Génie Mécanique et Productique de l'IUT Nancy Brabois, affilié à l'Université de Lorraine, dans le cadre du module d'Organisation et Pilotage des Entreprises (OPI). Dans le cadre de ce module, les étudiants de 1ère année sont initiés aux principes de la gestion de projet (notions de gestion de projet, planification GANTT, PERT, …) et appliquent les connaissances acquises sur un cas d'études [1,2]. Afin de les confronter à la difficulté de l'organisation d'un travail de groupe, à la technicité de la planification d'un projet et la maîtrise du triptyque Qualité-Coût-Délais, plusieurs sujets ont été créés au cours de ces 15 dernières années.

La difficulté de ce type de validation reste de pouvoir réaliser un produit technique dans un temps limité, sans que l'aspect des techniques de réalisation ou les connaissances de mise en œuvre ne soient un frein (afin de maîtriser le risque technique). Il est proposé par ailleurs des projets au cours de la première année de DUT dont la durée permet l'apprentissage simultané [1]. Dans notre cas, la durée de 4 fois 4 heures ne permet pas de demander des connaissances supplémentaires. Le sujet doit être réalisable avec le savoir déjà acquis.

L'intérêt de cet article est triple: premièrement, il permet de mettre à disposition de la communauté une pratique détaillée pour une possible réutilisation dans le cadre de cours d'OPI ou autres, 2) il montre comment, au travers d'un jeu simple, traitant principalement de la gestion de projet, les étudiants parviennent à comprendre des concepts vus dans d'autres modules (mécanique, conception, science des matériaux, …) , 3) il est possible d'imaginer son utilisation dans le cadre du programme de BUT GMP, de par son aspect pluridisciplinaire. La section suivante présente le sujet actuel proposé aux étudiants, relatif à la conception et la fabrication d'une maquette en papier d'un palan à l'échelle 1:10. La section 3 détaille le fonctionnement des séances de travaux pratiques, et la section 4 le matériel développé en interne pour leur mise en œuvre. La section 5 établit un retour d'expériences sur cette expérience

pédagogique durant depuis plusieurs années maintenant. Enfin la section 6 essaie d'identifier sa transposition dans le cadre du futur programme de Bachelor Universitaire de Technologie (B.U.T) GMP, débutant l'année prochaine. Cet article se termine par une conclusion et quelques perspectives.

II. PRESENTATION DU PROJET

Notre choix de recherche pédagogique a été d'expérimenter la gestion de projet par le biais logique de l'apprentissage par projet (APP). Ce type d'apprentissage est un modèle pédagogique fondé sur le concept d'enquête et a pour but de stimuler la curiosité et, par voie de conséquence, l'investissement des étudiants [2]. Cette approche consiste à soumettre un projet global à un groupe sous la forme d'un cahier des charges ou d'une problématique illustrant une situation réaliste. Le caractère réaliste est primordial dans cette approche, car il rattache la matière étudiée par l'étudiant à des situations qu'il est susceptible de rencontrer en dehors du cadre des études, ce qui augmente significativement l'intérêt pour la matière [1]. L'APP s'inscrit dans le cadre des stratégies holistiques d'enseignement qui favorisent le questionnement et l'auto-apprentissage chez les étudiants tout en favorisant le développement des compétences requises pour répondre aux problématiques techniques et organisationnelles rencontrées dans la plupart des entreprises actuelles [3, 4]. Très tôt, dans le développement de sujets de TPs, nous avons proposé aux étudiants de se confronter à la délicate gestion d'un travail de groupe dans un temps limité avec un cahier des charges à respecter. Cependant, la mise en œuvre de ce type d'approche nécessite une structuration adaptée au volume horaire, s'appuyant sur les savoirs enseignés par chaque discipline, avec toutefois assez de technicité pour que ces savoirs soient utilisés en interaction et non pas l'un après l'autre.

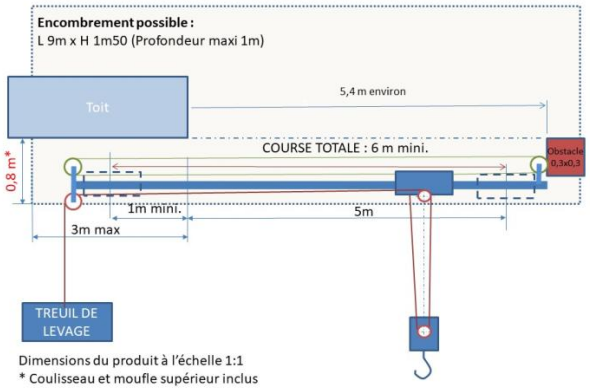
Dans la suite, nous allons décrire plus détails l'activité proposée aux étudiants, les règles et le déroulement pédagogique du projet, les résultats obtenus lors des éditions précédentes et les perspectives données à ces travaux lors du passage au Bachelor Universitaire de Technologie (B.U.T.).

A. Sujet proposé

Le sujet abordé consiste en la réalisation d'une maquette de palan au 1:10. Afin de limiter le risque technique, il a été décidé d'utiliser le biais d'une maquette du système réel, en papier collé. Afin de créer une dépendance entre le travail de tous les membres de l'équipe, le système est composé de plusieurs pièces devant s'assembler pour créer un système fonctionnel. Par ailleurs, la totalité des 4 sous-ensembles contribue au levage de la charge, ce qui contraint chacun à rechercher la performance de sa partie, pour ne pas constituer le maillon faible de la chaîne cinématique.

Ce projet regroupe des activités de gestion de projet mais aussi de conception, dimensionnement de structures, sciences des matériaux et, dans une moindre mesure, de fabrication. Le niveau demandé sur chacune de ces disciplines correspond aux acquis de première année.

Le cahier des charges est présenté dans un document constituant le sujet du TP. Les principales dimensions du système à l'échelle 1 :1 sont présentés (Figure 2)



B. ENVIRONNEMENT IMPOSE (CDCF)

La charge supportée par le palan à taille réelle, à une distance de 5 m, doit être supérieure à 5 tonnes et la pente maximale provoquée par cette charge est limitée à une valeur de 6%. Les dimensions utiles du crochet sont imposées (diamètre de l'œil, dimensions réalistes). Par ailleurs, il doit être possible de ramener la charge à un mètre à l'intérieur du bâtiment équipé. Le palan doit comporter un système de moufflage et des poulies pour permettre le levage des 5 T avec une force inférieure à 1 tonne au niveau du treuil.

C. Organisation du projet

Le projet consiste en une succession de tâches, avec des jalons représentés par des comptes-rendus d'avancement ou la validation des livrables. Le planning de projet est décomposé en deux familles de tâches : les tâches de gestion de projet et les tâches de gestion technique. Les interdépendances entre les tâches de gestion technique et de projet obligent à ne pas perdre l'objectif de gestion de projet, sans lequel cette mise en situation pourrait rapidement se réduire à un exercice de construction.

Ainsi, dans la figure 1, les flèches désignent les antécédents selon un ordre imposé de rendu des travaux.

Chaque rendu de travail est évalué par l'enseignant à partir de grilles préétablies dans le cours en ligne. Pour

[1] Tout comme les Situations d'Apprentissage et d'Évaluation introduites par le BUT, dont nous reparlerons plus tard.

les tests de valeurs chiffrées, la notation est automatique, basée sur les performances attendues.

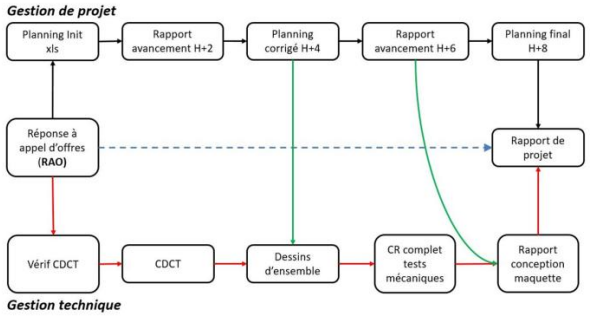


Figure 1. STRUCTURE DU PROJET

Une note minimale est nécessaire pour avoir l'autorisation de continuer. Si la note ne satisfait pas le groupe, il peut alors décider de retravailler et déposer à nouveau le travail, afin d'améliorer leur score. Le groupe gère également le "projet" de leur note de TP, et peuvent ainsi obtenir de bons résultats, en dépit d'éventuelles difficultés techniques.

La non-validation d'un jalon provoque donc un délai supplémentaire et l'obligation de faire mieux est souvent assez étonnante pour les étudiants, qui, une fois une note reçue, n'ont pas nécessairement le droit de refaire. Ce TP, qui s'inspire de l'approche par compétences complémentaire à l'APP, est en ce sens plus représentatif de la future vie professionnelle qu'ils auront.

III. DESCRIPTION DES TACHES A REALISER

Afin de faciliter la réutilisation du projet et son déploiement dans d'autres formations, nous proposons dans cette section une description précise des grandes tâches de gestion technique.

A. Réponse à l'appel d'offre

Le démarrage du TP commence par la formation du groupe-projet et le choix du chef de projet, nommé par ses partenaires. L'expérience a montré qu'il a une grande responsabilité dans la galvanisation de son équipe et le maintien d'une motivation et d'un entrain.

Par ailleurs, il y a aussi tout un ensemble de rôles à attribuer : rôle de coordinateur, de responsable ou d'assistant. Ces rôles tournent en fonction de la phase du travail (conception, fabrication ou tests finaux), selon un ordre préétabli en fonction du nombre d'étudiants du TP.

B. Réponse au cahier des charges techniques

Après avoir répondu à l'appel d'offre, il s'agit pour les étudiants de répondre maintenant au cahier des charges techniques avec une pré-étude visant à définir les dimensions et les charges appliquées à la maquette est réalisée. Des lois de similitudes sont présentées afin de permettre de définir la charge à appliquer sur la maquette papier pour représenter, de manière réaliste et à l'échelle, la déformée sous 5 tonnes du système réel.

$$\frac{F_0}{F_1}.\frac{L_0^{\,2}}{L_1^{\,2}} = \frac{E_0.I_0}{E_1.I_1} \qquad (1)$$

Avec F la force appliquée en bout, E le module d'élasticité, I le moment quadratique de la section et L la longueur de la poutre. 0 et 1 sont les indices de la maquette et du système réel respectivement. Par conséquent, L_1/L_0 vaut 10 dans le cas de ce TP. Les poutres ayant la même forme de section I_1/I_0 valent 10^4. La simplification aboutit à l'équation (2). Si H désigne le ratio L_1/L_0 , et si les proportions sont respectées, on obtient finalement la relation :

$$\frac{F_0}{F_1} = \frac{1}{H^2}.\frac{E_0}{E_1} \qquad (2)$$

Répondre au cahier des charges techniques impose donc de résoudre les problèmes suivants :

a) Science des Matériaux - Détermination du module d'Young

Le papier utilisé est un matériau anisotrope assez méconnu par la plupart des étudiants lorsqu'ils démarrent le TP.

Le sens du grain change d'un fabricant à l'autre, selon le sens de découpe par rapport de passage dans les rotatives. Le dimensionnement n'a de sens qu'en cas de choix éclairé du matériau.

Nous leur fournissons des données expérimentales sous la forme d'un rapport de test, qui leur permettra de déduire que le papier utilisé a un module d'élasticité compris entre 1500 et 3900 MPa en fonction de l'orientation du grain du papier vis-à-vis des efforts. Des tests sur papier encore humide à cœur (chute des performances) doivent inciter à garder les maquettes suffisamment longtemps à l'étuve, alors même que souvent le temps manque. La figure 2 présente des courbes d'essai de traction réalisées sur le papier dans le sens longitudinal (sens des fibres) et transversal (perpendiculaire au sens des fibres).

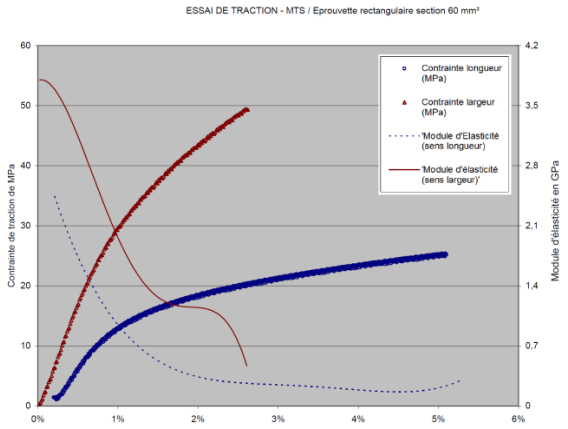


Figure 2. COURBES DE TRACTIONS DU PAPIER UTILISE

Les épaisseurs des parois doivent être multiples de l'épaisseur des feuilles (0,3 mm ici). Les axes sont faits de bois (cure-dent ou pique à brochette).

b) Dimensionnement des Structures - Caractérisation des sections

Afin d'éviter des aspects calculatoires parfois délicats pour des étudiants encore à leur début, le recours à des logiciels de calculs (RDM 7), des feuilles de calcul d'efforts sur EXCEL permettent de déterminer les caractéristiques des sections théoriques.

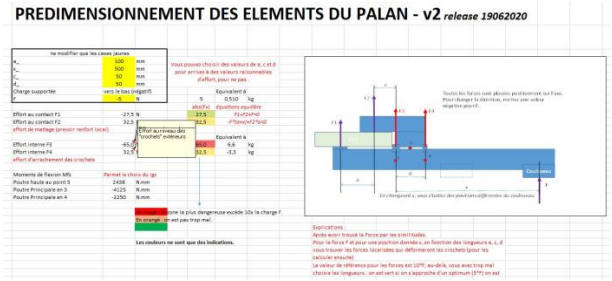


Figure 3. TABLEUR DE PRE_DIMENSIONNEMENT

c) Conception - Dimensionnement d'un moufflage

Afin de lever la charge sans nécessité trop d'efforts, le palan est muni d'un moufflage. L'efficacité de ce moufflage dépend du nombre et du ratio R_{poulie} / R_{axe} et du frottement bois/papier μ, évalué à 0,4 en conditions réelles. La taille des axes étant fixée à 2 ou 3 mm sur la maquette selon l'option choisie par l'équipe. Un abaque lui est fourni afin d'aider au choix, pour éviter un calcul délicat.

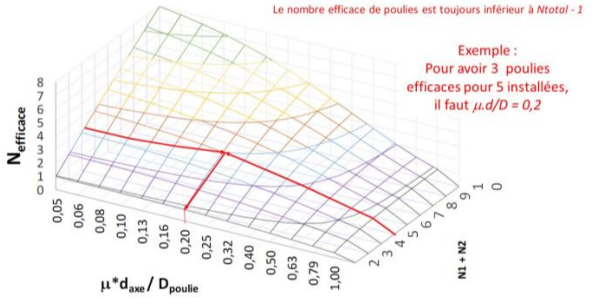


Figure 4. ABAQUE DE DIMENSIONNEMENT DU MOUFLAGE

La résolution de ces différents types de problème (la liste présentée n'est pas exhaustive) permet d'aboutir à une estimation des performances de la maquette et de la quantité de matière utilisée pour proposer au client un cahier des charges techniques, reprenant point par point les *desideratas* du client. Les données sont validées à partir des données habituellement obtenues par les promotions antérieures.

C. Conception détaillée et Mise en plan

Pour la conception détaillée, chaque membre de l'équipe est affecté à un des 4 lots du projet : 1) la poutre principale ; 2) l'attachement amovible qui se fixe sur la partie haute de la poutre ; 3) le coulisseau et le moufle supérieur; 4) le crochet et le moufle inférieur. Selon l'effectif du groupe, un étudiant peut être affecté à la conception des poulies. La particularité du sujet fait que, dans les limites imposées par le cahier des charges, l'équipe-projet se fixe elle-même les objectifs de performance de leur produit. Ils proposent alors les performances estimées sur un test en ligne, le score leur indique si les valeurs sont cohérentes et réalistes.

D. Fabrication et test des maquettes

La fabrication des maquettes est réalisée en plusieurs sous-ensembles correspondant aux différents lots du projet, à partir des plans issus de la phase de conception détaillée. Ils sont réalisés par pliage de patrons en papier. La mise en forme des patrons est réalisée à l'aide d'un outillage spécifique permettant de les passer à l'étuve. Les sous-ensembles sont assemblés par liaisons démontables.

L'apogée du TP est sans conteste le test mécanique des éléments de la maquette avec la charge de 1 kg mini. L'indice de performance IP1 est la masse (nécessaire à atteindre 10 mm de déformée à 500 mm du bord du toit), rapporté à la masse de la maquette. Cela donne une idée de l'utilisation raisonnée de la matière.

Si l'équipe a une avance suffisante, elle peut procéder à des tests préalables sur le banc de test et corriger des défauts (ajouts de nervures, renforts locaux aux points de contact…) que la pré-étude ne laissait pas apparaître.

Le crochet est fabriqué en 3 exemplaires, dont 2 testés à la rupture. Le troisième exemplaire est utilisé pour charger la maquette en condition réelle, en levant la charge via le système de moufflage. Les dimensions du crochet sont représentées figure 5. Les dimensions donnent un aspect réaliste, d'une part, et permettent l'utilisation du banc de test des crochets par la suite, d'autre part.

Pour le crochet, un concours basé sur son indice de performance IP2 Masse supportée/masse crochet est alors organisé. Le record est à 37000 fois le poids du crochet (37 kg pour 1 gramme). Pour atteindre cette performance, l'étudiant avait optimisé les sections et la fabrication avait été très minutieuse.

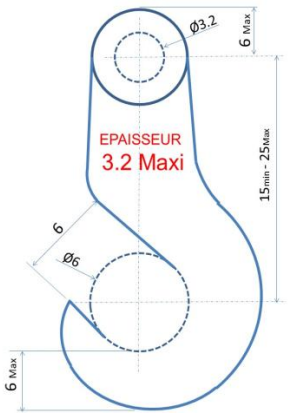


Figure 5. DIMENSIONS IMPOSEES DU CROCHET DE LA MAQUETTE

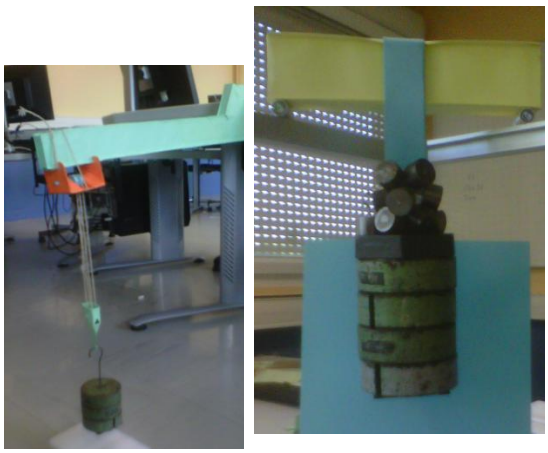


Figure 6. A GAUCHE : TEST D'UN PROTOTYPE FIXE AU TOIT. A DROITE : TEST D'UNE SECTION DE POUTRE SUR 2 APPUIS

IV. MATERIEL PEDAGOGIQUE DEVELOPPE

Pour ce TP innovant, il a été nécessaire de concevoir le matériel pédagogique requis pour les tests, ce qui s'ajoute à toute l'interface en ligne pour la gestion des jalons et l'évaluation des travaux.

Test de faisabilité et documentation : Afin de garantir la réussite des étudiants, un grand nombre d'essais et de tests mécaniques ont été faits sur les matériaux utilisés (frottement papier/bois de hêtre, mesure du module d'élasticité du papier (3 protocoles d'essai), test sur crochet, réalisation de maquette prototype pour valider la faisabilité). Sur la figure 8 gauche, on peut observer l'étude de faisabilité du projet avec un prototype a été prouvée.

La maquette fait 126 grammes et porte 3 kilogrammes sur la photo. Le moufflage a permis de soulever la charge depuis le bloc de mousse de protection. Sur la Figure 6 droite, l'étude d'une section de poutre sur appuis est présentée. Elle permet de vérifier la tenue de la section envisagée en réalisant un test plus simple sur un élément simplifié. On peut montrer, qu'à section identique, une charge de 5 kilogrammes au centre de cette poutre de 20 centimètres (entre appuis) équivaut à une charge de 500 grammes au bout d'une poutre console de 50 cm (similitude des contraintes maximales).

Le banc de test réalisé en projet est présenté figure 7. Le tiroir rouge est amovible. Lors du test, on pose, à même le sol, sur une balance et au droit du coulisseau, une masse de 1 kg, que l'on soulève au moyen du moufflage et du crochet. La tare étant faite, on relève la charge appliquée (indiquée négative) et la déformée au moyen d'un réglet monté sur un support réglable.



Figure 7. BANC DE TEST ET SON BAC DE RANGEMENT DU MATERIEL

Test des crochets : Un dispositif de traction a été conçu pour mesurer l'effort appliqué au crochet jusqu'à sa rupture. Il est composé d'un bâti usiné par des étudiants en TP de machine-outil en 1ère année, et de chapes permettant de solliciter le crochet via des axes de 3 mm (figure 8).



Figure 8. BANC DE TEST DES CROCHETS

Le dispositif de pesée d'une balance électronique a été détourné pour le monter sur une pièce déformable qui multiplie la capacité de charge par un facteur 4.42 (étalonnage réalisé par des masses marquées). L'afficheur de la balance est conservé et déporté via un câble blindé et une connectique Sub-D9 (pour un rangement plus aisé). L'anneau de force vise à éviter une montée trop rapide de l'effort de traction. Durant l'essai, le crochet testé et l'afficheur de la balance sont filmés sous plusieurs angles, grâce à un miroir, afin de regarder le mode de ruine du crochet (délaminage des couches, rupture...). Cela permet ensuite de connaître la force ultime, et de débriefer l'essai avec les étudiants.

V. EVALUATION

L'originalité de ce travail pratique est que l'évaluation est continue, nécessitant une bonne réactivité de l'enseignant, pour évaluer les documents postés en ligne. En contrepartie, les étudiants voient leur note évoluer et peuvent l'influencer en soumettant de versions améliorées, mais sans grever budget ou rogner sur les délais.

Chaque travail déposé en ligne constitue la note de gestion du projet, à laquelle s'ajoutent une note de performance (test initial prévisionnel et final sur la maquette) et une note personnelle issue de 3 évaluations en cours de TP (dénommées audit qualité travail) de chaque collaborateur par le chef de projet (investissement, initiative, qualité du travail ou ponctualité…).

VI. RETOUR DE L'EXPERIENCE PEDAGOGIQUE

Ces sessions de travaux pratiques demandent beaucoup d'investissement personnel tant à l'étudiant- qui doit garantir au reste du groupe une qualité de travail - qu'aux enseignants, lesquels doivent faire preuve de réactivité dans les évaluations et de pertinence dans les commentaires-client afin de guider les étudiants vers un meilleur produit. La phase de test est également l'occasion de mieux comprendre l'influence des choix de conception sur la tenue du système. Ils permettent également de montrer les limites de la Résistance des Matériaux en illustrant la ruine d'une structure ou le déversement de la poutre. L'APP permet aux étudiants d'appliquer la gestion de projet et d'approfondir simultanément d'autres unités d'enseignement. A la fin, l'évaluation du module demandée aux étudiants permet une amélioration continue de l'organisation du module. Si la grande quantité de travail demandée est souvent citée, l'intérêt d'être confronté à des conditions réelles de travail en groupe fait souvent l'unanimité.

Dans le cadre de la nouvelle réforme du Bachelor Universitaire de Technologie (B.U.T.), il apparaît qu'un tel sujet de travaux pratiques peut facilement devenir une situation d'apprentissage et d'évaluation (SAé) car c'est ce qu'il est, de fait, déjà. En effet, il permet sur une même mise en situation de venir appliquer différentes ressources nécessaires pour valider dans notre cas des compétences de conception, fabrication et gestion de projet.

VII. CONCLUSIONS

Cet article a présenté l'ensemble des activités de travaux pratiques de gestion de projet à l'IUT de Nancy-Brabois. Il détaille l'approche pédagogique proposée aux étudiants afin de les confronter à la difficulté du travail en groupe, à la gestion du temps et des performances

ainsi qu'à la maîtrise du risque technique. Ce projet pourrait être un support de SAé dans un futur proche.

VIII. REFERENCES

[1] Aïm R., L'essentiel de la Gestion de Projet, les carrés rouge, Editions Gualino

[2] Cazaubon C., Gramaccia, G. Massard G., Management de projet technique, coll. Technosup, 2004, Édition ellipse.

[3] Lombard M., Coupaye E. , Godard A. , Antoine J.-F., Derigent W., *Le projet tuteuré : une structuration transversale des apprentissages* , 16e colloque national S-mart.

[4] Derigent W., Antoine J. -F. , *Palan à Haute capacité de Charge*, 2018, Document de travail, DOI : 10.13140/RG.2.2.34287.76964

[5] Joseph S. Krajcik, The Cambridge Handbook of the Learning Sciences, chapter 19 - Project-Based Learning, pp 317-334,https://doi.org/10.1017/CBO9780511816833.020

[6] Uhring, W., & Frick, V. (2019). L'apprentissage par projet en électronique numérique. *J3eA*, *18*, 1010..

Etude de logiciels CAO en mode SAAS dans le domaine pédagogique de l'enseignement supérieur :

Analyse comparative des logiciels Fusion 360 et Onshape

Pierre-Marie Nicolet
Université de Technologie de Compiègne
Département d'Ingénierie Mécanique, CS 60319, 60203 Compiègne cedex France
pierre-marie.nicolet@etu.utc.fr

Raoudha Gaha
Université de Technologie de Compiègne
Laboratoire Roberval, rue du Dr Schweitzer, CS 60319, 60203 Compiègne cedex France
raoudha.gaha@utc.fr

Matthieu Bricogne
Université de Technologie de Compiègne
Laboratoire Roberval, rue du Dr Schweitzer, CS 60319, 60203 Compiègne cedex France
matthieu.bricogne@utc.fr

Benoit Eynard
Université de Technologie de Compiègne
Laboratoire Roberval, rue du Dr Schweitzer, CS 60319, 60203 Compiègne cedex France
benoit.eynard@utc.fr

Résumé— Les logiciels basés sur le cloud sont de plus en plus présents, et les logiciels CAO (Conception Assistée par Ordinateur) ne font pas exception. Ainsi, les éditeurs de ces logiciels conçoivent de nouveaux logiciels basés sur le cloud, et plus précisément, sur le mode SAAS (Software as A Service), qui est un type de cloud fournissant au client une solution quasiment "clé en main", ce qui signifie que le fournisseur gère tout ce qui entoure le logiciel (les mises à jour, les données, …). Ce type de logiciel présente divers avantages, que ce soit pour l'ingénieur qui utilise le logiciel, notamment au niveau de la collaboration, que pour l'entité qui achète ce service (réduction du coût de maintenance, …). Afin de répondre à ces nouvelles technologies, les universités doivent former les étudiants. Aussi, une comparaison de logiciels CAO en mode SAAS permet de définir les avantages et les limites de ces logiciels.

Mots-clés— CAO, Onshape, Fusion360, SAAS, Education

I. INTRODUCTION

Les outils informatiques basés sur le cloud sont de plus en plus présents, et ce, dans une multitude de domaines. Le cloud présente divers avantages, tant pour le fournisseur que pour le client. Cette transformation s'inscrit dans le développement de l'industrie 4.0, dans laquelle on peut noter une certaine tendance à utiliser l'Internet des Objets (IoT). Les logiciels CAO sont aussi sujets à ces transformations, et les éditeurs développent des logiciels basés sur le cloud, et plus précisément, basés sur le mode SAAS (Software As A Service). Les logiciels CAO en mode SAAS sont, par exemple, Fusion 360, Onshape (accessible directement via un navigateur web traditionnel), ou encore la 3D Experience (qui est une plateforme en mode SAAS mais qui demande l'installation d'un client lourd pour certaines fonctionnalités). Ces logiciels présentent des spécificités, notamment sur la gestion des données et de la collaboration, et demandent donc une formation spécifique.

Pour étudier la possibilité d'intégrer ce type de logiciel dans le cursus d'Ingénierie Mécanique à l'Université de Technologie de Compiègne, une analyse basée sur les fonctionnalités transmises aux étudiants, dans l'unité de valeur (UV) de modélisation géométrique (TN20 - https://moodle.utc.fr/enrol/index.php?id=69), habituellement par l'usage des logiciels classiques tels que Catia et Creo, a été faite sur les logiciels CAO en mode SAAS Fusion 360 et Onshape. Cette étude permettra d'analyser, d'évaluer et comparer les possibilités offertes par les logiciels CAO en mode SAAS et d'en regarder l'implémentation dans un cadre éducatif tel que celui de l'UTC. Pour ce faire, nous avons, d'abord, réalisé une revue de littérature sur l'étude des solutions basées sur le cloud dans les universités formant des ingénieurs. Cette étude bibliographique qui nous a permis d'extraire certains critères à prendre en considération dans notre analyse ainsi que de connaître les avantages et les inconvénients des logiciels en mode SAAS et de les comparer à notre expérimentation sur les deux logiciels CAO en mode SAAS (Fusion 360 et Onshape), dans la troisième section. Une discussion des résultats de l'analyse est menée dans la quatrième section, qui est suivie par une conclusion de l'étude présentée dans la cinquième section.

II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

A. Travaux connexes

L'expérimentation de logiciels cloud ne date pas d'aujourd'hui. Plusieurs universités ont déjà essayé l'implémentation de ces technologies dans le domaine de l'ingénierie, dans le cadre d'une collaboration via PLM (Product Lifecycle Management) ([1], [2] et [3]), la conception ([4] et [5]) ou encore pour l'ingénierie collaborative [6]. Dans le développement de produits, il est

évident que les logiciels CAO jouent un rôle majeur dans la conception des produits. Aujourd'hui, la complexité des systèmes ne cesse d'augmenter, de ce fait, les ingénieurs sont confrontés à de nouveaux problèmes tels que le conflit de versions, les coûts du matériel et des licences lors de l'utilisation de logiciels CAO traditionnels. Le cloud peut être une solution à ces problèmes. En revanche, la capacité des logiciels CAO basés sur le cloud pose toujours question. C'est pourquoi de nombreuses recherches sont développées afin d'évaluer et comparer les logiciels CAO traditionnels et ceux basés sur le cloud. Junk et Kuen [7] ont présenté une revue des logiciels CAO open source et freeware (comme Autodesk FreeCAD, SketchUp et Onshape pour la conception mécanique, OpensCAD et RepoCAD pour la programmation et Blender pour la conception créative). Ils les ont comparés d'un point de vue scientifique et ils se sont basés sur deux critères : la facilité d'utilisation et les possibilités offertes par les fonctions du logiciel, avec un facteur de pondération. Ce qui nous permet de dégager un premier avantage qui est la facilité d'utilisation et nous conduit vers l'utilisation des critères « Intuitivité » et « prise en main ». Rassovytska et Striuk [8] ont comparé plus de 30 services de cloud et applications mobiles différents. Ils se sont basés sur l'activité professionnelle d'ingénieurs en mécanique ainsi que sur leur utilisation dans l'enseignement supérieur. Les plus célèbres d'entre eux sont A360, Fusion 360, GstarCAD, DWG FastView-CAD Viewer, Pockets CAD, 3D CAD Models Engineering, CAD Assistant, Onshape, GrabCAD, GnaCAD.
Les principaux critères de sélection sont : les fonctionnalités, les possibilités offertes par le logiciel, la facilité d'accès à partir de différents appareils, la possibilité d'interaction avec d'autres logiciels, et la prise en charge de la collaboration. Ceci nous a permis de considérer deux autres critères de comparaison : l'accessibilité et la collaboration.

Le [9] a fait l'étude de deux logiciels de modélisation géométrique : Solidworks et Onshape. L'étude est basée sur les méthodes d'analyse SWOT et AHP, afin d'avoir une comparaison rationnelle. L'auteur a mentionné que, selon la méthode AHP, 59% des utilisateurs ont préféré Onshape contre 41% pour SolidWorks, ce qui confirme encore le choix de notre critère « Prise en main ». De plus, Junk et Spannbauer [5] ont fait une comparaison technique entre Onshape et Fusion 360, en se basant sur des critères liés à l'utilisation quotidienne (tels que la convivialité et l'accès au logiciel). Ils ont donc évalué les fonctionnalités propres à un logiciel CAO (la conception de pièces, l'assemblage et les dessins de définition), mais d'une manière globale par comparaison à ce qu'on présente dans ce papier, ainsi que des fonctions rarement utilisées ou qui s'exécutent en arrière-plan (comme le stockage et la mise en route), de ce fait, on a pris en compte la conception comme critère de comparaison, tout en considérant les différentes fonctionnalités à acquérir dans l'UV TN20.
Ils ont conclu qu'Onshape offre une interface plus simple, un meilleur accès au logiciel ainsi qu'une meilleure compatibilité dans l'ajout d'extensions. Par comparaison, Fusion 360, qui propose une large gamme de fonctions, est limité si l'utilisateur souhaite ajouter des extensions. Au vu du nombre important de logiciels CAO et du nombre de comparaisons qui ont été faites, il est difficile de déterminer une évaluation particulière. Pour cela, Galimova [10] a présenté un tableau récapitulatif des avantages et des inconvénients, pour développer une méthode facilitant le choix dans les tests à faire sur un logiciel CAO. De cette étude on a considéré le critère de compatibilité qu'on a appelé « conversion ». Wu, Terpenny et Schaefer [11] ont présenté un guide permettant aux clients commerciaux de choisir la solution cloud la plus appropriée, ou de l'utiliser pendant tout le processus de développement du produit. Ce guide a été créé à partir de l'état de l'art qu'ils ont réalisé sur les logiciels et services de conception et de fabrication basés sur le cloud. Ils ont évalué le rôle du cloud dans la conception, l'analyse technique, la fabrication et la production, et ont conclu aux possibilités ainsi qu'aux avantages offerts par ces logiciels. Ils ont, ensuite, développé une liste de critères permettant de sélectionner le système CBDM (Cloud-Based Design and Manufacturing) le plus approprié. Dans un cadre pédagogique, des étudiants de l'Université de Kaiserslautern ont essayé Onshape. Ils en ont déduit qu'Onshape est très pratique pour le travail collaboratif, car il offre une meilleure gestion de données. Ils ont obtenu des résultats complets, car toutes les informations étaient déjà dans la base de données. Toutes ces recherches montrent l'importance et l'intérêt croissant des logiciels basés sur le cloud. Dans la section suivante, nous avons déterminé les avantages et les limites de tels logiciels dans le domaine éducatif.

B. Les avantages et les limites des logiciels CAO basés sur le cloud dans le domaine éducatif :

Dans un contexte éducatif, les logiciels CAO en mode SAAS présentent des avantages tels que :
· Les modèles 3D et les visualisations sont pris en charge par les navigateurs, ce qui permet l'utilisation du logiciel sur n'importe quel ordinateur (ou appareil) [6].
· Les fichiers de travail sont remplacés par des documents stockés sur le cloud
· L'achat d'une licence annuelle coûteuse n'est pas nécessaire
· Les mises à jour et la maintenance sont faites automatiquement sur le cloud
· Une meilleure accessibilité puisque les étudiants peuvent accéder au logiciel à partir de n'importe quel ordinateur (pas besoin d'ordinateur avec des caractéristiques importantes, et pas besoin de se déplacer dans une salle informatique).

La liste des avantages n'est pas exhaustive, toutefois, il est possible de citer quelques limites aux logiciels CAO en mode SAAS, trouvées dans la littérature :
· Les avantages de la collaboration sur ces logiciels doivent encore être explorés
· Les institutions ont déjà leurs plateformes CAO installées
· Un signal Wi-Fi médiocre peut perturber le travail dans le cloud,
Fusion 360 et Onshape sont des logiciels CAO en mode Saas et, comme mentionné dans la partie 2, ils ont fait l'objet de comparaisons afin de déterminer les avantages de la CAO basée sur le cloud. En réalité, Fusion 360 est une plateforme

CAO, FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) et IAO (Ingénierie Assistée par Ordinateur). Selon Barrie [6], le logiciel permet de faire de la conception industrielle et mécanique (surfacique et volumique), et fonctionne sur plusieurs plateformes (PC, Mac et appareils mobiles). Wu et al [11] mentionnent que Fusion 360 permet de créer des surfaces lisses et précises avec la fonctionnalité T-Splines ainsi qu'avec des courbes d'esquisse, et des extrusions. Cependant, la collaboration n'est pas aussi simple que sur Onshape (collaboration basée entièrement sur le cloud). En effet, l'espace de travail "Part Studio" permet une collaboration en temps réel entre plusieurs ingénieurs [6]. Cela permet à plusieurs utilisateurs de créer de nouvelles fonctionnalités sur des modèles 3D existants ou de modifier des pièces existantes, ce qui rend la collaboration très flexible [9].

III. Etude de Fusion 360 et Onshape dans un cadre pedagogique

Afin de former les étudiants sur les logiciels CAO en mode SAAS, l'implémentation d'Onshape ou Fusion 360 dans TN20, ayant pour objectif la modélisation géométrique, est proposée à l'Université de Technologie de Compiègne, dans le cadre d'un projet semestriel réalisé par un étudiant en en cinquième année, ayant déjà fait TN20 sur Catia et Creo, sous la direction de deux enseignants chercheurs, un Professeur et un maître de conférences, qui enseignent TN20. L'étudiant stagiaire a repris la modélisation géométrique d'un cas d'étude enseigné, qui est un amortisseur automobile (figure 1). Cet amortisseur est utilisé pour mener une étude basée sur deux scénarios (modélisation sur Onshape et modélisation sur Fusion 360). Les critères utilisés dans cet article, qui sont issus de l'étude bibliographique d'une part et de objets de TN20 d'une autre part, sont : l'intuitivité de l'interface, l'accessibilité, la prise en main des logiciels, la collaboration, la conception (volume, forme générative et assemblage) et la conversion.

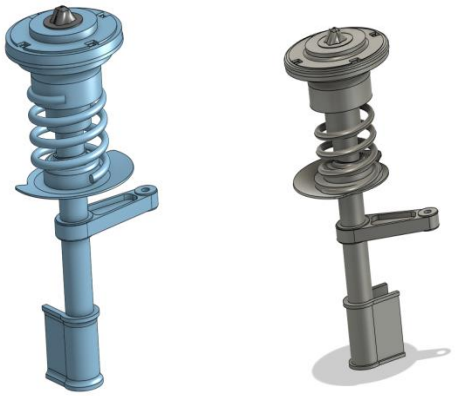


Figure 1 Produit de l'étude modélisé sur Onshape et Fusion 360

A. *Scénario 1 :Etude d'Onshape*

- Intuitivité de l'interface

Des similitudes avec Creo sont observées. En effet, les fonctionnalités de l'interface Part Studio et l'arborescence sont très semblables à ce qui se fait sur Creo et la fonction de recherche de fonctionnalités est mise en évidence. De plus, la version du système est accessible sans recherche préalable et la mise à jour d'une pièce ainsi que son historique sont facilement compréhensibles.

- Accessibilité

En termes d'accessibilité, Onshape ne nécessite pas d'installation sur l'ordinateur. Il est accessible à 100% sur un navigateur Web. Cela signifie que quelles que soient les caractéristiques de l'ordinateur, le logiciel aura la même fluidité. Mais, une connexion Internet stable est nécessaire. En effet, le logiciel a été testé sur deux connexions Wi-Fi différentes : la première avait une vitesse relativement faible mais était stable, les temps de latence étaient quasiment nuls. La deuxième connexion avait une vitesse plus élevée mais la connexion coupait de temps en temps et cela impliquait des temps de latence très longs voire des rafraîchissements de la page. Un test a également été réalisé en 4G, le logiciel n'a eu aucun problème de saut de connexion, certains temps de latence étaient un peu plus élevés que ceux de la première connexion mais le logiciel est largement utilisable dans ces conditions. L'utilisation de ce logiciel se limite donc uniquement à la condition d'avoir une connexion interne, ce qui peut poser problème si n'en avons pas ou la connexion n'est pas stable. Il existe également une application mobile avec laquelle on peut modéliser en 3D de la même manière que sur un ordinateur, mais un écran de portable n'est pas pratique pour modéliser en 3D. Cette application peut servir à publier des commentaires et annotations ou à prévisualiser des pièces. Onshape est fonctionnel sur de nombreux navigateurs tels que Google Chrome, Mozilla Firefox, Safari (Mac OS uniquement), Opera, Microsoft Edge.

- Prise en main du logiciel

Le logiciel se prend en main assez rapidement. Onshape a sa propre façon de penser, notamment au niveau des fonctions de base d'extrusion, de révolution, de booléen, où le système est toujours le même. En effet, quand l'utilisateur manipule des fonctions (features), le logiciel demande à chaque fois s'il travaille sur une surface ou une pièce (part). Ainsi, certaines subtilités sont à saisir : les assemblages ne sont pas basés sur des plans mais sur des points et des connecteurs, tous les features sont alimentés par des esquisses.

- Collaboration

Le système collaboratif d'Onshape est très intuitif. Il ressemble fortement aux systèmes collaboratifs tels que Google Drive. Le partage d'une pièce ou d'un document (qui contient des pièces ou des données) peut se faire individuellement ou à une équipe, tout en gérant les droits d'accès des utilisateurs. De plus, les personnes sans abonnement Onshape peuvent voir une pièce si un lien leur est partagé. Un système de projet existe dans lequel les rôles sont répartis. Un test sur la collaboration a ensuite été réalisé où deux étudiants étaient connectés en même temps sur un espace de travail (part studio). Lorsque le premier étudiant crée une esquisse (sans l'avoir enregistrée), le deuxième

étudiant connecté peut accéder à l'esquisse et modifier les cotes.

- Conception (volumique, surfacique et assemblage)

La conception se fait dans un “Part Studio” (l’espace de travail). Le Part Studio peut contenir plusieurs pièces, mais il y un espace de travail propre aux assemblages. Cette partie est imagée par la conception d’un amortisseur de voiture. Onshape repose sur trois principes essentiels : les esquisses qui alimentent les features (même les trous), le type d’objet à travailler (pièce ou surface) et le système booléen (nouveau, ajouter, supprimer, intersection).

Pour les features de conception (les révolutions, extrusions, symétries, …), il faut spécifier si les objets sont des features, des surfaces, des parts... On peut également remarquer que le système d'axes automatiques n'existe pas sur Onshape. Si on veut prendre comme référence un axe passant par le centre d'un cylindre, il faut d'abord créer l’axe. Onshape est plus accessible aux novices en CAO que Creo, grâce au fonctionnement répétitif des features.

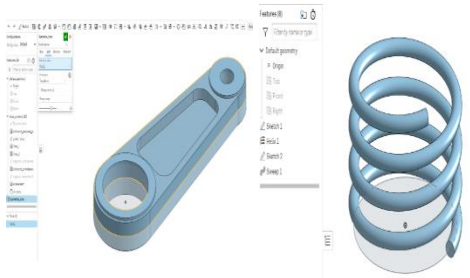


Figure 2 Création Volumique et d’un ressort sur Onshape

En surfacique, l'ajout de volume se fait comme sur un logiciel CAO classique. La fonction de répétition circulaire a été un peu difficile à maîtriser, le logiciel ne faisait pas ce qu’il était attendu et n’était donc pas très intuitif.
Le squelette utilisé est un squelette de positionnement. Dans Onshape, les plans créés n'apparaissent pas dans l’espace de travail d'assemblage (et ne peuvent pas être utilisés comme référence) car l'assemblage sur Onshape passe par des points appelés “Mate connectors”. Ces points sont créés par l’utilisateur dans une esquisse ou générés automatiquement sur un volume. Par exemple, un volume de révolution aura un mate connector au centre de l'extrémité de la pièce.

Ce système est donc différent de celui de Creo, qui fonctionne par liaisons mécaniques (coïncidence, contact coplanaire, distance, ...). L'arborescence de l’atelier d'assemblage est très simple : il ne répertorie que les pièces ajoutées à l'assemblage et les liaisons entre les pièces. On peut également noter que le logiciel prend en compte les montées en version des pièces (mais uniquement si une nouvelle version de la pièce a été mise à jour). Si une pièce est modifiée mais qu'une nouvelle version de la pièce n'est pas créée, le logiciel n'enverra pas de notification à ce sujet.

- Conversion

Le logiciel permet l’exportation des pièces en Parasolid, ACIS, STEP, IGES, Solidworks, Collada, Rhino, GLTF, OBJ et STL. Les dessins techniques peuvent être exportés aux formats PDF, DWG, DXF, et DWT. Les esquisses peuvent être exportées au format DWG et DXF.
Pour importer un assemblage, plusieurs solutions existent. Ainsi, il est possible d'importer un assemblage complet et de demander à séparer les pièces dans différents Part studio. Il est également possible de tout importer dans un seul Part Studio, ou de placer l'assemblage de l'ensemble dans un atelier d'assemblage et les autres pièces dans des Parts studios.

B. Scénario 2 : Etude sur Fusion 360

- Intuitivité de l’interface

À première vue, l'interface Fusion 360 est plus simple qu'un logiciel classique (comme Catia V5).

En effet, l'utilisateur n'est pas submergé par une multitude de features à l'écran. Seuls les plus utilisés sont affichés directement sur l'écran (esquisse, extrusion, etc.) (figure 3). Les ateliers de surfacique (“Surface”) et de volumique (“Solide”) permettent de choisir facilement le type de conception souhaitée et ainsi d'éviter certaines erreurs dans l'utilisation des features. Cependant, l'utilisation devient un peu plus compliquée pour un novice en CAO car de nombreux features sont "cachés" dans les menus "créer", "modifier", "assembler", etc, ce qui peut dérouter. Les initiés aux logiciels CAO ne devraient pas passer beaucoup de temps dans ces menus à rechercher la fonctionnalité souhaitée. L’arbre de conception est aussi moins accessible que celui d'Onshape, mais mieux ordonné : il contient quelques particularités qui peuvent dérouter l'utilisateur au début. En effet, l’arbre regroupe chaque objet spécifique (esquisses, corps, composants, etc.) sur la gauche de l’écran et les features d'ajout ou de modification de matière sont situées en bas de l'écran, ce qui nécessite un peu de recherche lors de la première utilisation. De plus, la liste de ces fonctionnalités n'est pas très longue et est plutôt difficile à lire. Cependant, pour revenir en arrière et modifier une révolution par exemple, il faut retourner en bas de cet écran et cliquer sur la fonction. La montée en version des pièces est facile car tout ce que vous avez à faire est d'enregistrer la pièce, comme avec n'importe quel logiciel de CAO conventionnel.

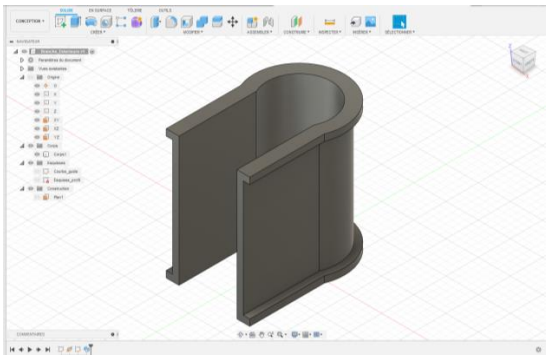


Figure 3 Interface de conception de Fusion 360

- Accessibilité

En termes d'accessibilité, le logiciel nécessite une installation légère sur l'ordinateur, mais ça reste un logiciel de CAO en mode SAAS.
Cette installation permet à l'utilisateur d'utiliser le logiciel aussi bien dans le cloud que sans connexion Internet s'il le souhaite. L'avantage est qu'avec une connexion instable, le logiciel ne demande pas de rafraîchir la page lorsqu'une connexion est perdue (contrairement à Onshape). Autodesk, l'éditeur de Fusion 360, recommande des caractéristiques d'ordinateur largement abordables sur le marché : 3 Go de stockage, 4 Go de RAM, un processeur graphique avec au moins 1 Go de RAM dédiée. Une version allégée de Fusion 360 est disponible dans un navigateur mais n'a pas été testée ici.

- Prise en main du logiciel

La prise en main de Fusion 360 se fait rapidement lorsqu'on souhaite créer une pièce pour la première fois. Cependant, certaines subtilités comme l'arborescence et la présence des features en bas de l'écran peuvent être dérangeantes. De plus, le logiciel utilise des concepts qui lui sont propres tels que les "corps" et "composants". En effet, lors de la création ou de la modification d'une pièce, le logiciel nous demande si nous voulons ajouter un corps, un composant, ou joindre, couper ou intersecter un corps déjà existant. Cela nécessite une recherche préalable car on peut rapidement se perdre dans ces termes. Fusion 360 donne en effet la possibilité à l'utilisateur de créer des assemblages de pièces à partir de pièces créées dans le même atelier de conception (espace de travail). En outre, le logiciel ne présente pas d'atelier d'assemblage et les assemblages se font dans les mêmes ateliers que ceux où nous devons créer les pièces. Ainsi, la fonction "corps" crée un corps distinct des premiers corps créés. Il en va de même pour les composants, mais un composant autorise des mouvements sur la pièce (il autorise donc des liaisons avec une autre pièce), alors que le corps reste fixe et ne peut pas comprendre de liaison.

- Collaboration

La partie collaborative est assez proche d'un système PLM. Elle intègre deux notions : les hubs et les projets. Les projets sont intégrés dans des hubs. Chaque hub comprend une équipe dans laquelle les utilisateurs possèdent différents rôles (administrateur d'équipe, membre d'équipe, contributeur de projet).
Chaque rôle intègre certains droits. De même, chaque projet comprend trois rôles, qui autorisent certaines actions (administrateur, éditeur, visualiseur). Ces rôles sont délivrés en fonction du rôle de l'utilisateur dans le hub. Pour ce qui est de la collaboration en temps réel, le logiciel nous indique la présence d'un autre utilisateur sur le projet ou une pièce. Contrairement à Onshape, il ne suffit pas de créer une esquisse pour que l'autre utilisateur la voit, il faut enregistrer la pièce pour que l'autre utilisateur connecté puisse voir ce qui a été fait.

- Conception (volumique, surfacique, et assemblage)

La conception se fait dans un atelier appelé "conception".
Attention, une conception peut contenir plusieurs pièces dans un même espace. Cette partie est imagée par la conception d'un amortisseur de voiture via la méthode squelette. Le logiciel Fusion360 se base principalement sur les esquisses qui vont alimenter tous les features (même les trous).
Le volumique de Fusion 360 fonctionne exactement de la même manière que les logiciels de CAO classiques. Les fonctions de corps et composants sont intéressantes car elles permettent de créer un assemblage de pièces elles-mêmes conçues dans le même espace de travail ("conception"). Le surfacique de Fusion 360 ressemble fortement à celui des logiciels classiques de CAO. La particularité de Fusion360 est qu'il n'y a pas d'atelier "assemblage". Toutes les fonctions de conception (volumique, surfacique, …) sont présentes dans le même espace de travail que l'assemblage.
Fusion360 propose aussi la mise en position via des points, avec exactement le même système qu'Onshape. Comme sur Onshape, ces points sont soit créés dans une esquisse soit sous-entendus sur un volume.
L'arborescence de Fusion360 est complète : on peut voir chaque esquisse créée dans une pièce directement dans l'arbre. Cependant, pour modifier une pièce, il faut tout de même la modifier dans son contexte d'assemblage. On peut aussi noter que le logiciel prend en compte les mises à jour des pièces seulement si elles sont enregistrées. Lorsqu'on importe un assemblage dans Fusion 360, le logiciel intègre l'assemblage de l'ensemble avec les mêmes sous-ensembles créés.

- Conversion

Le logiciel permet d'exporter en .f3d (qui est le format propre à Fusion360), .ipt, .dwg, .dxf, .fbx, .igs/ .iges, .obj, .sat, .skp, .smt, .step, .stl. pour les pièces et les assemblages, et en .pdf, .dwg, .dxf et .csv pour les dessins de définition.

IV. RESULTATS DE L'ETUDE

Afin d'avoir des résultats concrets et de démontrer ce qui diffère entre les deux plateformes, nous avons défini les critères cités précédemment. Les notes, figurant dans le tableau 1 pour la comparaison des fonctionnalités des deux logiciels, ont été attribuées en gardant en vue le fait que les logiciels seraient utilisés par des étudiants arrivant dans le cursus d'ingénierie mécanique, en n'ayant pas nécessairement utilisé à un logiciel CAO auparavant. Ainsi, l'intuitivité de l'interface va poser la question de ce que voit un novice en CAO quand il ouvre la plateforme : est-ce qu'il y a trop d'informations à l'écran ? Est-ce que la plateforme est abordable et compréhensible au premier abord ? D'où le critère « intuitivité de l'interface » a été déterminée comme un critère moyennement important puisque ce n'est pas ce critère-là qui va déterminer si le logiciel est complexe ou non, une fois que l'utilisateur sait où aller chercher le feature désiré, ce critère n'apparaît plus.

Pour ce critère, on a attribué un coefficient d'importance 6/10. Pour ce critère Onshape a reçu une note de 9/10 et Fusion 360 a reçu une note de 7/10.

L'accessibilité repose sur les conditions d'utilisation du logiciel : est-ce que l'étudiant doit procéder à une installation (lourde ou légère) ? Est-ce qu'il a besoin d'un ordinateur avec certaines caractéristiques ? Doit-il posséder une connexion internet performante ? Ce critère a tant d'importance pour assurer une formation fluide aux étudiants, d'où, il est très important pour l'étudiant de pouvoir accéder au logiciel depuis son ordinateur personnel, sans rencontrer de problème. De ce fait, on lui a attribué un coefficient de 9/10. A ce critère, Onshape est noté 6/10 et Fusion 360 9/10.

Le critère "concevoir" relie le logiciel directement à son utilisation principale : la conception. On parle ici de toutes les fonctionnalités liées à la conception, et aux ateliers de modélisation. Les questions sous-jacentes portent sur les possibilités offertes par ces logiciels via leurs fonctionnalités : quels features sont présents ou absents, et est-ce que cela pose un problème dans la conception du système ? Ce critère est la moyenne des conceptions volumique et surfacique, et de l'assemblage, qui sont considérés des objectifs principaux de la formation de TN20. De ce fait, on a attribué un coefficient 10/10 pour ce critère, objectif principal de cette étude. La note attribuée à Onshape, après expérimentation, est 7.7/10 tandis que Fusion 360 a reçu une note de 8.3/10.

La prise en main prendra en compte le temps d'adaptation d'un nouvel utilisateur au logiciel : est-ce que le logiciel a un fonctionnement similaire sur les features, et si oui, est-ce que cela facilite son utilisation ? Par exemple, on peut relever que sur Onshape, l'interface sera souvent la même sur les différents features : est-ce qu'on travaille sur une surface ou un volume, puis ce sont les opérations booléennes, puis on sélectionne les entités sur lesquelles on travaille. Pour ce critère on a attribué un coefficient de 7/10, pour lequel Onshape a reçu une note de 7/10 et Fusion 360 a été noté 6/10.

Le critère de la collaboration est important puisque c'est une fonctionnalité supplémentaire très intéressante par rapport aux logiciels CAO classiques. De plus, la matière d'apprentissage de la CAO se fait en binôme au sein de l'Université de Technologie de Compiègne. Cela nous a mené à déterminer que la collaboration est un critère important, d'autant plus que le cloud et le système collaboratif prennent une place de plus en plus importante dans les entreprises aujourd'hui. C'est pour cela on lui a affecté un coefficient de 8/10, sur lequel Onshape et Fusion 360 ont eu la même note de 8/10.

La conversion renvoie aux formats possibles d'export et d'import. Ces formats permettent l'interopérabilité entre différents logiciels. De plus, dans le cadre d'une transformation numérique dans une industrie 4.0, il semble être un critère assez important aussi bien que la collaboration. D'où, ce critère a été défini au même niveau que la collaboration et on lui a affecté un coefficient de 8/10, sur lequel les deux logiciels testés ne semblent pas être assez mature en recevant une note similaire de 6/10.

Les fonctionnalités supplémentaires ne sont qu'un plus. D'où on leur a attribué un coefficient de 3/10. Pour ce critère Onshape a reçu une note de 7/10 tandis que Fusion 360 a reçu une note de 8/10.

On peut remarquer, d'après le tableau 1, que les notes sont relativement proches et que chaque logiciel a ses particularités. Ainsi, Fusion 360 présente plus de fonctionnalités et est donc plus simple d'utilisation pour la conception, mais est moins intuitif qu'Onshape, ce qui peut perdre un novice en CAO.

	Onshape	***Fusion 360***	***Coefficient (/10)***
Interface intuitive	9	7	6
Accessibilité	6	9	9
Concevoir (surfacique, volumique, assemblage, méthode squelette)	7.7	8.3	10
Prise en main du logiciel	7	6	7
Collaboration	8	8	8
Conversion	6	6	8
Fonctionnalités supplémentaires	7	8	3
Moyenne	7.2	7.53	

Tableau 1. Comparaison critériée entre Onshape et Fusion 360

V. CONCLUSION

Dans le cadre d'implantation d'un logiciel de modélisation géométrique pour la formation d'ingénierie mécanique à l'UTC et plus précisément pour l'unité de valeur TN20, nous avons lancé le projet d'expérimentation deux logiciels Onshape et Fusion 360, pour étudier leurs capacités à être utilisés par les étudiants généralement travaillant en binôme voire en trinôme. Cette expérimentation a porté sur l'évaluation des deux logiciels sur certains critères (l'intuitivité, la prise en main, l'accessibilité, la collaboration, la conception et la conversion) qui sont, soient issus de la revue de littérature qu'on a développée dans la première section, soient issus des objectifs de TN20. Cette étude a montré que Onshape a un côté plus attractif que Fusion 360, d'autant plus que sa philosophie est la même pour tous les features, ainsi, une erreur est vite repérée. Fusion 360 est plus intéressant qu'Onshape, au niveau des assemblages, où le système d'Onshape est un peu difficile à saisir. Le choix de l'assemblage par méthode squelette n'était pas bon, les logiciels permettant déjà de collaborer efficacement via les sections commentaires et annotations, ainsi que par les fonctionnalités déjà présentes. De plus, Fusion 360 peut être utilisée hors ligne, ce qui est un avantage non négligeable, notamment dans le cas de connexion internet instable, où les déconnexions sont très fréquentes sur Onshape.

Comme tous les logiciels CAO en mode SAAS, Fusion 360 et Onshape, ne sont pas sujets à des maintenances lourdes. En effet, les mises à jour des logiciels en mode SAAS se font directement depuis les serveurs de l'éditeur du logiciel, ainsi, le client n'a pas à gérer d'éventuelles montées en version du logiciel. Lors d'une mise à jour, le client se connectera sur son logiciel et aura alors directement accès à la dernière version du

logiciel. Fusion 360 demande une légère installation sur l'ordinateur en local (c'est ce qui permet d'utiliser le logiciel hors ligne), ce qui peut éventuellement demander une petite gestion de cette installation sur les ordinateurs d'une entreprise. De plus, les mises à jour se font sur les serveurs de l'éditeur, que les données sont gérées à distance (mais qu'on peut les importer si on veut travailler hors ligne). La maintenance d'Onshape est quasiment nulle, car il est entièrement accessible via un navigateur.

Les deux logiciels présentent divers avantages, à commencer par le stockage. En effet, le cloud permet aux utilisateurs de ne pas avoir à gérer leurs données localement. L'investissement dans divers équipements chers tels que des serveurs. La quantité de stockage va dépendre d'un accord entre un éditeur de logiciel et l'institution. Cette notion de stockage présente quand même quelques inconvénients, ainsi, une entreprise n'aura plus la main sur ses données car elles seront présentes sur les serveurs de l'éditeur.

A l'issu de cette étude et en se basant sur la comparaison faite, on s'oriente vers l'utilisation de Fusion 360 ayant une moyenne légèrement supérieure à celle obtenue par Onshape, en se basant de plus sur la condition de stabilité de connexion, Fusion 360 pourra assurer le déroulement d'une séance de l'UV TN20 sans souci.

VI. REFERENCES

[1] Maranzana, N., Segonds, F., Lesage, F., & Nelson, J. (2012, July). "Collaborative design tools: a comparison between free software and PLM solutions in engineering education". In IFIP International Conference on Product Lifecycle Management pp. 547-558. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35758-9_49

[2] Fielding, E. A., McCardle, J. R., Eynard, B., Hartman, N., & Fraser, A. (2014). "Product lifecycle management in design and engineering education: International perspectives". Concurrent Engineering, 22(2), pp123-134. https://doi.org/10.1177/1063293X13520316

[3] Bedolla, J. S., D'antonio, G., Segonds, F., & Chiabert, P. (2017, July). "PLM in Engineering Education: A Pilot Study for Insights on Actual and Future Trends". In IFIP International Conference on Product Lifecycle Management pp. 277-284. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72905-3_25

[4] Eiden, A., & Apostolov, H. (2017). Crowd Engineering-Bringing Full Cloud CAD into the Lab. "In DS 88: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering and Product Design Education (E&PDE17), Building Community: Design Education for a Sustainable Future", Oslo, Norway, 7 & 8 September 2017 (pp. 170-175). ISBN: 978-1-904670-84-1

[5] Junk, S., & Spannbauer, D. (2018, April). "Use of cloud-based computer aided design software in design education". 17th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET) (pp. 1-6) IEEE. http://doi.org/10.1109/ITHET.2018.8424769.

[6] Barrie, J., 2016. "Applications for cloud-based CAD in design education and collaboration". In DS 83: Proceedings of the 18th International Conference on Engineering and Product Design Education (E&PDE16), Design Education: collaboration and Cross-Disciplinarity, Aalborg, Denmark, 8th-9th September 2016, pp. 178-183.

[7] Junk, S., & Kuen, C. (2016). "Review of open source and freeware CAD systems for use with 3D-printing". Procedia CIRP, vol. 50, pp430-435. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.174

[8] Rassovytska, M., & Striuk, A. (2018). Mechanical engineers training in using cloud and mobile services in professional activity. arXiv preprint arXiv:1807.00313. Vol. 1844 (2017) pp348-359, arXiv:1807.00313

[9] Le, N. (2018). "Product Design with Cloud Based and Desktop CAD software: A comparison between SolidWorks and Onshape". Degree Thesis, Plastics Technology, Arcada University,Finland

[10] Galimova, E. Y. (2020, September). "Discussion of cloud CAD software testing approach". In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Vol. 919, No. 5, p. 052034. IOP Publishing.

[11] Wu, D., Terpenny, J., & Schaefer, D. (2017). "Digital design and manufacturing on the cloud: A review of software and services-RETRACTED". Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 31(1). Vol 31, 104–118. https://doi :10.1017/S0890060416000305

[12] Wu, D., Rosen, D. W., Wang, L., & Schaefer, D. (2015). "Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation". Computer-Aided Design, Vol.59, pp1-14. https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.07.006

[13] Yip-Hoi, D. M. "Cloud Based Computer-Aided Engineering Education: Finding the Silver Lining", ASEE'S virtual Conference, 22-26 June 2020

Session 3-B : Fabrication additive

Influence des paramètres de conception sur la densité relative de cellules à base de surfaces minimales triplement périodiques (TPMS) pour la fabrication additive

Emilio Ramírez
Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP
38000 Grenoble, France
emilio-adrian.ramirez-salazar@grenoble-inp.fr

François Villeneuve
Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP
38000 Grenoble, France
francois.villeneuve@grenoble-inp.fr

Nicolas Béraud
Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP
38000 Grenoble, France
nicolas.beraud@grenoble-inp.fr

Matthieu Museau
Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP
38000 Grenoble, France
matthieu.museau@g-scop.fr

Franck Pourroy
Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP
38000 Grenoble, France
franck.pourroy@grenoble-inp.fr

Résumé— Les motifs tridimensionnels ont été abondamment étudiés dans les approches de conception pour la fabrication additive de structure internes légères. En particulier, les structures à base de surfaces minimales triplement périodiques (TPMS) ont déjà été explorées du fait de leurs bonnes performances mécaniques vis-à-vis de celles des structures treillis traditionnelles. Les travaux présentés analysent l'influence des paramètres de conception sur la densité relative de cellules à base de TPMS de type Primitive et Gyroïde. Les résultats montrent une corrélation linéaire entre la densité relative et l'épaisseur des structures, et une relation non linéaire à la longueur des cellules. Les équations permettant d'estimer la densité relative en fonction de ces deux paramètres sont déterminées. Elles permettront à terme la sélection en optimisation topologique des bons paramètres dimensionnels pour ces structures, en tenant compte des contraintes de fabrication.

Mots-clés— Modélisation géométrique, Méthodes de conception, Fabrication additive, Surface minimale triplement périodique

I. INTRODUCTION

La Fabrication Additive (AM) est une technologie de fabrication innovante ayant entre autres l'avantage sur les procédés traditionnels de produire directement des pièces fonctionnelles de grande complexité topologique [1], [2]. Pour tirer profit des potentiels de l'AM, des méthodologies de conception pour la fabrication additive (DFAM) ont été développées incluant, entre autres, des stratégies d'optimisation topologiques et des conceptions de structures multi échelles [3]. En particulier, la conception topologique vise à dimensionner la partie structurelle de pièces à poids minimum supportant des chargements, tout en permettant la répartition spatiale des déformations plastiques dans les scénarios d'absorption d'énergie, entre autres fonctionnalités [4]. En conséquence, des matériaux cellulaires, obtenus par assemblage de cellules élémentaires, peuvent être structurés de manière à créer des structures robustes. Leurs capacités à optimiser de manière simultanée la rigidité, la résistance mécanique et la masse ont été considérées comme intéressantes pour le développement de structures légères [3].

Des travaux récents se sont focalisés sur l'utilisation de surfaces minimales triplement périodiques (TPMS) pour créer des couches de remplissage [6]. Les TPMS sont des surfaces définies mathématiquement de courbure moyenne nulle. Un des avantages de ce type de structures est qu'elles offrent la possibilité de créer des matériaux avec des liaisons continues, du fait de leur capacité à diviser périodiquement l'espace [7]. De plus, elles ont été jugées intéressantes comme alternative au développement de structures légères, en raison de leurs performances mécaniques globalement meilleures comparées aux treillis classiques [8].

En particulier, les TPMS de type cubique centré (BCC) avec des densités relatives entre 10% et 30% ont un module de Young, une limite élastique et une résistance à la compression supérieures à des structures treillis traditionnelles [9]. De plus, une comparaison sur la capacité d'absorption d'énergie entre des structures BBC, Primitive, Diamant et Gyroïde, qui sont des exemples classiques de TPMS, a montré que la structure Diamant a la performance mécanique la plus élevée, suivie par les structures Gyroïde, Primitive et BCC [10].

Glossaire

α	Constante de relation linéaire
β	Constante de relation puissance
C	Paramètre de niveau
$f_{P,G}$	Fonction définissant les TPMS
d	Epaisseur de la paroi
γ_k	Valeur de gradient
$\boldsymbol{\theta}_k$	Vecteur d'optimisation
L	Longueur d'une cellule élémentaire
L_i	Longueur de la structure
λ_i	Facteur de périodicité de la structure
n_i	Nombre de cellules élémentaires de la structure
RD	Densité relative à partir de la CAO
ρ^*	Fonction de densité relative
RSS	Somme des carrés des résidus

Concernant la caractérisation géométrique de TPMS, des travaux ont analysé les effets de la variation du paramètre de niveau contenu dans la définition mathématique du TPMS. Ce paramètre influence les volumes séparés par la surface [11] et est utilisé pour contrôler la position de la frontière entre le vide et le matériau plein [9]. La variation du paramètre de niveau dans les structures Gyroïdes a été testée. Il a été montré que la densité relative, c'est-à-dire le rapport entre le volume de la structure et le volume de la boite englobante, est directement proportionnel à la valeur du paramètre de niveau [11].

Cependant, les modèles obtenus directement par cette approche ne garantissent pas une distribution constante de l'épaisseur des parois au sein de la cellule élémentaire de la structure. Ces variations d'épaisseur peuvent poser des problèmes de dissipation de chaleur lorsqu'on fabrique ces structures avec des procédés de fabrication additive métallique du type fusion laser (SLM) ou des problématiques de trajectoires avec les procédés additifs à base de soudage (WAAM), sans compter les difficultés à corréler la densité relative avec les paramètres mesurables d'épaisseur et de longueur des structures.

D'autres travaux ont ensuite proposé des modèles à épaisseur constante obtenus par décalage de la surface TPMS pour faire des tests de caractérisation mécanique [7], [8], [10], mais ils ne donnent pas d'information sur les effets de l'épaisseur et de la longueur sur la densité relative des structures. Or l'utilisation de ces informations est d'une grande importance pour aider à la détermination des dimensions des structures, en prenant en compte les contraintes du moyen de production AM, en particulier dans les procédures d'optimisation topologique utilisant l'algorithme des densités intermédiaires SIMP (solid isotropic material with penalization). Enfin l'utilisation de structures à densité variable a été identifiée comme une opportunité d'améliorer les approches d'optimisation topologique [12].

Par conséquent, l'objectif principal de ce travail est d'explorer les effets des paramètres de conception, c'est-à-dire l'épaisseur d des parois et la longueur de la cellule élémentaire $L = L_i/n_i$, qui détermine la taille de chaque instance individuelle de la structure, sur la densité relative de structures TPMS Primitive et Gyroïde d'épaisseur constante. Les paramètres considérés sont représentés (Figure 1).

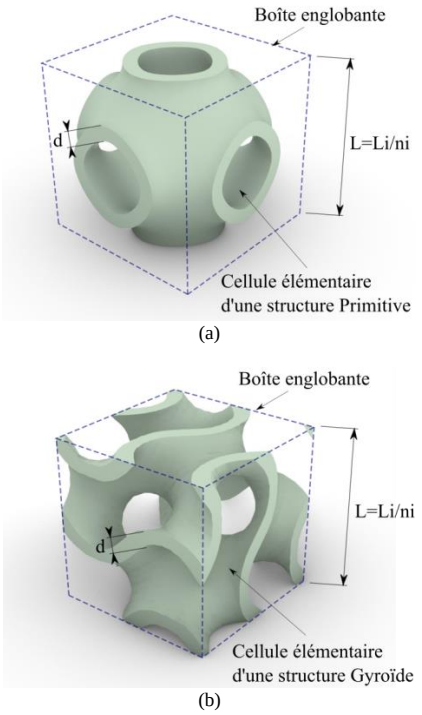


Figure 1. PARAMETRES DE CONCEPTION POUR LES STRUCTURES TPMS A) PRIMITIVE ET B) GYROÏDE

La fabrication de structures TPMS a été étudiée entre autres technologies pour le SLM [6], [8–10], le Selective laser sintering (SLS) [7], et pour la stéréolithographie (SLA) [3], [11], cependant aucune information n'a été trouvée dans la littérature pour leur fabrication en WAAM. Dans le contexte de cette étude, des travaux à venir testeront la fabricabilité de ces structures par WAAM, ce qui fait que les dimensions retenues pour l'étape de modélisation ont été adaptées à ces contraintes de fabrication.

Le présent papier est organisé comme suit. Tout d'abord la définition mathématique des structures étudiées est détaillée, ainsi que les méthodes de génération utilisées pour obtenir les modèles TPMS. A l'aide de ces méthodologies, plusieurs ensembles de modèles Primitif et Gyroïde sont générés. La densité relative obtenue à partir des données CAO est ensuite corrélée aux paramètres de conception pour analyser leurs effets et proposer des équations de relation pour chaque structure étudiée. Les équations déterminées pour calculer la densité relative sont ensuite ajustées pour minimiser les erreurs d'approximation. L'erreur maximum et la somme des carrés des résidus entre la densité relative obtenue par CAO et celle obtenue par l'équation sont ensuite comparés avant et après ajustement. Une conclusion finalise le papier.

II. MODELISATION DES STRUCTURES TPMS

Cette section détaille tout d'abord les définitions mathématiques des structures Primitive et Gyroïde, et l'algorithme principal utilisé pour la génération des surfaces. Ensuite la méthodologie générale de construction des TPMS est présentée.

A. *Génération des surfaces TPMS*

La génération des surfaces TPMS est pilotée par une équation implicite spécifique à chaque structure. Pour la présente étude, les fonctions f_P pour les surfaces Primitives et f_G pour les Gyroïdes sont données dans l'équation (1) et l'équation (2) respectivement. Elles ont été adaptées à partir d'un article de synthèse sur les algorithmes et les équations des TPMS de von Schnering and Nesper [13] et une combinaison de travaux antérieurs présentés dans la littérature [3], [6], [9]–[11]. Dans ces équations, la périodicité des structures est contrôlée par le facteur de périodicité λ_i, fonction du nombre n_i de cellules élémentaires dans une structure tridimensionnelle et de la longueur L_i de ces structures dans les directions x, y et z, comme décrit dans l'équation (3).

éq. (1) : $$f_P(x,y,z) = \cos(\lambda_x x) + \cos(\lambda_y y) + \cos(\lambda_z z)$$

éq. (2) : $$f_G(x,y,z) = \cos(\lambda_x x)\sin(\lambda_y y) + \cos(\lambda_y y)\sin(\lambda_z z) + \cos(\lambda_z z)\sin(\lambda_x x)$$

éq. (3) : $$\lambda_i = 2\pi\frac{n_i}{L_i},\ \text{for } i = x,y,z$$

Pour la représentation des surfaces, la modélisation des TPMS utilise classiquement l'algorithme Marching Cubes, qui est une procédure efficace pour extraire des iso-surfaces dans des espaces de données 3D [6]. L'algorithme génère la surface par une approche de voxelisation en évaluant la fonction implicite $v(x,y,z)$ présentée dans l'équation (4). Chaque voxel est défini comme contenant ou comme étant en dehors de la surface. Pour cela, les régions où $v(x,y,z) \leq 0$ sont définies comme contenant une partie de la surface, tandis que celles où $v(x,y,z) > 0$ sont définies comme vides. A partir de l'équation (4), une valeur fixe $C = 0$ est utilisée dans l'algorithme Marching Cubes pour générer la forme fondamentale du TPMS.

éq. (4) : $$v(x,y,z) = f_{P,G}(x,y,z) - C$$

B. *Méthodologie générale de modélisation d'un TPMS*

La méthodologie définie pour modéliser les structures TPMS est montrée (Figure 2). Elle a été implémentée dans la suite CAO Rhinoceros 6, à l'aide de l'outil de programmation graphique Grasshopper pour la définition paramétrique de la surface et l'extension Millipede pour la génération de la forme fondamentale de la structure.

La modélisation commence par la saisie des données d'entrée, soit la longueur de la structure L_i, l'épaisseur de paroi d et le nombre d'instances de cellules élémentaires n_i souhaité. Puis, à partir de L_i et n_i la périodicité de la structure est établie et le domaine d'application de la fonction représentant l'identité mathématique de la structure est déterminé. Ces deux informations sont stockées dans les composantes de la fonction. Un outil Iso-surface utilise l'algorithme Marching cubes pour générer la forme fondamentale de la structure. Cette forme est utilisée comme surface centrale à partir de laquelle les frontières internes et externes du modèle final sont obtenues par un décalage d'un demi épaisseur d dans les deux directions.

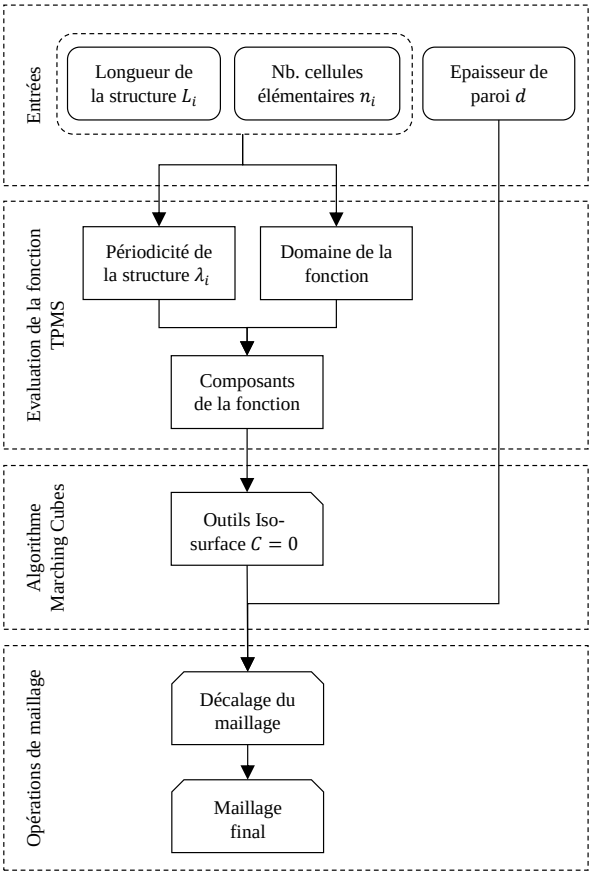


Figure 2. METHODOLOGIE DE MODELISATION D'UNE STRUCTURE TPMS.

Des opérations de maillage final utilisent des opérations de découpage et de fermeture sur les faces externes des cellules élémentaires pour obtenir une structure fermée.

III. ANALYSE DES RELATIONS ENTRE LES PARAMETRES DES STRUCTURES

A l'aide de la procédure de modélisation proposée, plusieurs ensembles de structures Primitive et Gyroïde ont été générés, avec différentes longueurs et épaisseurs. Toutes les données des parties qui suivent correspondent à des valeurs de structures unitaires (une seule cellule élémentaire), car elles n'ont qu'une variation négligeable de densité relative comparée à une structure de plusieurs cellules élémentaires (différence inférieure à 0,07%) et permettent une meilleure performance de calcul. Il convient également de noter que les modèles ont été générés pour tenir dans une boîte englobante de taille L (comme montré la Figure 1), supposant la condition $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z$. Pour chaque modèle, le densité relative RD issue du modèle CAO maillé a été calculée comme le rapport entre le volume de la structure et celui d'une boîte cubique englobante, comme montré dans l'équation (5).

éq. (5) : $$RD = \frac{volume\ de\ la\ structure}{volume\ de\ la\ boîte\ englobante}$$

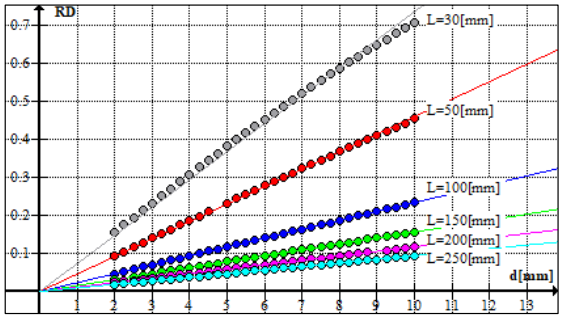


Figure 3. DENSITE RELATIVE RD EN FONCTION DE L'EPAISSEUR DE PAROI d D'UNE CELLULE ELEMENTAIRE PRIMITIVE D'EPAISSEUR CONSTANTE.

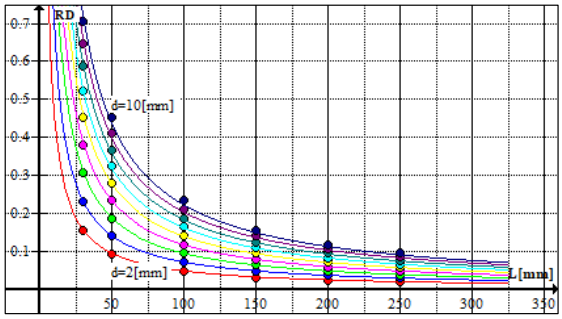


Figure 4. DENSITE RELATIVE RD EN FONCTION DE LA LONGUEUR L D'UNE CELLULE ELEMENTAIRE PRIMITIVE D'EPAISSEUR CONSTANTE.

Les paragraphes suivants présentent en détail les dimensions de modèles utilisées pour l'analyse, la représentation graphique des données obtenues et la détermination de la fonction de densité relative.

A. *Structures Primitive*

Des modèles de cellules élémentaires Primitive de longueur comprise entre 30 et 250mm, et d'épaisseur de paroi comprise entre 2 et 10mm ont été considérés pour l'analyse de l'influence des paramètres de conception sur la densité relative. La relation densité relative fonction de l'épaisseur d a tout d'abord été analysée en traçant les différentes valeurs RD obtenues pour chaque cellule. La Figure 3 montre une relation linéaire entre la densité relative et d, avec une pente diminuante quand L augmente.

Ensuite, le graphique donnant la relation entre la densité relative et L a été utilisé pour interpréter l'influence de la variation de L qui apparait comme une relation non linéaire décroissante (Figure 4). Les courbes présentées dans la Figure 4 correspondant à différentes valeurs de d avec un incrément de 1mm. Seuls les labels pour 2 et 10mm ont été indiqués pour une meilleure lecture du graphique.

B. *Structures Gyroïde*

La même procédure détaillée a été utilisée pour les structures Gyroïdes avec des longueurs comprises entre 50 et 250mm et des épaisseurs de paroi entre 2 et 15mm. Comme on peut le constater dans la Figure 5 et la Figure 6, les structures Gyroïde présentent le même comportement que les structures Primitive concernant les relations de RD en fonction de d et L respectivement.

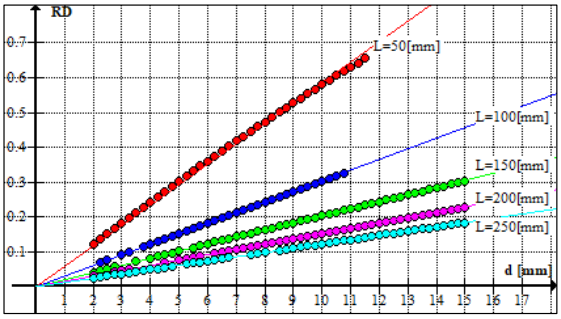


Figure 5. DENSITE RELATIVE RD EN FONCTION DE L'EPAISSEUR DE PAROI d D'UNE CELLULE ELEMENTAIRE GYROÏDE D'EPAISSEUR CONSTANTE.

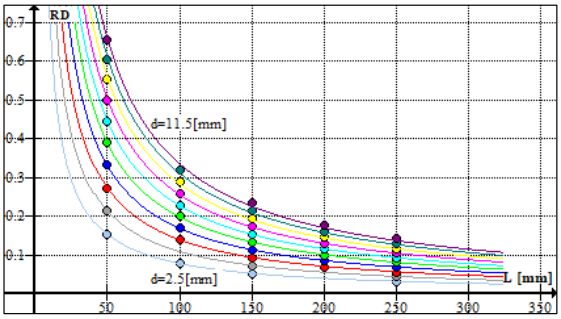


Figure 6. DENSITE RELATIVE RD EN FONCTION DE LA LONGUEUR L D'UNE CELLULE ELEMENTAIRE GYROÏDE D'EPAISSEUR CONSTANTE.

De la même façon, la Figure 6 ne donne que les labels pour 2,5 and 11,5mm pour une meilleure lisibilité. Chaque courbe représente un incrément de 1mm d'épaisseur entre ces deux extrêmes.

Bien que les modèles générés avec des épaisseurs entre 2 et 15mm aient été considérés pour l'analyse initiale de l'influence de d, l'étude des relations fonction de L et l'analyse qui suit pour la détermination d'une fonction pour les structures Gyroïde considère uniquement les modèles d'épaisseur comprise entre 2,5 and 11,5mm, pour une distribution des points plus uniforme.

C. *Développement de la fonction densité relative*

Une équation générale est proposée pour exprimer la densité relative en fonction des deux paramètres épaisseur de paroi d et longueur L. L'équation (6) combine la relation linéaire avec d et la fonction puissance décroissante avec L; les paramètres α et β sont considérés comme constants.

éq. (6) : $$\rho^*(d, L) = \alpha\, d\, L^{-\beta}$$

Une recherche initiale a été menée pour estimer la variation des exposants des courbes puissance à partir des données représentées sur les graphiques RD vs L (Figure 4 et Figure 6). Pour cela, une application open source a été utilisée pour trouver l'exposant β de la fonction puissance pour chaque valeur de d par régression aux moindres carrés des données. Même si le modèle proposé considère que d et L sont indépendants, une légère corrélation linéaire a été trouvée entre la valeur de l'exposant β et d. Néanmoins, cet exposant a été traité comme une constante égale à la valeur moyenne des exposants obtenus. En conséquence les facteurs constants obtenus sont $\beta_P = 0.981$

et $\beta_G = 0.978$ pour les structures Primitive et Gyroïde, respectivement.

Cette hypothèse a ensuite été vérifiée en ajustant les données à une courbe de la forme $\rho_P^*(L) = \alpha\, d\, L^{-0.981}$ pour les structures Primitive, et $\rho_G^*(L) = \alpha\, d\, L^{-0.978}$ pour les structures Gyroïde, et attestée par une valeur résultante de R^2 comprise entre 0,99 et 1. Ensuite les facteurs constants pour la dépendance linéaire $\alpha_P = 2.081$ et $\alpha_G = 2.607$ ont été déterminés pour les structures Primitive et Gyroïde, respectivement.

IV. AJUSTEMENT DES PARAMETRES DE LA FONCTION DE DENSITE RELATIVE

A partir des valeurs initiales obtenues pour α et β, la densité relative des structures a été calculée et comparée à la valeur initiale RD, conduisant à une erreur globale absolue en pourcentage entre 0,97% et 4,51% pour les structures Primitive, et entre 0,22% et 7,72% pour les structures Gyroïde. Pour corriger ces écarts un algorithme du gradient a été utilisé pour réduire la somme des carrés des résidus, définie dans l'équation (7), où j correspond aux différents ensembles (d, L).

éq. (7) : $$RSS(\alpha, \beta) = \sum_j \left(\rho^*(d, L)_j - RD_j\right)^2$$

Dans ce processus, les données CAO sont initialement stockées dans une variable RD. Puis la fonction RSS est calculée et les valeurs trouvées précédemment pour α et β sont considérées comme des données initiales $\boldsymbol{\theta}_0\ (\alpha_0, \beta_0)$ et stockées dans une variable distincte θ_k utilisée dans le processus itératif.

A chaque itération, une nouvelle valeur $\boldsymbol{\theta}_{k+1}$ est calculée par une diminution de $\gamma_k\, \nabla RSS(\boldsymbol{\theta}_k)$ à partir du θ_k initial, avec γ_k la valeur de l'étape d'optimisation et $\nabla RSS(\boldsymbol{\theta}_k)$ le gradient de RSS évalué à l'étape $\boldsymbol{\theta}_k$. L'algorithme s'arrête une fois que la variation de $\gamma_{k+1} - \gamma_k$ tombe sous une valeur de précision, qui a été fixée à 1E-06.

A. *Structures Primitive : résultats de l'ajustement de la fonction ρ_P^**

A partir des valeurs initiales $(\alpha_0, \beta_0) = (2.081, 0.981)$, l'algorithme présenté a été codé en Python pour obtenir les paramètres optimisés $(\alpha, \beta) = (2.141, 0.982)$ après 20 itérations, avec un pas initial de $\gamma_0 = 0.001$. L'équation corrigée $\rho_P^*(d, L)$ pour les structures Primitive est donnée dans l'équation (8).

éq. (8) : $$\rho_P^*(d, L) = 2.141\, d\, L^{-0.982}$$

La Tableau 1 résume les RSS et le pourcentage absolu d'erreur avant et après l'optimisation par le gradient. Globalement, le pourcentage absolu d'erreur est passé de 4.51% à 1.98% pour des valeurs de L entre 50 et 250mm, avec une réduction d'un ordre de grandeur du RSS obtenu.

L'erreur en pourcentage et le RSS sont aussi présentés pour chaque longueur testée. Les erreurs tendent à diminuer quand la longueur augmente. Comme vu sur les graphiques, les modèles de plus grande longueur correspondent à des densités relatives plus petites, qui sont mieux ajustés à la tendance linéaire en fonction de d. Cette dépendance linéaire tend à diminuer pour des densités relatives supérieures à 0.6, et de façon particulièrement visible pour le cas $L = 30$mm (Figure 3). Bien que les données du modèle pour des longueurs de 30mm aient été utilisées pour élaborer les valeurs initiales (α_0, β_0), leurs RD correspondantes n'ont pas été utilisées pour calculer les paramètres optimisés car elles introduisent des erreurs dues à leur comportement non linéaire pour les valeurs de densité relative les plus importantes. Un scénario différent d'estimation initiale à partir de ces données a également été testé, qui a permis d'obtenir les mêmes paramètres optimisés après un processus itératif plus long, mais ces données ne sont pas présentées dans ce papier.

B. *Structures Gyroïde : résultats de l'ajustement de la fonction ρ_G^**

A partir des valeurs initiales $(\alpha_0, \beta_0) = (2.607, 0.978)$, les paramètres optimisés $(\alpha, \beta) = (2.568, 0.966)$ ont été obtenus après 10 itérations, avec un pas initial de $\gamma_0 = 0.001$. L'équation corrigée $\rho_G^*(d, L)$ pour les structures Gyroïde est donnée dans l'équation (9).

éq. (9) : $$\rho_G^*(d, L) = 2.568\, d\, L^{-0.966}$$

Le Tableau 2 résume les RSS et le pourcentage absolu d'erreur avant et après l'optimisation par le gradient. Globalement, le pourcentage absolu d'erreur est passé de 7.72% à 4.34%, avec une réduction d'un ordre de grandeur du RSS obtenu. De la même façon que pour les structures Primitive, il est constaté une augmentation de l'erreur pour les plus petites longueurs (correspondant aux plus grandes densités relatives) des structures Gyroïdes. De plus les structures Gyroïdes tendent à présenter une densité relative plus importante que les structures Primitive pour une valeur donnée d'épaisseur et/ou de longueur, d'où l'augmentation du RSS et des pourcentages absolus d'erreur.

V. CONCLUSIONS

Dans ce papier, une méthodologie de modélisation générale basée sur le décalage de TPMS obtenues par un algorithme Marching cubes a été présentée pour créer divers ensembles de structures Primitive et Gyroïde, afin d'étudier les effets sur la densité relative des cellules élémentaires de l'épaisseur de paroi d et de la longueur L. Comme indiqué précédemment, aucune information n'a été trouvée dans la littérature concernant l'effet combiné de l'épaisseur et de la longueur sur la densité relative des structures Primitive et Gyroïde. La présente étude comble cette lacune dans l'analyse et propose des outils pour le calcul de la densité relative.

Les premières observations préliminaires ont montré que la densité relative des structures présente une relation linéaire par rapport à d et une relation puissance décroissante par rapport à L. Plus précisément, la dépendance linéaire est particulièrement intéressante pour la mise en œuvre de structures à densité progressive. Les structures Gyroïde ont tendance à présenter une densité relative plus importante que les structures Primitive pour une valeur donnée d'épaisseur et/ou de longueur.

De plus, des équations pour la densité relative des structures en fonction de l'épaisseur et de la longueur ont été proposées. L'erreur en pourcentage entre la densité relative obtenue à partir des données CAO et les valeurs obtenues à partir des équations a été calculée, avec un maximum de 4,51% pour les structures

Primitive et de 7,72% pour les structures Gyroïde. Le fait que les valeurs des pourcentages d'erreur pour les structures Gyroïde soient supérieurs aux valeurs trouvées pour les structures Primitive est dû aux densités relatives plus importantes étudiées, car on constate que pour ces cas la dépendance linéaire par rapport à l'épaisseur commence à se dégrader. Comme l'applicabilité principale des TPMS étudiés est de les intégrer dans des structures légères et donc de faible densité relative, cette non linéarité restera faible et ne sera pas corrigée.

Afin de réduire les erreurs maximales signalées, une procédure d'optimisation par gradient a été utilisée pour affiner les valeurs des paramètres en réduisant la somme des carrés des résidus. En utilisant cette méthode, des équations corrigées sont proposées qui présentent une réduction des pourcentages d'erreur à 1.98% pour les structures Primitive et 4.34% pour les structures Gyroïde. Les *RSS* ont été réduits d'un ordre de grandeur pour les surfaces étudiées.

Les travaux futurs visent à développer des structures TPMS à densité variable fabriquées par le procédé de fabrication additive WAAM, et à appliquer les équations proposées pour faciliter la détermination des structures à densité variable résultant de procédures d'optimisation topologique, tout en tenant compte des contraintes de fabrication pour la définition des longueurs et des épaisseurs requises.

VI. 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].

VII. References

[1] W. Gao et al., 'The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering', Computer-Aided Design, vol. 69, pp. 65–89. 2015.

[2] B. Vayre, F. Vignat, and F. Villeneuve, 'Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects', Mechanics & Industry, vol. 13, no. 2, pp. 89–96. 2012.

[3] 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. 2018.

[4] A. G. Evans, J. W. Hutchinson, N. A. Fleck, M. F. Ashby, and H. N. G. Wadley, 'The topological design of multifunctional cellular metals', Progress in Materials Science, vol. 46, no. 3, pp. 309–327. 2001.

[5] M. F. Ashby, 'The properties of foams and lattices', Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 364, no. 1838, pp. 15–30. 2006.

[6] J. Feng, J. Fu, Z. Lin, C. Shang, and X. Niu, 'Layered infill area generation from triply periodic minimal surfaces for additive manufacturing', Computer-Aided Design, vol. 107, pp. 50–63. 2019.

[7] 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. 2019.

[8] F. S. L. Bobbert et al., 'Additively manufactured metallic porous biomaterials based on minimal surfaces: A unique combination of topological, mechanical, and mass transport properties', Acta Biomaterialia, vol. 53, pp. 572–584. 2017.

[9] M. Zhao, F. Liu, G. Fu, D. Z. Zhang, T. Zhang, and H. Zhou, 'Improved Mechanical Properties and Energy Absorption of BCC Lattice Structures with Triply Periodic Minimal Surfaces Fabricated by SLM', Materials, vol. 11, no. 12, p. 2411. 2018.

[10] 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. 2018.

[11] 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. 2019.

[12] D. Brackett, I. Ashcroft, and R. Hague, 'Topology Optimization for Additive Manufacturing', Proceedings of the 2011 International Solid Freeform Fabrication Symposium, p. 15. 2011.

[13] H. G. von Schnering and R. Nesper, 'Nodal surfaces of Fourier series: Fundamental invariants of structured matter', Z. Physik B - Condensed Matter, vol. 83, no. 3, pp. 407–412. 1991.

$L\ [mm]$	Valeurs initiales		Après l'optimisation	
	RSS	***Erreur max.%***	***RSS***	***Erreur max.%***
Globalement	2.57E-03	4.51	2.85E-04	1.98
L=50[mm]	1.76E-03	4.51	2.59E-04	1.98
L=100[mm]	5.51E-04	3.30	1.36E-05	0.87
L=150[mm]	1.72E-04	2.56	4.34E-07	0.20
L=200[mm]	6.09E-05	2.01	3.62E-06	0.53
L=250[mm]	2.68E-05	1.59	7.69E-06	0.84

Tableau 1. DIFFERENCES DE *RSS* ET DE POURCENTAGE ABSOLU D'ERREUR POUR LES STRUCTURES PRIMITIVE.

$L\ [mm]$	Valeurs initiales		Après l'optimisation	
	RSS	***Erreur max.%***	***RSS***	***Erreur max.%***
Globalement	2.16E-02	7.72	3.28E-03	4.34
L=50[mm]	9.72E-03	7.72	2.83E-03	4.34
L=100[mm]	4.45E-03	6.60	3.50E-04	2.40
L=150[mm]	4.17E-03	5.79	4.14E-05	1.13
L=200[mm]	2.10E-03	5.17	1.25E-05	0.57
L=250[mm]	1.19E-03	4.72	4.53E-05	0.99

Tableau 2. DIFFERENCES DE RSS ET DE POURCENTAGE ABSOLU D'ERREUR POUR LES STRUCTURES GYROÏDE.

Conception et caractérisation d'un absorbeur d'énergie obtenu par fabrication additive

Hugo Carassus
UPHF, LAMIH UMR CNRS 8201
Campus du Mont Houy
Valenciennes – France
hugo.carassus@uphf.fr

Jean-Dominique Guérin
UPHF, INSA HdF, LAMIH UMR CNRS 8201
Campus du Mont Houy
Valenciennes – France
jean-dominique.guerin@uphf.fr

Hervé Morvan
UPHF, LAMIH UMR CNRS 8201
Campus du Mont Houy
Valenciennes – France
herve.morvan@uphf.fr

Grégory Haugou
UPHF, INSA HdF, LAMIH UMR CNRS 8201
Campus du Mont Houy
Valenciennes – France
gregory.haugou@uphf.fr

Eric Markiewicz
UPHF, INSA HdF, LAMIH UMR CNRS 8201
Campus du Mont Houy
Valenciennes – France
eric.markiewicz@uphf.fr

Sandra Guérard
Arts et Métiers ParisTech, I2M UMR CNRS 5295
Talence – France
sandra.guerard@ensam.eu

Résumé

Cette communication est relative à la conception et la caractérisation d'un absorbeur d'énergie réalisé par fabrication additive métallique. Des structures spécialement élaborées sont caractérisées sur deux bancs d'essais, chacun dédié aux études en quasi-statique et aux études dynamiques à grande vitesse de déformation. Le procédé de fabrication additive de fusion laser sur lit de poudre (SLM) est mis en œuvre pour fabriquer des structures cellulaires en acier inoxydable 316L. Ces dernières sont des TPMS (Triple Periodic Minimal Surface) à motif Gyroid de type « skeletal ». Après une brève description des démarches de conception et des conditions d'élaboration des structures, une étude du comportement dynamique en compression de ces dernières est présentée. Les procédures expérimentales et numériques sont remises en contexte puis détaillées. Les discussions portent d'une part sur les corrélations entre résultats numériques et expérimentaux en termes d'énergie absorbée, de contrainte plateau et de modes de déformation et, d'autre part, sur un positionnement par rapport aux autres structures cellulaires testées en conditions similaires suivant les performances. Enfin, une mise en perspective de ces travaux est proposée.

Mots-clés — Matériau cellulaire, Fabrication additive métallique, TPMS, absorption d'énergie, compression uniaxiale, chargement dynamique

I. INTRODUCTION

La fabrication additive permet d'envisager la conception de nouveaux matériaux cellulaires combinant légèreté et grande capacité d'absorption d'énergie tels que les structures lattices. Leur utilisation dans les secteurs du transport terrestre ou aérien revêt alors un intérêt certain pour contribuer conjointement à l'allégement structural et à la sécurité en cas de crash et/ou d'impacts. Nos travaux sont axés sur des structures issues de la famille des TPMS (Triple Periodic Minimal Surface) qui, comme la plupart des matériaux cellulaires, sont inspirées de la nature [1,2]. Ces matériaux cellulaires sont obtenus à partir d'une fonction niveau qui minimise localement l'aire de la surface pour une condition aux limites donnée. Une revue de l'état de l'art montre que cette catégorie de matériaux cellulaires, obtenue par fabrication additive métallique, n'a à ce jour été étudiée que sous chargement quasi-statique. Il est proposé ici d'étendre l'analyse de leur comportement mécanique sous chargement dynamique.

Dans cette communication, les procédures de mise en œuvre comprenant les démarches de conception et les conditions d'élaboration des structures, ainsi que les principales hypothèses de modélisation seront explicitées en partie II. Une étude du comportement dynamique en compression de ces dernières sera présentée en partie III. Les procédures expérimentales et numériques associées seront remises en contexte puis détaillées. Les discussions, en partie IV porteront

principalement d'une part sur les corrélations entre résultats numériques et expérimentaux en termes d'énergie absorbée, de contrainte plateau et de modes de déformation et, d'autre part, sur un positionnement par rapport aux autres structures cellulaires testées en conditions similaires suivant les performances. Enfin une mise en perspective de ces travaux sera proposée en partie V.

Glossaire

x, y, z	[m]	Coordonnées cartésiennes des points du *Gyroid*
k	[m^{-1}]	Coefficient
l	[m]	Longueur d'une cellule élémentaire
t	[1]	Paramètre niveau
ρ^*	%	Densité relative du matériau cellulaire
D_{min}	[m]	Diamètre minimum du motif *skeletal Gyroid*
P	[W]	Puissance du laser (SLM)
e	[m]	Epaisseur de couche
V	[$m.s^{-1}$]	Vitesse de scan
h	[m]	Ecart vecteur
A	[MPa]	Limite d'élasticité
B	[MPa]	Paramètre d'écrouissage plastique
C	[1]	Coef. de sensisibilité à la vitesse de déformation
m	[1]	Coefficient de sensibilité à la température
n	[1]	Coefficient d'écrouissage
ε_p	[1]	Déformation plastique équivalente
$\dot{\varepsilon}$	[s^{-1}]	Vitesse de déformation plastique équivalente
$\dot{\varepsilon}_0$	[s^{-1}]	Vitesse de déformation de référence
T_f	[K]	Température de fusion
T_0	[°]	Température ambiante
W_b	[$kJ.kg^{-1}$]	Energie spécifique absorbée
σ_p	[MPa]	Contrainte plateau

II. PROCEDURE D'ESSAIS

A. Design

Les TPMS sont définis par des fonctions implicites qui minimisent localement l'aire de la surface pour des conditions données. Dans le cas du motif *Gyroid*, la fonction est représentée par l'équation (1) où *x, y* et *z* sont les coordonnées cartésiennes, k un coefficient proportionnel à l'inverse de la longueur l d'une cellule élémentaire ($k = 2\pi/l$) et t le paramètre niveau.

$$f(x,y,z) = \cos(kx)\sin(ky) + \cos(ky)\sin(kz) + \cos(kz)\sin(kx) - t \quad (1)$$

On distingue deux sous-familles de TPMS selon la méthode d'obtention, comme illustré sur la Figure 1a. Les TPMS surfaciques *[sheet]* sont obtenues par un épaississement uniforme de l'isosurface (correspondant à $t = 0$) et les TPMS squelettes *[skeletal]* résultent d'une valeur non nulle du paramètre niveau ($t \in [-1{,}41; 1{,}41]$) [3]. Un code MATLAB est utilisé pour générer un fichier STL (STéréoLitographie) contenant le maillage surfacique de la structure paramétrée selon les caractéristiques géométriques souhaitées (densité relative, taille du motif élémentaire, dimensions, résolution).
Cette étude est focalisée sur le *skeletal Gyroid* dont la taille du motif élémentaire est de 10 mm avec une répétition de 2*2*2 motifs dans chaque direction de l'espace. La densité relative ρ^* visée de 30% est obtenue avec un paramètre niveau t = 0,61. Le diamètre minimum D_{min}, localisé sur la Figure 1b, est de 3,4 mm.

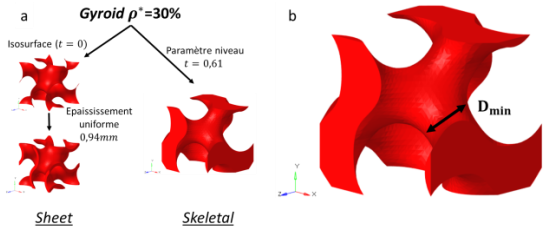


Figure 1. Obtention des sous-familles *sheet* et *skeletal* du motif *Gyroid* pour une densité relative de 30% (a), localisation du diamètre minimum sur le motif *skeletal Gyroid* (b).

B. Fabrication

La fabrication des structures *Gyroid* en acier inoxydable 316L est réalisée par un sous-traitant externe (ErPro) via une machine SLM 280 (fusion laser sur lit de poudre). La poudre métallique de forme sphérique, dont la composition chimique est détaillée dans le Tableau 1, a une taille comprise entre 10 et 45 µm. Les principaux paramètres d'élaboration du procédé de fabrication additive sont (Figure 2) :

- Puissance du laser : P = 200 W
- Epaisseur de couche : e= 30 µm
- Vitesse de scan : V = 800 $mm.s^{-1}$
- Ecart vecteur : h = 120 µm

Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	C	P, S
67-69	16-18	10-14	2-3	2	0,75	< 0,1	< 0,03	< 0,045

Tableau 1. Composition chimique, en pourcentage massique, de la poudre d'acier inoxydable 316L.

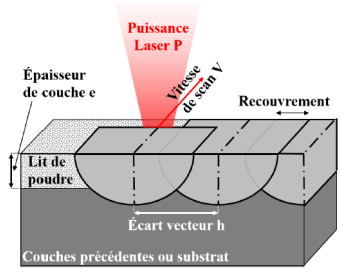


Figure 2. Schéma de principe du procédé SLM avec les principaux paramètres.

La densité d'énergie volumique associée est de 69,4 J. mm^{-3} et la méthode de scan employée est une stratégie en méandres (*single layer meandering*). Après fabrication, les structures sont désolidarisées de leur support et subissent un traitement thermique à 1095°C pendant deux heures, suivi d'une trempe à l'eau.

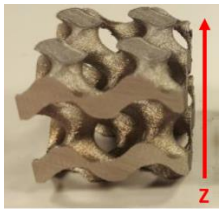


Figure 3. *Skeletal Gyroid* après fabrication selon la direction de fabrication Z.

C. *Moyens d'essais*

Outre les vérifications géométriques d'usage, la densité relative effective des *skeletal Gyroid* est obtenue en mesurant la masse des structures dans l'eau et dans l'air avec une précision de 0,01g. La densité relative moyenne mesurée est de 27,4% avec un écart type de 0,25%. Des écarts similaires ont été observés entre densité relative nominale et mesurée par plusieurs études [4,5] et sont attribués à la présence de particules résiduelles non fondues sur les surfaces de la structure.

Les essais mécaniques sont réalisés d'une part sur un vérin électromécanique Instron Sintech (vitesses de compression de 1 mm. min^{-1}et 50 mm. min^{-1}) et, d'autre part, en utilisant un montage de barres d'Hopkinson en compression (vitesse de chargement 15 m. s^{-1}) visible en Figure 4. L'acquisition des images se fait via une caméra Manta Allied Vision pour les essais à 1mm. min^{-1} et 50 mm. min^{-1}, et une caméra Fastcam Photron APX RS pour les essais à 15m. s^{-1}. L'enregistrement des efforts et l'acquisition des images sont déclenchés simultanément par un oscilloscope digital Yokogawa DL750.

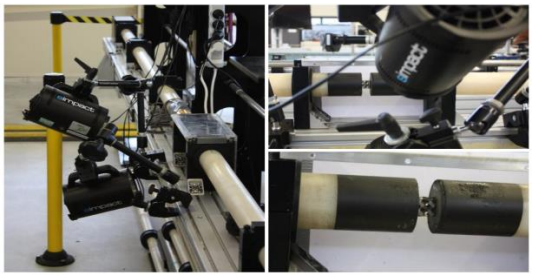


Figure 4. Photos du montage des barres d'Hopkinson en compression avec la mise en position du *skeletal Gyroid.*

D. *Modèles numériques*

À partir du ficher STL, un maillage volumique comportant des éléments tétraédriques à 10 nœuds est généré sur le logiciel HYPERMESH. Le modèle comprend 75 000 éléments avec une taille moyenne d'élément de 0,2 mm. La modélisation de la compression est effectuée sur le logiciel HYPERCRASH par le biais de deux corps rigides plans parallèles, apparaissant de couleur vert et rouge en Figure 5. Le corps rigide inférieur (rouge) est encastré alors que le corps rigide supérieur est mobile selon *z* (flèche jaune) à une vitesse de 15 m. s^{-1}.
Pour simuler l'essai quasi-statique (1 mm/min), la sensibilité à la vitesse de déformation n'est pas prise en compte (*C*=0). Trois contacts de type maître/esclave sont considérés : deux interfaces entre chaque plan et le TPMS, et une interface d'auto-contact pour le TPMS pour éviter l'auto pénétration. Les calculs sont lancés sur le solveur explicit RADIOSS en parallélisant les calculs sur 10 processeurs.

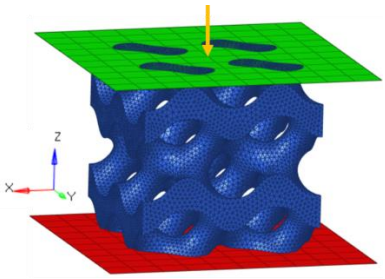


Figure 5. Modèle numérique de la compression du *skeletal Gyroid.*

Le comportement elasto-plastique de l'acier inoxydable 316L, supposé isotropique [6], est modélisé par un modèle de Johnson-Cook suivant l'équation (2).

$$\sigma_y = \left[A + B(\varepsilon_p)^n\right]\left[1 + C\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right]\left[1 - \left(\frac{T-T_0}{T_f-T_0}\right)^m\right] \qquad (2)$$

Avec A, B et C les constantes matériaux, m et n respectivement les coefficients de sensibilité à la température et d'écrouissage, ε_p la déformation plastique, $\dot{\varepsilon}$ la vitesse de déformation, $\dot{\varepsilon}_0 = 0{,}0006\ s^{-1}$ la vitesse de déformation de référence, T_f la tempé-

rature de fusion, et T_0 la température ambiante. Les effets thermiques ne sont pas considérés ici. Les paramètres, donnés en Tableau 2, sont issus d'une étude antérieure de caractérisation en traction uniaxiale à plusieurs vitesses de déformation.

$A\ (MPa)$	$B\ (MPa)$	C	n
454	487	0,012	0,52

Tableau 2. Paramètres de la loi Johnson-Cook pour l'acier inoxydable 316L issu du procédé de fabrication additive SLM.

III. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET NUMERIQUES

La Figure 6 présente les courbes contrainte–déformation apparentes. La contrainte est obtenue en effectuant le ratio entre l'effort mesuré et la surface apparente, qui vaut ici 20*20 mm². La déformation est obtenue en effectuant le ratio entre le déplacement et la hauteur initiale de la structure TPMS. Les six courbes présentent les trois phases caractéristiques suivantes :

- Une première phase linéaire et élastique
- une deuxième phase « plateau » où la contrainte évolue de manière quasi-constante avec une pente légèrement ascendante (apparition locale de déformations plastiques)
- une troisième phase de densification marquée par une augmentation nette de la contrainte (contact entre les éléments de structure voisins)

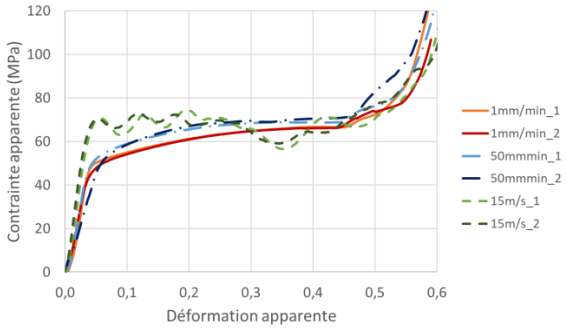


Figure 6. Courbes contrainte-déformation apparentes expérimentales pour le *skeletal Gyroid* aux trois vitesses de chargement.

Une répétabilité satisfaisante est notable pour les trois vitesses de chargement. A noter l'absence de pic de contrainte après à la phase élastique contrairement à ce qu'il est possible d'observer pour certains matériaux cellulaires [7,8]. Les capacités/performances d'un absorbeur d'énergie sont souvent évaluées en termes de valeurs d'énergie spécifique absorbée (par la structure) et de contrainte plateau. Le Tableau 3 reprend les valeurs obtenues pour ces deux quantités selon la vitesse croissante des essais réalisés. Pour déterminer l'énergie spécifique absorbée W_b on calcule l'aire sous la courbe contrainte-déformation apparente, jusqu'à une déformation apparente de 50%, que l'on divise par la masse de la structure TPMS. La contrainte plateau σ_p est la valeur moyenne de la contrainte apparente durant la phase plateau, correspondant ici à une mesure entre 10% et 40% de la déformation apparente.

	1mm/min_1	1mm/min_2	50mm/min_1	50mm/min_2	15m/s_1	15m/s_2
Energie spécifique absorbée (kJ/kg)	13,4	13,6	14,2	14,5	14,5	14,9
Contrainte plateau (MPa)	62,4	62,1	66,2	67,3	68,6	66,9

Tableau 3. Paramètres obtenus à partir des courbes contrainte–déformation apparentes expérimentales des *skeletal Gyroid.*

En augmentant la vitesse de chargement de 1 mm/min à 15 m/s, qui correspond respectivement à des vitesses de déformation macroscopiques équivalentes de 0,00083 s^{-1} et 750 s^{-1}, des augmentations de 8,9% de l'énergie spécifique absorbée et de 8,8% de la contrainte plateau sont constatées. La densification ne semble pas affectée par l'augmentation de la vitesse de chargement. Elle est atteinte pour une déformation apparente proche des 50% pour les six essais. La déformation du *skeletal Gyroid* est bien uniforme sur la structure et les modes de déformation sont similaires pour les trois vitesses de chargement. La Figure 7 reprend des clichés pris à trois niveaux de déformation apparente pour des vitesses de 1 $\mathrm{mm.min^{-1}}$ et 15 $\mathrm{m.s^{-1}}$ (des résultats similaires sont observés pour 50 $\mathrm{mm.min^{-1}}$).

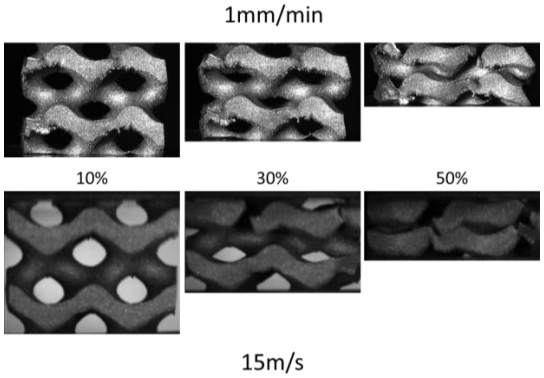


Figure 7. Compaction du *skeletal Gyroid* a 1 $\mathrm{mm.min^{-1}}$ et 15 $\mathrm{m.s^{-1}}$ pour trois niveaux de déformation apparente.

Les courbes contrainte-déformation apparentes issues des simulations numériques sont données en Figure 8. L'allure des courbes est similaire à celles obtenues expérimentalement, avec la présence des trois phases distinctives. L'énergie spécifique absorbée est de 13,1 $\mathrm{kJ.kg^{-1}}$ pour 1 $\mathrm{mm.min^{-1}}$ et de 14,7 $\mathrm{kJ.kg^{-1}}$ pour 15 $\mathrm{m.s^{-1}}$, ce qui représente une augmentation de 12,2%. La contrainte plateau est de 62,8 MPa pour 1 $\mathrm{mm.min^{-1}}$ et de 70,5 MPa pour 15 $\mathrm{m.s^{-1}}$, ce qui représente également une augmentation de 12,3%.

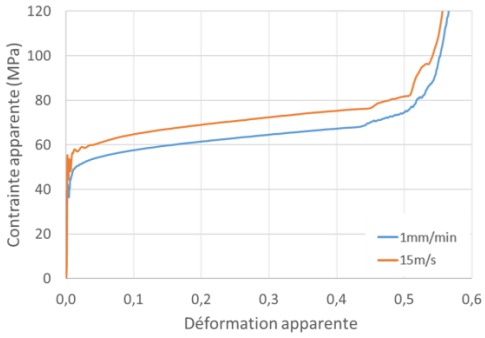


Figure 8. Courbes contrainte-déformation apparentes numériques du *skeletal Gyroid* en quasi-statique et en dynamique.

L'observation et l'analyse de la distribution des déformations plastiques et des contraintes équivalentes de Von Mises montrent une répartition hélicoïdale alignée dans la direction de chargement, ici selon *z* (Figure 9). La déformée globale de la structure TPMS est uniforme et ne présente pas de bande de cisaillement diagonale comme cela se produit pour certaines structures lattices ou autres TPMS [5].

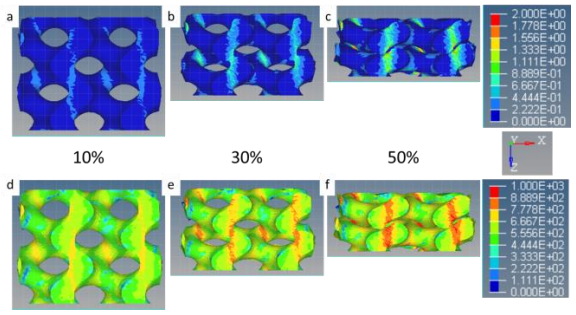


Figure 9. Déformation en coupe médiane du *skeletal Gyroid* lors d'une compression quasi-statique, pour 3 niveaux de déformation apparente 10%, 30% et 50% : (a), (b) et (c) distributions respectives des déformations plastiques et ; (d), (e) et (f) distributions respectives des contraintes de Von Mises.

IV. DISCUSSIONS

L'énergie spécifique absorbée par le *skeletal Gyroid* dans cette étude est légèrement supérieure à celle obtenue dans les travaux de Tancogne-Dejean et al [9] avec le lattice *octet*, 10,1 kJ. kg^{-3}, à matériau et densité relative identique. Les auteurs observent également que l'énergie spécifique absorbée est supérieure à celle des nids d'abeilles avec de faibles densités relatives, et surtout pour n'importe quelle direction de chargement. Ce qui n'est pas le cas pour les nids d'abeilles avec des chargements non orthotrope où les capacités d'absorption d'énergie s'effondrent [10]. Or Yang et al [11] ont montré, en étudiant l'influence de la direction de chargement, que le *skeletal Gyroid* est plus performant que les structures lattices de par notamment une réponse mécanique plus stable. Ainsi *le skeletal Gyroid* apparait comme une alternative très intéressante pour des applications d'absorption d'énergie.

Le modèle numérique permet de prédire de manière assez précise la réponse mécanique à une compression uniaxiale. L'écart maximal observé sur la contrainte plateau et l'énergie spécifique absorbée pour les deux vitesses de chargement est de 4%. Comme montré en Figure 10, une meilleure corrélation expérimentale/numérique est obtenue pour le chargement quasi-statique. En chargement dynamique la chute de la contrainte, en seconde partie du plateau, sur la courbe expérimentale n'est pas présente sur la courbe numérique. Li et al [12] font la même constatation sur des lattices à coques (*smooth shell lattices*) pour des vitesses de déformation macroscopiques allant de 0,001 s^{-1} à 400 s^{-1}. Ils attribuent cela à des phénomènes d'adoucissement, dus principalement à un auto-échauffement, qui contrecarrent les effets d'écrouissage et de vitesse de déformation. Dans les simulations numériques, les effets thermiques ne sont ici pas pris en compte au niveau de la loi de comportement introduite. La phase de densification augmente les contacts et les transferts thermiques internes dans la structure réelle, atténuant donc les auto-échauffements locaux. Dans cette phase, les taux d'écrouissage obtenus expérimentalement et numériquement sont comparables.

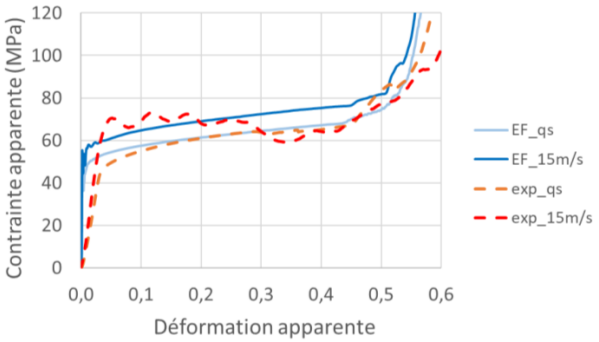


Figure 10. Comparaison des courbes contrainte-déformation apparentes numériques (EF) et expérimentales (exp).

L'augmentation de la contrainte d'écoulement avec la vitesse de déformation est un phénomène recensé pour la grande majorité des matériaux cellulaires [13]. Ce phénomène relève à la fois de la sensibilité à la vitesse de déformation du matériau constitutif et des effets structurels. Tancogne-Dejean et al [14] ont ainsi relevé une augmentation de 8% de l'énergie spécifique absorbée pour des vitesses de déformation macroscopiques allant de 0,001 s^{-1} à 400 s^{-1} pour des *plate lattices*. Nous retrouvons des résultats similaires pour les *skeletal Gyroid*, objets de la présente étude. Dans cette même étude, ils ont observé une hausse de la limite d'élasticité du matériau constitutif (acier inoxydable 316L) de 26% pour des vitesses de déformation allant de 0,001 s^{-1} à 200 s^{-1}. Ils attribuent ainsi l'augmentation de l'énergie spécifique absorbée du matériau cellulaire exclusivement au comportement du matériau de structure, sans effet notoire de l'architecture structurelle. Nous avons constaté la même tendance sur la campagne expérimentale de caractérisation que nous avons menée sur l'acier inoxydable 316L fabriqué par SLM. En augmentant la vitesse de déformation de 0,001 s^{-1} à 300 s^{-1}, des augmentations

de 35,1% de la limite d'élasticité et de 14,9% de la contrainte maximale sont constatées.

V. PERSPECTIVES

Cette étude a permis d'étudier la réponse mécanique dynamique d'une structure *skeletal Gyroid* à des compressions uniaxiales pour plusieurs vitesses de chargement. De par les analyses expérimentales et numériques menées, nous considérons que ces TPMS montrent certaines caractéristiques d'un bon absorbeur d'énergie.

Une étude du *sheet Gyroid*, l'autre sous-famille des TPMS, est menée conjointement. L'un des objectifs est d'étudier et d'expliciter l'influence d'une gestion différente de l'épaisseur du motif (contrairement au *skeletal Gyroid*, l'épaisseur du *sheet Gyroid* est uniforme). D'autres motifs TPMS, comme ceux présentés en Figure 11, sont envisagés de façon à explorer d'autres réponses mécaniques.

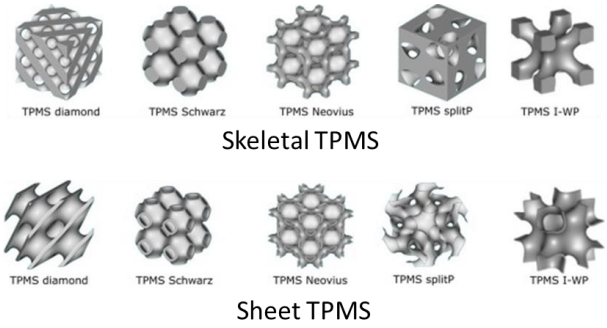


Figure 11. Différents motifs TPMS avec les deux sous-familles *skeletal* et *sheet*.

VI. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'Institut Carnots Arts pour sa contribution au financement des études ainsi que le pôle AIP-PRIMECA S-mart Nord-Pas de Calais pour le support des travaux de recherche.

VII. REFERENCES

[1] Li D, Liao W, Dai N, Xie YM. Comparison of Mechanical Properties and Energy Absorption of Sheet-Based and Strut-Based Gyroid Cellular Structures with Graded Densities. Materials (Basel) 2019;12. https://doi.org/10.3390/ma12132183.

[2] Abueidda DW, Elhebeary M, Shiang C-S (Andrew), Pang S, Abu Al-Rub RK, Jasiuk IM. Mechanical properties of 3D printed polymeric Gyroid cellular structures: Experimental and finite element study. Materials & Design 2019;165:107597. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107597.

[3] Yang L, Yan C, Han C, Chen P, Yang S, Shi Y. Mechanical response of a triply periodic minimal surface cellular structures manufactured by selective laser melting. International Journal of Mechanical Sciences 2018;148:149–57. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.08.039.

[4] Liang Y, Zhou W, Liu Y, Yang Y, Xi H, Wu Z. Energy Absorption and Deformation Behaviour of 3D Printed TPMS Stainless Steel Cellular Structures Under Compression. Steel Research International n.d.;n/a. https://doi.org/10.1002/srin.202000411.

[5] Zhang L, Feih S, Daynes S, Chang S, Wang MY, Wei J, et al. Energy absorption characteristics of metallic triply periodic minimal surface sheet structures under compressive loading. Additive Manufacturing 2018;23:505–15. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.007.

[6] Cao X, Xiao D, Li Y, Wen W, Zhao T, Chen Z, et al. Dynamic compressive behavior of a modified additively manufactured rhombic dodecahedron 316L stainless steel lattice structure. Thin-Walled Structures 2020;148:106586. https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106586.

[7] Ashby M.F. The properties of foams and lattices. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 2006;364:15–30. https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1678.

[8] Gibson LJ, Ashby MF. Cellular Solids: Structure and Properties. Cambridge Core 1997. https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326.

[9] Tancogne-Dejean T, Spierings AB, Mohr D. Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading. Acta Materialia 2016;116:14–28. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.05.054.

[10] Khan MK, Baig T, Mirza S. Experimental investigation of in-plane and out-of-plane crushing of aluminum honeycomb. Materials Science and Engineering: A 2012;539:135–42. https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.01.070.

[11] Yang L, Yan C, Fan H, Li Z, Cai C, Chen P, et al. Investigation on the orientation dependence of elastic response in Gyroid cellular structures. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials 2019;90:73–85. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.09.042.

[12] Li X, Roth CC, Tancogne-Dejean T, Mohr D. Rate- and temperature-dependent plasticity of additively manufactured stainless steel 316L: Characterization, modeling and application to crushing of shell-lattices. International Journal of Impact Engineering 2020;145:103671. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103671.

[13] Sun Y, Li QM. Dynamic compressive behaviour of cellular materials: A review of phenomenon, mechanism and modelling. International Journal of Impact Engineering 2018;112:74–115. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.10.006.

[14] Tancogne-Dejean T, Li X, Diamantopoulou M, Roth CC, Mohr D. High Strain Rate Response of Additively-Manufactured Plate-Lattices: Experiments and Modeling. J Dynamic Behavior Mater 2019:1–15. https://doi.org/10.1007/s40870-019-00219-6.

Analyse des données issues du monitoring in-situ du procédé de fabrication additive LPBF

R.KROMER*
Univ. Bordeaux, I2M, UMR 5295
33500, Gradignan, France
robin.kromer@u-bordeaux.fr

E. GRUHIER
Arts et Métiers, I2M, UMR 5295
33400 Talence France

Résumé— La santé matière des pièces élaborées par le procédé de fabrication additive sur lit de poudres (procédé LPBF) est directement liée aux interactions laser-matière entrainant la fusion de la poudre et des précédentes couches durant l'élaboration. Elle varie en fonction de choix de nombreux paramètres opératoires (paramètres du laser, stratégie de déplacement du faisceau laser et environnement gazeux pour n'en citer que quelques-uns) et du matériau. Des mesures in-situ lors de la fusion du lit de poudre sont possible aujourd'hui via des capteurs optiques. Ils génèrent des données associées au bain de fusion. Un banc instrumenté reproduisant les conditions expérimentales du procédé LPBF a ainsi été développé dans ce but. Différentes approches sont possibles telles que l'analyse des mécanismes de fusion laser de lit de poudres et de les associer aux paramètres de la machine. Il a été proposé d'avoir une approche plus macroscopique afin d'associer des données à des analyses à l'échelle de l'objet. Pour cela, une phase d'apprentissage par des algorithmes de « Machine Learning » a été menée à l'échelle du cordon et de la zone. Un classement a donc pu être produit à l'échelle des cordons et d'ilot pour différentes couches. Des fonctions de transfert seront ainsi développées en utilisant une partie des informations grâce à ces méthodes pour prédire des zones susceptibles d'une mauvaise santé matière basé sur les méta-modèles.

Mots-clés— Laser, In-situ, Données, Fusion, Classement

I. INTRODUCTION

Les procédés de fabrication additive (AM) de fusion sélective laser de lit de poudre (LPBF) offrent des stratégies de fabrication extrêmement polyvalentes, et des avantages concurrentiels par rapport à la fabrication conventionnelle en termes de production de pièces personnalisées avec des fonctions internes et des géométries externes complexes [1, 2] sans utiliser d'outillage dédié, et en réduisant le délai entre la conception numérique et la fabrication [3]. Outre la personnalisation des caractéristiques géométriques, les procédés LPBF au laser ont le potentiel de produire des structures optimisées en terme de masse tout en présentant des propriétés mécaniques appropriées [4] avec une perte de matériau minimale et en offrant la possibilité de réaliser des pièces avec des compositions multi-matériaux [2]. Bien que les pièces produites à l'aide d'approches AM basées sur le laser tendent à avoir des pores incrustés, leurs densités peuvent aussi atteindre presque 100%, leurs propriétés mécaniques étant égales et parfois supérieures à celles de leurs homologues de fabrication classique [1,5, 6]. Avec les nouvelles approches de conception numérique, il existe un seuil de rentabilité où la complexité, l'optimisation du poids et les faibles exigences de production des pièces favorisent les approches AM [6], avec des concurrents de l'indust rie allant du domaine médical aux applications aérospatiales. Les avantages du système LPBF basé sur la technologie laser ont suscité l'intérêt du milieu de la recherche et de l'industrie, en mettant davantage l'accent sur les stratégies permettant de surmonter certains des problèmes existants liés à la qualité, la cohérence et la répétabilité des pièces [7].

Selon la littérature, les processus LPBF présentent un degré élevé de sensibilité aux perturbations et aux paramètres de processus d'entrée tels que la puissance laser, le chemin de balayage laser et la vitesse de balayage [8]. Le grand nombre de paramètres de processus contrôlables et prédéfinis, résumés par Mani et al. [7] ont une influence complexe sur le comportement thermique transitoire du bain de fusion, pouvant entraîner des défauts (porosités) [9], une rugosité de surface élevée [3,7], une fissuration et un délaminage thermiques [10], des anisotropies de propriétés physiques [1,3,11], ainsi que le retrait anisotrope [11]. L'apparition des porosités peut s'expliquer par différents phénomènes induits par le procédé parmi lesquels on peut citer (i) la vaporisation du matériau et des projections lors de l'interaction dynamique laser-substrat [3] dues à des températures locales élevées, (ii) le phénomène dit de formation de billes (phénomène de « balling »), qui peut survenir en raison de la faible mouillabilité de la couche précédente, ce qui entraîne une non-fusion du matériau fondu avec le substrat sous-jacent. Ce type de défaut est lié à une puissance laser locale insuffisante ou à des vitesses de balayage élevées [11]. La rugosité de surface et les défauts de surface peuvent devenir sévères, en particulier dans les zones en surplomb, où des sections de la couche en cours de traitement sont supportées par de la poudre. Dans ces zones, l'interaction laser-poudre provoque une surchauffe locale en raison d'une faible conduction et donc d'une mauvaise dissipation de la chaleur, ce qui entraîne une géométrie de bassin de fusion surdimensionnée [12]. En outre, des vitesses de refroidissement élevées et des chargements thermiques répétés dus aux trajets de balayage laser adjacents dans la couche, ainsi qu'à la chaleur transmise par les couches suivantes, génèrent des cycles de fusion et de solidification qui ont un effet significatif

sur les distributions de température transitoires locales et les gradients de température [2]. Ces phénomènes thermiques peuvent aussi entraîner des contraintes résiduelles élevées dans la pièce [13,14], et donc des distorsions des surfaces, une hétérogénéité de la microstructure [15] et des déviations dimensionnelles de la pièce finale [11,16]. Un des enjeux de ces procédés est donc de maîtriser les contraintes thermiques [12].

Le grand nombre de paramètres de processus qui interagissent pour créer un environnement de bain de fusion dynamique accroît le niveau de complexité des méthodes de fabrication des fonctions LPBF au laser. Les stratégies actuelles pour déterminer les paramètres de processus optimaux des matériaux émergents ou les perfectionnements des matériaux existants reposent toujours sur des itérations d'essais coûteuses et fastidieuses [7,9,17]. Afin de minimiser le besoin de telles itérations, les chercheurs travaillent au développement de modèles « haute-fidélité » de processus basés sur la physique afin de réduire la plage de paramètres d'entrée. Cependant, ces modèles reposent sur une connaissance rigoureuse des propriétés de matériau d'entrée telles que la diffusivité, la réflectance et l'émission des matériaux sachant qu'ils sont amenés à changer d'état pendant l'élaboration en évoluant de l'état poudre à l'état solide et en passant par une phase liquide. Or, toutes ces données sont actuellement indisponibles [18,19]. Ces modèles nécessitent également des mesures de processus traçables, les propriétés des matériaux évoluant pendant le procédé d'élaboration. Dans les machines disponibles dans le commerce, une fois que les paramètres de processus appropriés ont été identifiés, ils sont généralement maintenus constants, ce qui entraîne souvent des défauts de pièce et une instabilité du processus, car le processus devient plus sensible aux perturbations [1,20]. Les travaux de Uhlmann et al [21] démontrent l'efficacité des méthodes de classification pour le procédé LPBF. Bajaj et al. [22] montrent aussi que ces outils peuvent prédire les géométries des bains de fusion en fonction des paramètres machines. L'idée de ce papier est de démontrer que ces lois prédictives peuvent être appliquées dès les phases de conception afin d'avoir un outil prédictif et d'aider le concepteur.

Les auteurs ont mis au point un banc d'essai pour implémenter des capteurs pour faire de l'analyse in-situ lors de l'interaction laser-matière (voir des analyses pré/post processus). Plusieurs objectifs peuvent être proposés : observer l'interaction laser-matière, évaluer des méthodes de métrologie, faire la corrélation entre les données et le savoir-faire et développer des algorithmes d'analyse de la santé matière voire le contrôle des processus en temps réel. Dans un objectif d'industrie 4.0 la démarche permettra de jeter les bases de mesures in-situ traçables. Paramètres et stratégie associées

Bien que de nombreux efforts de recherche et même une mise en œuvre commerciale commencent à voir le jour pour la détection, la surveillance et le contrôle des processus AM basés sur les métaux, il reste encore beaucoup de recherche à effectuer avant qu'ils ne puissent se généraliser sur les systèmes AM commerciaux. Dans la littérature, la plupart des articles ont étudié les corrélations entre les paramètres d'entrée du processus et les qualités du produit [23,24] ou ont porté exclusivement sur la définition des relations entre les paramètres du processus et les caractéristiques du bain de fusion en tant que signatures du procédé [10,12,13,18], certains travaux étant axés sur des stratégies de contrôle de procédé in situ [1,3,5,15,17,19,25]. Dans leur travail de revue, Mani et al. [7] ont examiné les approches de métrologie et ont également identifié les corrélations entre les paramètres de processus, les signatures de processus et les qualités des produits, en relation directe avec l'élaboration de stratégies de surveillance et de contrôle in situ.

Des données seront donc associées via les signatures afin de faire la corrélation entre les paramètres, le savoir-faire et les propriétés. L'idée est de développer des algorithmes d'analyse de la santé matière voire le contrôle des processus en temps réel. Une structure organisationnelle pour les stratégies de contrôle sera aussi étudiée en utilisant des métamodèles (générés par machine learning) pour associer ces signatures dans les méthodologies de conception pour la fabrication additive et surtout faire de l'optimisation en prenant en compte la géométrie. Il est vrai qu'il sera nécessaire de définir les mesures appropriées en fonction des connaissances, d'optimiser le flux de données pour l'analyse in-situ et/ou post-traitement, pour l'évaluation et la surveillance du processus de fabrication pour des pièces données.

II. Resultats et Discussion

Trois étapes ont été mises en place. Voici la méthodologie générale : (i) surveillance in-situ avec photodiodes; (ii) analyse des données de photodiodes à l'aide d'algorithmes Python; (iii) caractérisation post mortem des défauts par analyse microscopique;

Les méta-modèles produits serviront à rechercher des zones à risques sur une pièce basée par une analyse entre les résultats des étapes 2 et 3. Les auteurs ont supposé que la fluctuation de l'interaction laser-matière pendant le LPBF et la zone anormale dans le bain de fusion des pièces métalliques étaient liées (cause-effet). L'objectif était alors d'associer les données issues des réponses des photodiodes aux défauts observés sur l'échantillon. La Figure 1 montre un exemple de résultats obtenus : les valeurs d'émissivité acquises le long d'une piste de balayage sont comparées à l'analyse ex-situ (microscopie). La variation de la tension, qui est liée à l'intensité lumineuse absorbée par le capteur, pourrait être analysée pour trouver des pics et des creux (données mises en évidence sur la figure). Cette fluctuation semble être associée notamment à des défauts observés par l'observation ex-situ. Il semble représentatif de l'état de la surface lorsqu'une fluctuation est détectée. Cependant, d'autres images et vallées peuvent être distinguées mais aucune observation ne peut être corrélée. Les auteurs ont donc développé une méthodologie qui permet de tracer l'évolution de la tension à partir des données brutes fournies par les photodiodes. L'objectif est de démontrer la capacité de détecter des phénomènes spécifiques lors de l'interaction laser-matière et des défauts : prétraitement, traitement des erreurs et le contrôle dérivé de la signature prédite. Les méthodes d'intelligence artificielle ont été choisies pour ces travaux.

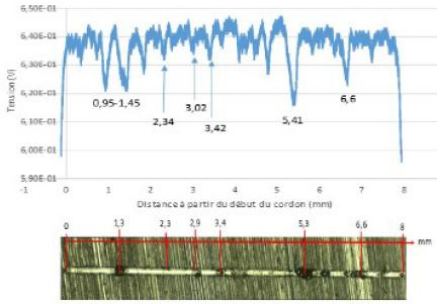


FIGURE 1: EXEMPLE DE SIGNAL PHOTODIODE (VISIBLE) VERSUS ANALYSE POST-MORTEM - LUMIERE VISIBLE (EN HAUT)

Un plan d'expérience a été défini afin de faire un lien entre la réponse donnée par une photodiode et la santé du matériau par rapport aux principaux paramètres LPBF utilisant l'apprentissage automatique. Il était basé sur :
(i) deux distributions continues de la puissance laser et de la vitesse du faisceau ;
(ii) une distribution discrète de l'épaisseur du lit de poudre qui varie de 20 à 100 µm avec un incrément de 20 µm.

Plusieurs essais avec des caractéristiques similaires ont été développés pour vérifier la répétabilité de l'acquisition des données. L'interpolation de krigeage algorithme (méthode de régression de processus gaussien) a été utilisée au cours de cette étape. Chaque condition a été répétée trois fois. Les valeurs moyennes ont été évaluées sur la base des signaux. Une analyse statistique est faite selon le principe Leave-One-Out. On en déduit que chaque point du plan d'expérience peut être prédit par la surface de réponse avec une estimation (définie par une analyse de la variance). Le krigeage fournit un coefficient statistique Q^2 qui évalue la précision. Il était relativement élevé (0,95) démontrant la robustesse de la corrélation.

Le plan a utilisé une méthode de Sobol pour définir une configuration énergétique complète. La puissance du laser et le déplacement de la vitesse ont été définis de 400 à 550 W et de 900 à 1100 mm / s, respectivement. Le signal a été analysé en plusieurs étapes : extraction, analyse du signal moyens, segmentation du signal (largeur de canal) et évaluation des pics / vallées (Figure 2). Ces étapes permettent de valider de faire ressortir quand le laser est allumé, de pouvoir par rapport à une courbe moyenne de faire des analyses de variance et de piques pour obtenir des indicateurs. L'objectif est de pouvoir observer les fluctuations sur différentes couches de lit de poudre. Plusieurs indicateurs peuvent être ainsi attribués à différentes paramétries.

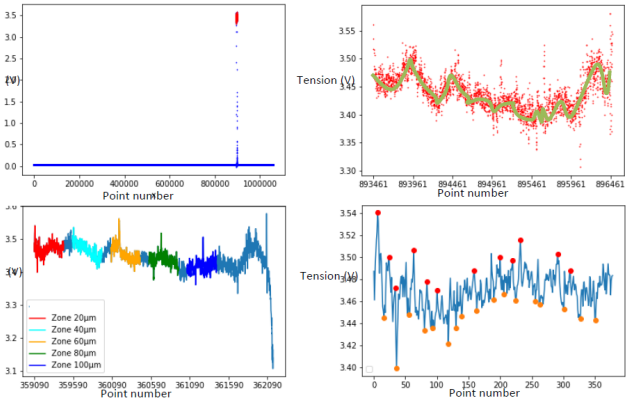


FIGURE 2 : SIGNAL, EXTRACTION (CALCUL MOYEN : LIGNE VERTE), DIVISION DES CORDONS ET ANALYSES DE ZONE

Pour chaque changement aller-retour, il a été observé pour une épaisseur de poudre supérieure à 40 µm des pics prépondérants (illustré Figure 3). Les cavités et les étapes sont de cette manière identifiées pour une couche épaisse de lit de poudre. De plus, l'interaction avec du plastique dans la dernière partie droite du signal a été clairement observée pour la photodiode visible. Cette partie était retirée du signal avec une photodiode IR pour faciliter l'analyse.

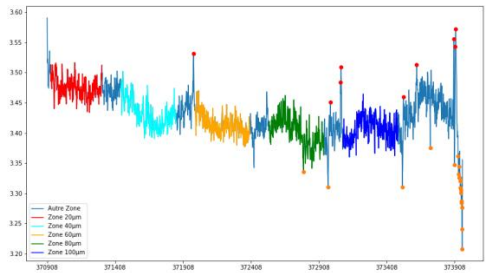


FIGURE 3 :EXEMPLE DE SIGNAUX SUR 6 ALLERS-RETOURS

On observe par micrographie optique post-mortem (Figure 4) qu'il est possible de voir une zone brûlée sur certaine région (rectangle bleu). Une zone de transition et un début de bain de fusion (carré vert) peuvent être définis. Cela peut être représentatif de la génération du bain de fusion après une grande perturbation. Ainsi, ces observations confirment que la forme du signal semble être directement liée au changement d'interaction laser-matière. Des travaux doivent être réalisés pour comprendre l'origine de ces pics et vallées et le lien entre in-situ et analyse post mortem. Il est nécessaire d'implémenter d'autres instruments tel que des caméras rapides pour observer et expliquer ces phénomènes.

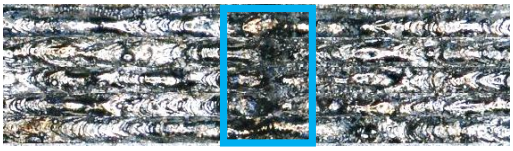


FIGURE 4 : ANALYSE POST-MORTEM D'UNE COUCHE PAR MICROGRAPHIE OPTIQUE – FOCUS SUR UNE TRANSITION (CARRE VERT)

L'analyse d'image de chaque ligne de soudure a été associée avec les signaux de la photodiode (Figure 5). L'objectif de cette tâche est de définir un outil statistique pour relier ces signaux à la géométrie des lignes de fusion et d'identifier des défauts. Aujourd'hui, au stade de nos investigations, les certitudes suivantes sont : les données de la photodiode sont fiables et reproductibles et un seuil représentatif de la fluctuation du processus pendant le laser-matière l'interaction peut être défini. Des développements supplémentaires sont nécessaires dans l'analyse du signal pour vérifier l'estimation de la loi.

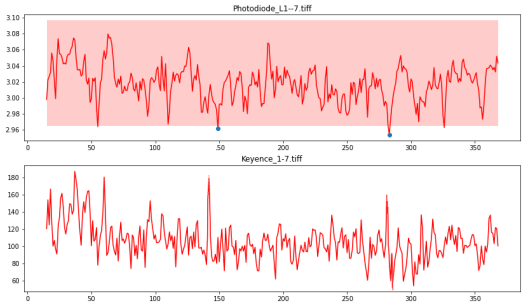


FIGURE 5 : SUPERPOSITION DE SIGNAUX PHOTODIODES ET ANALYSES POSTMORTEM POUR UNE ZONE

Il est donc démontré que le chemin optique, les outils d'acquisition et les filtres fonctionnent bien. Le chemin optique doit être ajusté pour rester dans un seuil spécifique. Les informations de photodiode permettent de construire un outil prédictif avec une définition d'intervalle confiante. On ne sait pas s'il est possible de catégoriser les défauts à l'heure actuel. Les fluctuations majeures semblent être détectées. Il est donc proposé de regarder à l'échelle des différentes couches les zones où des points sortent hors de la zone tolérance prédite.

Pour valider la méthodologie et proposer une démarche innovante d'utilisation de ces analyses in-situ, un modèle 3D (lapin) a été imprimé en capitalisant les informations couches par couches. Les informations ont été stockées et mises dans les listes dans différentes zones du volume. La captation des données est en temps réel et l'analyse est effectué entre chaque couche. Ces volumes sont représentés sur la Figure 6. Cette discrétisation permet par couche de faciliter le traitement de ces données et de les placer dans l'espace par la suite. Deux zones sont présentées : corps et oreilles. Il est possible de remarquer différentes couleurs sur les différentes zones. Ces couleurs correspondent à une discrétisation de nombres de défauts potentiellement détecter en partant du noir = 0 défaut et rouge = + 6 défauts. Ce développement en cours permet de représenter les possibilités d'analyse in-situ du procédé. L'objectif est par la suite de pouvoir utiliser ce type de diagnostique pour évaluer la santé matière en cours de fabrication des zones et peut être définir des stratégies de réparation mais ce point reste à valider.

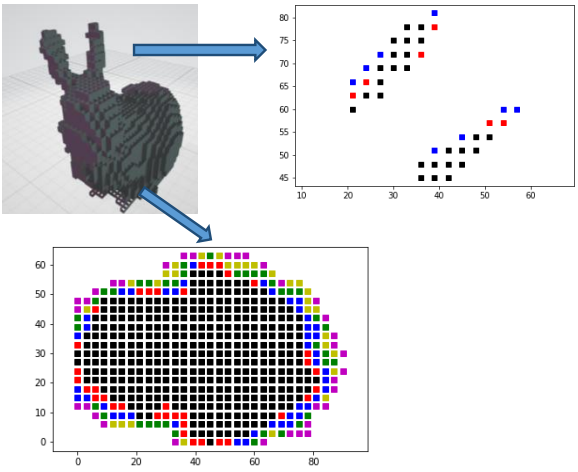


FIGURE 6 : ZONES AYANT DES POTENTIELS DEFAUTS BASES SUR L'ANALYSE IN-SITU

Le développement en cours se situe autour de l'objet 3D numérique. Il est possible de prédire les déviations possibles par zone en fonction des paramètres et de stratégies de fabrication. Il est ainsi présenté ci-dessous (Figure 7) les zones susceptibles de générer des défauts. On remarque que la zone la plus sensible est sur un côté. Cela s'explique par un lasage du bas à droite à en haut à gauche. L'augmentation de chaleur et les allers-retours du laser plus fréquents augmentent les conditions de risque de défauts.

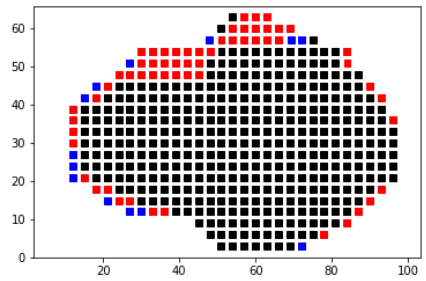


FIGURE 7 : SUPERPOSITION DE SIGNAUX PHOTODIODES ET ANALYSES POSTMORTEM POUR UNE ZONE

Une approche spatio-temporelle basée sur la conception pour la fabrication additive est donc en cours de développement. Des analyses fortes entre les données, les prédictions et la matière sont nécessaires pour valider la méthodologie.

III. CONCLUSION

Ce travail a été axé après une analyse des avantages et des défis du procédé LPBF, ainsi que sur la nécessité de développer une nouvelle génération de stratégies de contrôle. Un banc expérimental pour l'étude de la physique, la détection de défauts et le développement des stratégies de contrôle possibles a été développé. Les travaux présentent l'analyse in-situ possible de ces bancs et leur utilisation pour un contrôle prédictif avant fabrication. La détection in-situ des défauts et une vérification post-mortem a permis d'entrainer un méta-

modèle. Ce dernier pourra permettre (suite à des essais répétés) de valider une méthodologie pour faire de la qualification de pièces par le biais de la surveillance et de l'analyse en cours de processus. Le banc d'essai en cours de développement a pour objectif de faire progresser l'état actuel de la métrologie, de la surveillance et du contrôle sur machine industrielle tout en permettant d'approfondir les connaissances sur les interactions laser/matériau et les nombreux phénomènes induits en cours de procédé. Il semble aujourd'hui que ces études peuvent aussi revenir dans des phases plus amont du cycle de vie du produit.

IV. Remerciement

Les auteurs remercient les différents étudiants qui ont contribués à ces travaux et à la région Nouvelle Aquitaine pour le développement de la plateforme PHILAE.

V. References

[1] Craeghs T, Bechmann F, Berumen S, Kruth J-P. Feedback control of Layerwise Laser Melting using optical sensors. Phys Procedia 2010;5:505–14. doi:10.1016/j.phpro.2010.08.078.

[2] Raghavan A, Wei HL, Palmer TA, DebRoy T. Heat transfer and fluid flow in additive manufacturing. J Laser Appl 2013;25:052006. doi:10.2351/1.4817788.

[3] Mumtaz KA, Hopkinson N. Selective Laser Melting of thin wall parts using pulse shaping. JMater Process Technol 2010;210:279–87. doi:10.1016/j.jmatprotec.2009.09.011.

[4] Lott P, Schleifenbaum H, Meiners W, Wissenbach K, Hinke C, Bültmann J. Design of an Optical system for the In Situ Process Monitoring of Selective Laser Melting (SLM). Phys Procedia 2011;12:683–90. doi:10.1016/j.phpro.2011.03.085.

[5] Craeghs T, Clijsters S, Yasa E, Kruth J-P. Online quality control of selective laser melting. Proc. Solid Free. Fabr. Symp. Austin TX, 2011, p. 212–26.

[6] Merkt S, Hinke C, Schleifenbaum H, Voswinckel H. Geometric complexity analysis in an integrative technology evaluation model (ITEM) for selective laser melting (SLM). South Afr J Ind Eng 2012;23:97–105. doi:DOI: 10.7166/23-2-333.

[7] Mani M, Lane B, Donmez A, Feng S, Moylan S, Fesperman R. Measurement Science Needs for Real-time Control of Additive Manufacturing Powder Bed Fusion Processes. National Institute of Standards and Technology; 2015.

[8] Galy C., Le Guen E., Lacoste E., Arvieu C. Main defects observed in aluminum alloy parts produced by SLM: from causes to consequences. Additive Manufacturing 2018;22:165–175.

[9] Aggarangsi P, Beuth JL, Griffith ML. Melt pool size and stress control for laser-based deposition near a free edge. Solid Free. Fabr. Proc., Citeseer; 2003, p. 196–207.

[10] Körner C, Attar E, Heinl P. Mesoscopic simulation of selective beam melting processes. J Mater Process Technol 2011;211:978–87. doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.12.016.

[11] Islam M, Purtonen T, Piili H, Salminen A, Nyrhilä O. Temperature Profile and Imaging Analysis of Laser Additive Manufacturing of Stainless Steel. Phys Procedia 2013;41:835–42. doi:10.1016/j.phpro.2013.03.156.

[12] Ning Y, Wong Y, Fuh JY, Loh HT. An approach to minimize build errors in direct metal laser sintering. Autom Sci Eng IEEE Trans On 2006;3:73–80.

[13] Craeghs T, Clijsters S, Kruth J-P, Bechmann F, Ebert M-C. Detection of Process Failures in Layerwise Laser Melting with Optical Process Monitoring. Laser Assist Net Shape Eng 7 LANE 2012 2012;39:753–9. doi:10.1016/j.phpro.2012.10.097.

[14] Kleszczynski S, Jacobsmullen J, Sehrt JT, Witt G. Error Detection in Laser Beam Melting Systems by High Resolution Imaging. Solid Free. Fabr. Proc., Austin, TX: 2012.

[15] Zhang Y, Faghri A, Buckley CW, Bergman TL. Three-dimensional sintering of two-component metal powders with stationary and moving laser beams. J Heat Transf 2000;122:150–8.

[16] Bi G, Gasser A, Wissenbach K, Drenker A, Poprawe R. Characterization of the process control for the direct laser metallic powder deposition. Surf Coat Technol 2006;201:2676–83. doi:10.1016/j.surfcoat.2006.05.006.

[17] Krol TA, Seidel C, Schilp J, Hofmann M, Gan W, Zaeh MF. Verification of Structural Simulation Results of Metal-based Additive Manufacturing by Means of Neutron Diffraction. Phys Procedia 2013;41:849–57. doi:10.1016/j.phpro.2013.03.158.

[18] Kruth J, Mercelis P, Van Vaerenbergh J, Craeghs T. Feedback control of selective laser melting. Proc. 3rd Int. Conf. Adv. Res. Virtual Rapid Prototyp. Leir. Port. Sept, Citeseer; 2007, p. 24–9.

[19] Krauss H, Eschey C, Zaeh MF. Thermography for Monitoring the Selective Laser Melting Process. Proc Solid Free Fabr Symp 2012:999–1014.

[20] Reutzel EW, Nassar AR. A survey of sensing and control systems for machine and process monitoring of directed-energy, metal-based additive manufacturing. Rapid Prototyp J 2015;21 :159–67. doi:10.1108/RPJ-12-2014-0177.

[21] Uhlmann E., ontes R.P., Laghmouchi A., Intelligent pattern recognition of a SLM machine process and sensor data, CIRP ICME 2016

[22] Bajaj P., Wright J., Todd I., Jagle E.A., Predictve process parameter selection for Selective Laser Melting Manufacturing, Additive Manufacturing, 2019, 27, 246-258

[23] Kleszczynski A, Jacobsmühlen J, Sehrt J. Error Detection in Laser Beam Melting Systems by High Resolution Imaging. 3. Aufl. München: Hanser; 2012.

[24] Kruth J, Levy G, Klocke F, Childs THC. Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. CIRP Ann - Manuf Technol 2007;56:730–59. doi:10.1016/j.cirp.2007.10.004.

[25] Berumen S, Bechmann F, Lindner S, Kruth J-P, Craeghs T. Quality control of laser- and powder bed-based Additive

Manufacturing (AM) technologies. Phys Procedia 2010;5, Part B:617–22. doi:10.1016/j.phpro.2010.08.089.

Les éléments importants pour fabriquer des pièces massives par technologie WAAM*

*Hoang Vo Thanh
Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP
46, avenue Félix Viallet
38000 Grenoble, France
thanh-hoang.vo@grenoble-inp.fr

Christelle Grandvallet, Frédéric Vignat
Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP
46, avenue Félix Viallet
38000 Grenoble, France

Résumé* — La technologie WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) est un procédé basé sur la fusion d'un fil métallique utilisant un arc électrique comme source de chaleur. Le WAAM a un impact significatif sur la réduction du coût et du temps de production des pièces métalliques massives complexes. Toutefois, la gestion de la température et du cordon de soudure reste un défi car les hautes températures peuvent causer des déformations dans la pièce. Des variables telles que vitesse de torche (TS), vitesse d'apport de fil (WFS), et temps de repos jouent un rôle important dans la géométrie de cordon qui donne la forme finale à la pièce; d'où la nécessité d'une méthode pour choisir une bonne combinaison des paramètres de fabrication. Cet article propose ainsi un modèle qui aide à construire des pièces massives par WAAM. L'étude s'intéresse aux étapes pour déterminer les paramètres process. Un plan d'expérience avec différents échantillons fabriqués par soudage CMT (Cold Metal Transfer) et avec une stratégie de remplissage en zigzag identifie l'influence de la longueur de cordon sur ces paramètres.

***Mots-clés*— Wire Arc Additive Manufacturing, Cold Metal Transfer, stratégie zigzag, paramètres WAAM**

I. INTRODUCTION

A. La technologie WAAM et le procédé CMT

Le WAAM est un procédé de fabrication additive basée sur les dépôts de fil métallique en utilisant [1]:

- une source de chaleur : l'énergie d'un arc électrique
- un réservoir de matière : sous forme de fil
- un système de déplacement

Différentes technologies sont utilisées pour la fabrication WAAM, par exemple, la soudure à l'arc plasma (PAW) [2], le soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène (TIG), le soudage à l'arc en atmosphère (inerte ou active) avec fil fusible (MIG, MAG, GMAW) [3] et le Cold Metal Transfer (CMT) [4].

Le procédé CMT (Cold Metal Transfer) en particulier a été développé par la société FRONIUS [4]. Il s'agit d'un système GMAW amélioré. Ce procédé est qualifié de soudage à "froid", car il permet, par rapport au GMAW conventionnel, de réduire l'apport de chaleur. Cet aspect est intéressant pour la fabrication additive car l'objectif est d'associer des cordons pour construire un composant : l'énergie est donc utilisée pour faire fondre une partie du cordon précédemment déposé. Si l'énergie apportée à la pièce est trop importante, il n'est pas possible de construire un composant car cela peut créer un écroulement de la matière. Le principe de ce procédé repose sur un mouvement d'avance et de recul du fil. Ainsi, le cordon est déposé sous forme d'une succession de gouttes. Les étapes du cycle CMT sont représentées sur la Figure 1.

Le procédé CMT [4] présente trois avantages principaux par rapport au soudage GMAW standard :

- la quasi-absence de projection lors de la soudure : le recul du fil forme une goutte pendant le court-circuit, la soudure est donc propre et le matériau homogène ;
- le faible apport de chaleur (court-circuit très court donc l'arc apporte de la chaleur de manière ponctuelle) ;
- la stabilité de l'arc (le paramétrage et le réglage de la longueur de l'arc interviennent de manière mécanique).

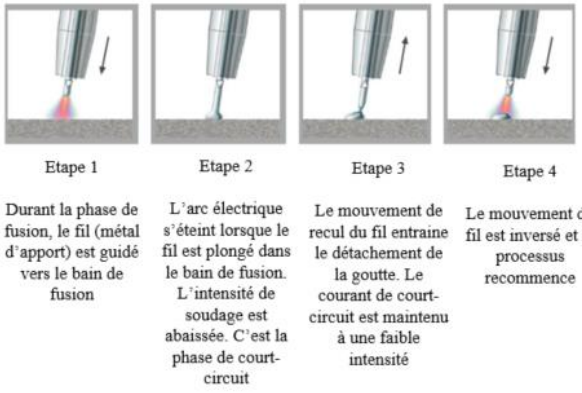


Figure 1. PRINCIPE DU CYCLE CMT

Fabriquer des grandes pièces par WAAM signifie réaliser des pièces massives, c'est-à-dire en multi-cordon sur la largeur, et non fabriquer des murs fins en mono-cordon. Celles-ci peuvent en outre être à géométrie complexe.

B. Objectifs et scope

L'objectif de ce travail de recherche est de proposer une méthode de fabrication de pièces massives par WAAM avec le procédé CMT. Aussi, cette étude se concentre sur la stratégie et les paramètres de fabrication avec des trajectoires 5 axes.

Cet article présentera tout d'abord l'état de l'art sur les éléments importants pour fabriquer des pièces massives par WAAM, à savoir les différentes stratégies et les paramètres de fabrication. Dans une section suivante sont présentés les paramètres influents sur la fabrication de pièces massives. Différentes expérimentations sont décrites ensuite afin de trouver quels paramètres sont à ajuster. En conclusion, nous présentons nos résultats majeurs quant aux paramètres de fabrication et à la stratégie de remplissage.

II. ETAT DE L'ART

Peu d'études sont disponibles sur la méthodologie de réalisation de pièces complexes par WAAM. Parmi elles, Vincent Quérard [6] a proposé en 2019 une démarche pour réaliser des pièces de grandes dimensions (Fig. 2).

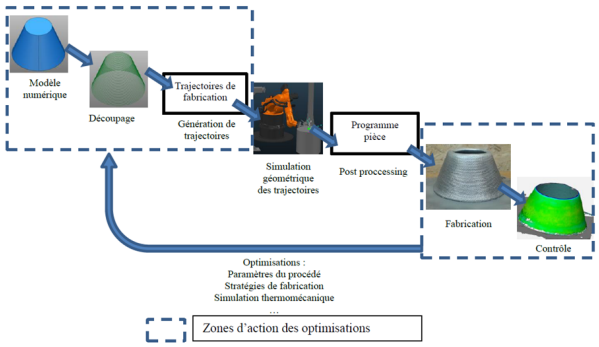


Figure 2. ARBRE DE CHOIX DU TYPE DE TRAJECTOIRES A GENERER EN CMT PAR QUERARD [6]

A. *Stratégie de fabrication*

La génération de trajectoires s'appuie sur le modèle CAO de la pièce. Une étape de découpage permet d'obtenir les courbes qui décrivent les trajectoires de fabrication. Le découpage est généralement réalisé par une succession de plans parallèles [5] (Voir Figure 3).

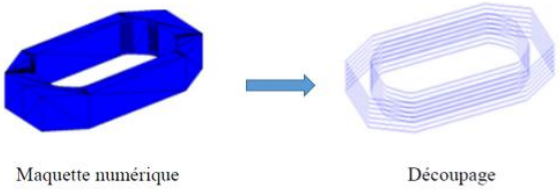


Figure 3. STRATEGIE DE DECOUPAGE EN PARALLELE

Afin de choisir le type des trajectoires à générer, il est nécessaire d'analyser localement la géométrie du composant à fabriquer [6]. Sur un même composant, nous pouvons distinguer différentes zones. Ces dernières peuvent être divisées en deux catégories :

- Les zones pouvant être réalisées directement avec des murs mono-cordon (sans remplissage), c'est-à-dire dont l'épaisseur de paroi est inférieure à la largeur d'un cordon.
- Les zones nécessitant un remplissage, correspondant à une pièce massive ou dont l'épaisseur de paroi est supérieure à la largeur d'un cordon.

La démarche de choix est résumée dans la Figure 4 afin de déterminer quel type de trajectoires générer pour la fabrication additive par WAAM. En effet, cette démarche préalable est nécessaire, car selon le résultat de ces choix, le découpage peut être affecté (par exemple, l'épaisseur de couche peut être différente entre un composant mono-cordon et un composant en remplissage). Trois types de trajectoires sont ainsi considérés : 3 axes, 5 axes et remplissage.

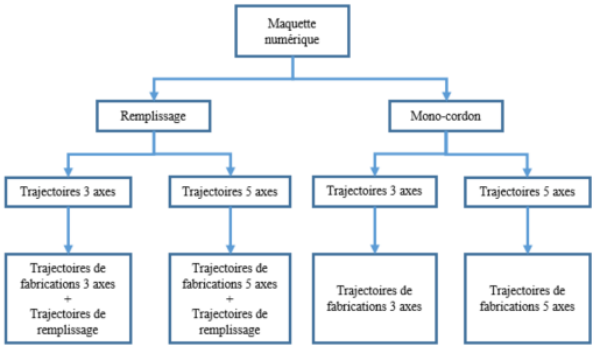


Figure 4. ARBRE DE CHOIX DU TYPE DE TRAJECTOIRES A GENERER AVEC LE CMT

La fabrication de pièces massives nécessite la génération de trajectoires de remplissage : dépôts de cordons côte à côte au sein d'une même couche. Plusieurs stratégies de remplissage peuvent être envisagées pour fabriquer des composants massifs: balayage raster [7], zigzag [8, 9], contour [10, 11], spiral [12, 13] (Figure 5).

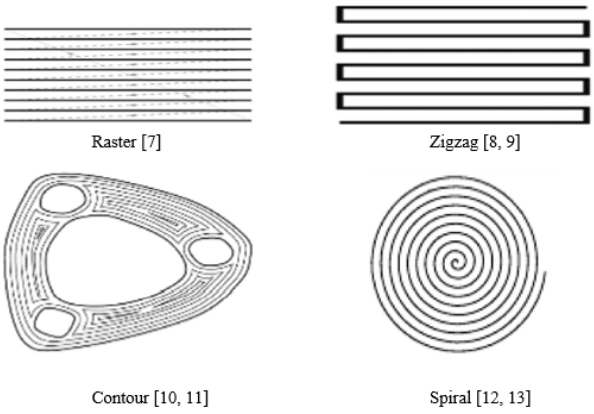


Figure 5. DIFFERENTES STRATEGIES DE REMPLISSAGE

La stratégie raster est basée sur la projection dans une seule direction [7]. Dérivée de la stratégie raster, la génération de trajectoire en zigzag est la méthode la plus utilisée dans les procédés de fabrication additive. Alors qu'elle remplit les géométries ligne par ligne le long d'une direction comme l'approche raster, l'approche en zigzag combine les lignes parallèles séparées en une seule passe continue, ce qui réduit

considérablement le nombre de passes de trajectoire d'outil [8, 9]. 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, qui est une autre méthode typique, peut résoudre efficacement ce problème de qualité géométrique en suivant la tendance géométrique des contours de la pièce [10, 11]. Cependant, en décalant les contours, le schéma génère de nombreuses courbes fermées. Enfin, la génération de trajectoires en spirale est largement appliquée dans l'usinage à commande numérique (CN), mais ne convient que pour certains modèles géométriques spéciaux dans le processus AM [12, 13].

Le paramétrage de WAAM est par conséquent une tâche difficile, car plusieurs paramètres sont impliqués et sont interdépendants, ce qui rend le processus global complexe. Peu d'études proposent actuellement une méthode générale pour choisir les paramètres de fabrication. Un modèle de choix des paramètres de fabrication intéressant a été proposé par Quérard [6] en 2019 (Fig. 6). Deux étapes principales sont incluses :

- Etape 1: fabrication de cordons simples selon différents jeux de paramètres de fabrication (WFS et TS). Cette étape permet d'obtenir un domaine de stabilité des paramètres de fabrication. Un ensemble de paramètre (WFS, TS) peut alors être choisi parmi des valeurs dans ce domaine.

- Etape 2 : Des murs simples sont fabriqués avec des paramètres choisis pour obtenir une valeur de l'incrémenté en z en fonction des paramètres (WFS, TS).

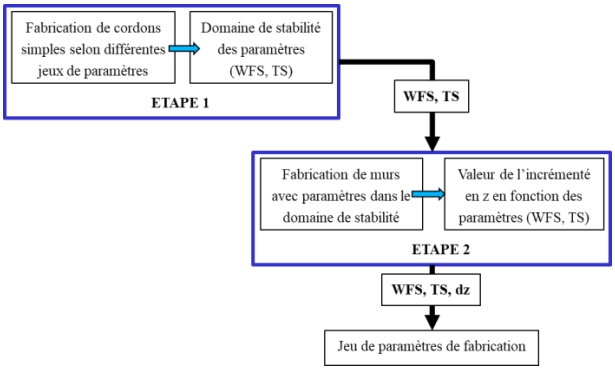


Figure 6. MODELE DE CHOIX DES PARAMETRES DE FABRICATION PROPOSE PAR QUERARD [6]

Les autres études disponibles sont concentrées sur l'influence des paramètres de fabrication sur la qualité du cordon soudure (géométrie et santé matière).
Dinovitzer et al. [14] ont appliqué la méthode de Taguchi et l'ANOVA pour déterminer les effets de la vitesse de déplacement, du taux d'alimentation du fil, du courant et du débit d'argon sur les réponses, y compris la forme et la taille des cordons, la rugosité des cordons, les niveaux d'oxydation, la fusion en profondeur et la microstructure. La vitesse de déplacement et le courant ont l'effet le plus important sur les réponses. L'augmentation de la vitesse de déplacement ou la diminution du courant ont provoqué une diminution de la fusion à travers la profondeur et une augmentation de la rugosité.
Dahat et al. ont développé une méthode qui nous permet de faire le choix du courant (Im) et de la vitesse de déplacement (TS) pour une largeur de couche (LW) souhaitée. Ces paramètres ont conduit à éliminer moins de matériau en post-opérations [15].

B. Conclusion

Les travaux existants nous montrent la capacité du procédé CMT à fabriquer des pièces complexes de grande dimension. Toutefois, ce type de procédé n'est pas facile à maîtriser, les paramètres étant différents pour chaque système de déplacement (robot de soudure) et chaque matériau. En effet, selon le matériau et le diamètre du fil, les modes de soudage doivent adapter l'apport d'énergie en fonction du besoin.

Certaines études parlent aussi de fabriquer des pièces en mono-cordon. Ces résultats nous permettent alors de choisir des paramètres de fabrication, des stratégies de fabrication pour les pièces fines. Malgré cela, nous ne savons pas si ces choix sont applicables à la fabrication de pièces massives.

Dans notre contexte, notre question de recherche se pose alors:

- *Quelles sont les principales difficultés pour fabriquer une pièce massive ?*

En particulier :

- *Comment fabriquer des pièces inclinées ?*
- *Comment fabriquer des singularités géométriques ?*

Pour y répondre, le principal défi est de maitriser la forme du cordon (largueur et hauteur), ainsi que la température et le recouvrement des cordons. Diverses expérimentations doivent permettre de montrer quels paramètres sont à ajuster pour obtenir une pièce de qualité. Elles sont effectuées avec des murs simples en aluminium, des murs inclinés, puis des singularités géométriques. Celles-ci sont détaillées dans la section suivante.

III. EXPERIMENTATIONS

Afin de lancer nos expérimentations, il est décidé de prendre le modèle d'une pale. En fabriquant un profil similaire à une section de pale, nous voulons en effet observer deux points : la stratégie de la fabrication et le choix des paramètres de fabrication.

A. Stratégie de fabrication

Une des difficultés du WAAM est la fabrication de géométries inclinées. Des expérimentations ont été effectuées sur les géométries déportées simples comme un mur incliné, puis sur des géométries plus complexes. Une expérience de fabrication d'un mur incliné de 60° par rapport à l'axe horizontal avec deux stratégies différentes, la torche colinéaire avec le mur et la torche verticale, a montré deux résultats différents (Figure 7).

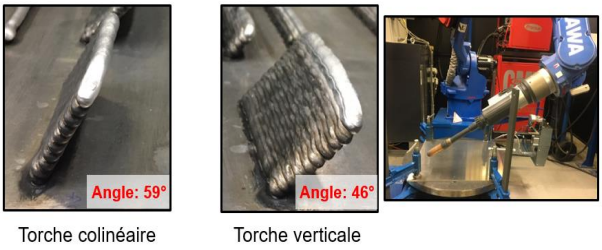


Figure 7. FABRICATION DE DEUX MURS INCLINES AVEC DEUX STRATEGIES DIFFERENTES

Une hypothèse a été proposée pour expliquer ces deux résultats avec ces deux stratégies de fabrication (Figure 8). En théorie, on souhaite fabriquer un mur incliné avec la direction d. L'incrémentée en z est h, et le point de soudure de chaque couche est P. En réalité, l'incrémenté en z est hr, donc le point de soudure de chaque couche est déplacé à Pr. Avec la torche verticale, le point de la soudure est déplacé selon la direction verticale. L'ensemble de Pr est sur la direction dr, par conséquent le mur réel a un écart avec le mur théorique. Pour la torche colinéaire, le point de la soudure Pr est déplacé selon la direction d, donc la direction du mur réel dr est la même que celle du mur théorique. La hauteur du mur a juste changé.

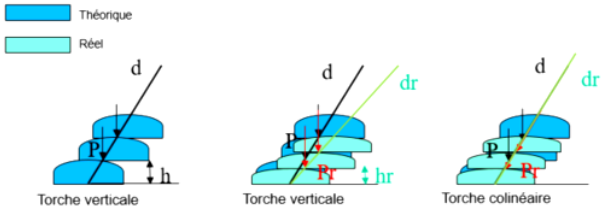


Figure 8. EXPLICATION SUR LES DEUX STRATEGIES DE FABRICATION UTILISEES

Le valeur de l'incrémenté en z est très importante pour obtenir une bonne géométrie. Afin de valider notre hypothèse, un mur incliné est fabriqué avec la torche verticale et avec une bonne valeur de l'incrémenté en z (Figure 9). Nous avons retouvé un mur de 59°.

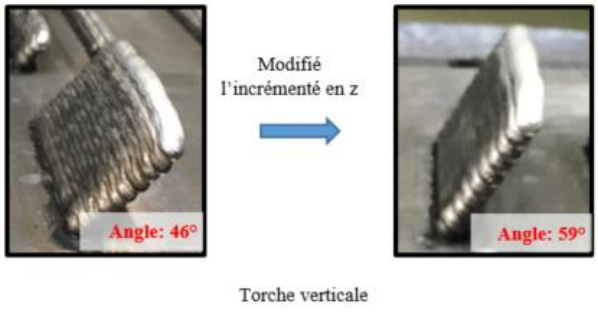


Figure 9. MUR OBTENU AVEC UNE BONNE VALEUR D'INCREMENTE EN Z

Dans une seconde expérience, la stratégie de fabrication a été testée sur une pièce massive. La Figure 10 présente une singularité géométrie. On peut distinguer deux zones dans ce profil:

- la zone 1 dont la largeur est inférieure à la largeur d'un seul cordon
- la zone 2 dont la largeur est supérieure à la largeur d'un seul cordon.

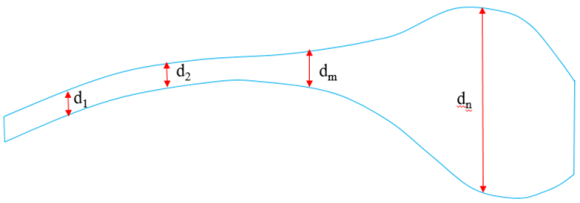


Figure 10. EXEMPLE DE SINGULARITE GEOMETRIQUE A FABRIQUER

Deux stratégies de fabrication ont été définies:

- Distinction des deux zones du profil

La zone 1 a été fabriquée en mono-cordon et la zone 2 en utilisant le remplissage en Zigzag (Figure 11).

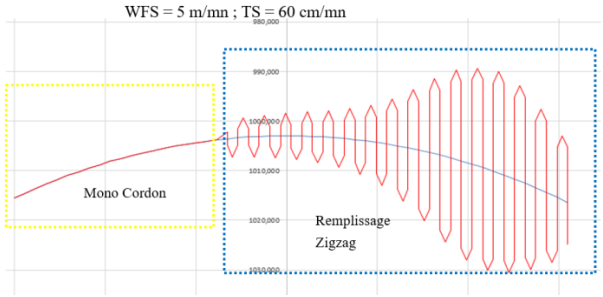


Figure 11. STRATEGIE MONO-CORDON ET REMPLISSAGE EN ZIGZAG

- L'utilisation du remplissage Zigzag pour toute la longueur du profil (Figure 12)

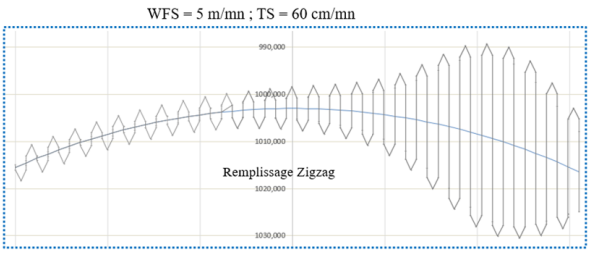


Figure 12. STRATEGIE DE REMPLISSAGE EN ZIGZAG

Pour les deux stratégies, seulement deux couches en aller – retour ont été construites volontairement afin de bien observer les différences entre ces deux pièces à cette hauteur (Figure 13).

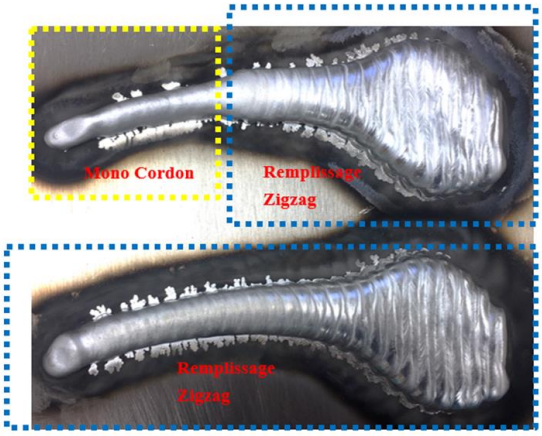


Figure 13. RESULTATS DE DEUX STRATEGIES AVEC DEUX COUCHES DE FABRICATION

Concernant la pièce fabriquée avec la stratégie 1, on observe un écart de plus de 2 mm entre la zone mono-cordon et la zone remplissage. En outre, il y a aussi un gros écart de la largeur à la position de changement entre deux zones.

Concernant la pièce fabriquée avec la stratégie 2, à la deuxième couche, la hauteur est assez similaire sur toute la pièce. Du point de vue de la qualité de surface et qualité géométrique, la deuxième stratégie est plus pertinente que la première. Aussi, afin d'observer la hauteur moyenne de chaque couche, la même pièce que l'expérience précédente a été fabriquée avec un nombre de couches supérieur à deux.

B. Influence des paramètres de fabrication sur la hauteur moyenne de la pièce

Un prototype avec dix couches fabriquées a été obtenu comme indiqué dans la Figure 14.

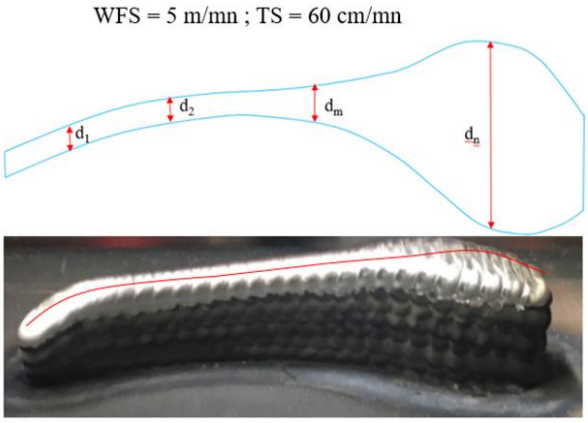


Figure 14. PROTOTYPE AVEC DIX COUCHES DE FABRICATION

La différence de hauteur de la pièce est remarquable. Celle-ci est plus basse aux deux côtés de la pièce parce qu'il y a un effet de bords. La hauteur de la pièce est différente selon la variation de la longueur du cordon dn. La zone où le cordon est le plus long possède la plus grande épaisseur.

Ce problème peut s'expliquer comme suit : quand la longueur d du zigzag est plus grande, le temps de fabrication aller-retour est plus long. Le temps de refroidissement requis est par conséquent plus important, la température d'étalement est plus froide, ce qui entraîne la fabrication de cordons plus étroits et plus hauts.

Un autre prototype de dix couches a été fabriqué en modifiant la vitesse de déplacement (TS) par rapport la longueur du cordon afin d'obtenir une hauteur identique (4,5 mm) partout dans la pièce (Fig. 16). Pour chaque longueur du cordon, des murs massifs ont été fabriqué avec deux valeurs vitesse de déplacement différents. La hauteur moyenne de chaque prototype a été mesurée. On a considéré que la relation entre vitesses de déplacement et hauteur moyenne est une équation superlative (Fig. 15). Cette équation nous permet de calculer la vitesse de déplacement afin d'avoir une hauteur moyenne de 4,5 mm.

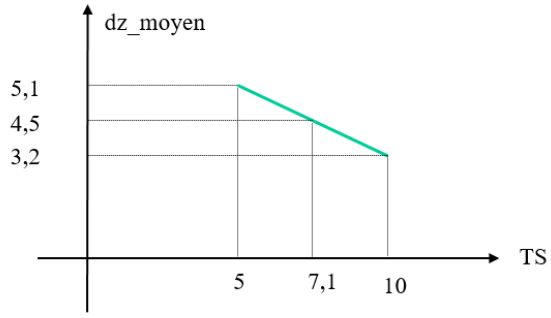


Figure 15. HAUTEUR MOYENNE EN FONCTION DE LA VITESSE DE DEPLACEMENT AVEC LONGUEUR DU CORDON DE 10MM

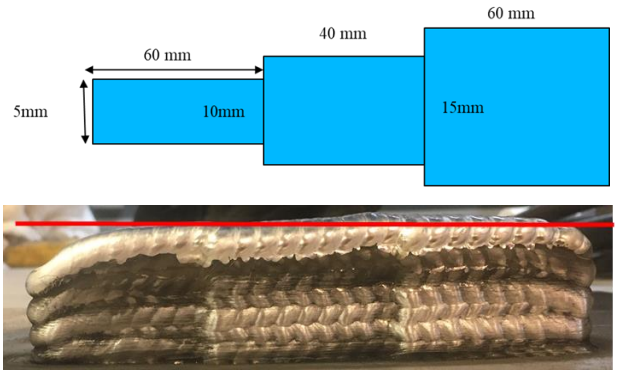


Figure 16. PROTOTYPE EN MODIFIANT LA VITESSE DE DEPLACEMENT (TS)

En général, la hauteur de la pièce est assez stable. Une hauteur moyenne de 4,6 mm a été obtenue contrairement aux 4,5 mm théoriques. Reste alors toujours le problème au bord de la pièce et dans la zone de changement de longueur du cordon.

C. Conclusion

Concernant la stratégie de fabrication, nous préconisons d'utiliser la stratégie de remplissage en zigzag partout dans la pièce, indépendamment de la largeur de la pièce.

Quant aux paramètres de fabrication, le modèle existant de choix des paramètres est correct pour une pièce en mono-cordon mais n'est pas adapté pour une pièce massive du fait du problème de la hauteur de la pièce.

Par conséquent, un nouveau modèle de choix des paramètres doit être développé.

IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le défi d'une pièce épaisse fabriquée en WAAM est qu'elle doit avoir une hauteur constante quelle que soit sa longueur et sa largeur, pour pouvoir la considérer comme de bonne qualité.

Pour fabriquer une pièce massive avec une singularité géométrique, nous avons cherché à identifier la stratégie de remplissage la meilleure et à identifier les paramètres de fabrication qui influent sur la qualité de la pièce :

- Une stratégie de remplissage en zigzag apporte de bons résultats.
- Une valeur de l'incrémenté en z correctement déterminée donne une bonne géométrie de pièce (i.e. même géométrie que la modèle CAO).
- Pour obtenir un bon prototype, la vitesse de déplacement (TS) doit varier selon la longueur du cordon.

Cette étude a montré les points importants pour fabriquer les pièces massives (multi-cordon) par le WAAM. Bien que ses résultats ne permettent pas encore de déterminer les paramètres de fabrication, les perspectives qui en résultent pourraient concerner :

- Une proposition d'amélioration de la méthode de Quérard [6] pour la fabrication de pièces massives par WAAM.
- Un modèle permettant de calculer la vitesse de déplacement (TS) en fonction de la longueur du cordon.

V. REFERENCES

[1] W. S. Filomeno Martina, Wire + arc additive vs . from solid: a cost comparison, *Welding Engineering and Laser Processing Centre, Cranfield University*, 2015.

[2] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, Wire-feed additive manufacturing of metal components : technologies, developments and future interests, *Int J Adv ManufTechnol*, 2014.

[3] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM), *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 31, pp. 101–110, 2015.

[4] Fronius, Cold Metal Transfer : The technology, *CMT technology*, 2014.

[5] J. S. Panchagnula and S. Simhambhatla, Inclined slicing and weld-deposition for additive manufacturing of metallic objects with large overhangs using higher order kinematics, *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 11, no. 2, pp. 99–108, 2016.

[6] Querard, Vincent. Réalisation de pièces aéronautiques de grandes dimensions par fabrication additive WAAM. Diss. 2019.

[7] Dunlavey, M.R., Efficient polygon-filling algorithms for raster displays. *ACM Transactions on Graphics (Tog)*, *2*(4), pp.264-273, 1983.

[8] Park, S.C. and Choi, B.K., Tool-path planning for direction-parallel area milling. *Computer-Aided Design*, *32*(1), pp.17-25, 2000.

[9] Rajan, V.T., Srinivasan, V. and Tarabanis, K.A., The optimal zigzag direction for filling a two-dimensional region. *Rapid Prototyping Journal*, 2001.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] Dinovitzer, M., Chen, X., Laliberte, J., Huang, X. and Frei, H., Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure. *Additive Manufacturing*, *26*, pp.138-146, 2019.

[15] Dahat, S., Hurtig, K., Andersson, J. and Scotti, A., A methodology to parameterize wire+ arc additive manufacturing: a case study for wall quality analysis. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, *4*(1), p.14, 2020.

Liste des auteurs

Abdoune Farah, 152–157
Antoine Jean-Francois, 211–217
Aoussat Ameziane, 71–76

Barkallah Maher, 140–145
Baudouin Cyrille, 56–63
Benaben Audrey, 40–45
Beraud Nicolas, 226–231
Berger Thierry, 27–32
Bigot Regis, 56–63
Blanco Eric, 77–82
Borthomieu Alexandre, 89–96
Bouton Nicolas, 122–127
Briand Cyril, 21–26
Bricogne Matthieu, 218–224
Brilhault Quentin, 9–14

Cadoret Thomas, 15–20
Carassus Hugo, 232–237
Cardin Olivier, 152–157
Castagna Pierre, 152–157
Caulier Patrice, 146–151
Cavallucci Denis, 5–8
Chaabane Sondes, 27–32
Chanal Helene, 122–127
Chapelin Julien, 158–163
Cherfi Zohra, 140–145
Chibane Hicham, 5–8
Chirol Clement, 46–51
Conrard Blaise, 128–132
Courtonne Jean-Yves, 89–96

Daaboul Joanna, 97–102
Daidie Alain, 40–51
Daille Lefevre Bruno, 189–196
Danjou Christophe, 15–20
Deneux Dominique, 204–210
Dequidt Antoine, 27–32
Derigent William, 211–217
Dherbomez Gerald, 128–132
Di Loreto Ines, 165–170
Diaz-Pichardo Rene, 83–88
Duponnois Romain, 183–188
Durand Camille, 56–63

Eynard Benoit, 218–224

Foissac Charly, 46–51
Freund Ludovic, 56–63

Gellot Francois, 134–139
Germa Thierry, 21–26
Gilles Patrick, 104–108
Godot Xavier, 189–196
Gomes Lisboa De Souza Adriana, 177–182
Gotz Christian, 204–210
Gouyon David, 34–39
Grandvallet Christelle, 244–249
Grimal Lou, 165–170
Guerard Sandra, 232–237
Guerin Jean-Dominique, 56–63, 198–203, 232–237
Guillaume Romain, 115–121

Haddar Mohamed, 140–145
Hanifi Masih, 5–8
Haugou Gregory, 232–237
Homann Klaus, 204–210
Houssin Remy, 5–8
Hu Heng, 189–196

Jost Vincent, 89–96
Jouffroy Jules, 134–139
Julien Nathalie, 171–176

Kromer Robin, 238–243

Lalevee Alexis, 77–82
Lamy Pascal, 183–188
Lauer Mathieu, 158–163
Le Duigou Julien, 15–20
Lecasse Stephane, 134–139
Leino Markku, 204–210
Level Pascal, 198–203
Levesque Benoit, 34–39
Levrat Eric, 183–188
Lombard Muriel, 211–217
Luu Duc-Nam, 71–76

Mabru Catherine, 52–55
Maier Claus-Jurgen, 71–76
Mandil Guillaume, 89–96

Maranzana Nicolas, 71–76
Marco Fabien, 21–26
Markiewicz Eric, 232–237
Martin Eric, 171–176
Martin Patrick, 189–196
Meaude Mathieu, 97–102
Mendez Leon Eduardo, 83–88
Merzouki Rochdi, 128–132
Moret Nathan, 21–26
Morvan Herve, 232–237
Moutsinga Irmella, 122–127
Museau Matthieu, 226–231

Nicolet Pierre-Marie, 218–224
Noel Clement, 97–102
Noel Frederic, 109–114
Nouiri Maroua, 152–157

Orciere Herve, 52–55

Paccot Flavien, 122–127
Parant Alexandre, 134–139
Paredes Manuel, 52–55, 64–69
Paroissien Eric, 40–45
Philippot Alexandre, 134–139
Pichon Guillaume, 40–45
Pinquie Romain, 109–114
Pourroy Franck, 226–231
Proriol Francois, 204–210

Raab Lisa, 204–210
Ramirez Emilio, 226–231
Raoudha Gaha, 218–224
Reyes Tatiana, 83–88
Riera Bernard, 134–139

Sallez Yves, 27–32
Santin Jean-Jacques, 27–32
Sateri Jorma, 204–210
Segonds Stephane, 46–51
Seguy Sebastien, 64–69
Siadat Ali, 183–188
Souifi Amel, 140–145
Stasse Olivier, 21–26
Steck Lionel, 158–163
Sturm Peter, 89–96

Taix Michel, 21–26
Thomann Guillaume, 177–182
Troussier Nadege, 77–82, 165–170

Vaissette Julien, 52–55
Vignat Frederic, 244–249
Villeneuve Francois, 226–231
Vo Thanh Hoang, 244–249

Westacott Robin, 204–210
Wu Zhenhang, 64–69

Zolghadri Marc, 140–145

Liste des participants

- Abdeljaouad Amine
- Abdoune Farah
- Abisset-Chavanne Emmanuelle
- Aboulhassane Otmane
- Al Khalil Monzer
- Alix Thecle
- Amoretti Thomas
- Amzil Kenza
- Aniorte Perez Francisco
- Antoine Jean-Francois
- Anwer Nabil
- Artozoul Julien
- Aubry Alexis
- Aziz Abdelhakim
- Bachmann Pascale
- Bajolet Julien
- Balan Tudor
- Balland Nicolas
- Ballu Alex
- Baouch Yacine
- Baron Claude
- Barranger Yoann
- Barrios Piers
- Barros Garcia Isabel
- Baudez Jean-Christophe
- Bauer Tom

- Bearee Richard
- Becquart Charlotte
- Belarouci Abdelkader
- Belkebir Hadrien
- Bellenger Emmanuel
- Ben Rejeb Helmi
- Bennani Bruno
- Benyahia Kheira
- Beraud Nicolas
- Berger Nicolas
- Berger Thierry
- Bernard Alain
- Besbes Mariem
- Bikai Mohanad
- Blanchard Vincent
- Bonzani Nicolas
- Borthomieu Alexandre
- Bouazza Wassim
- Bouet Laetitia
- Boujut Jean-Francois
- Bourgon Ugo
- Brau Fabrice
- Briand Cyril
- Bricogne Matthieu
- Brilhault Quentin
- Brissaud Daniel
- Brunel Jean-Francois
- Burglen Cindy
- Cadoret Thomas
- Caillaud Aude
- Camille Pedarriosse
- Campocasso Sebastien

- Campos Sabioni Rachel
- Carassus Hugo
- Cardin Olivier
- Carnel Caroline
- Casari Pascal
- Castagna Pierre
- Cauffriez Laurent
- Caulier Patrice
- Cauvin Aline
- Chaabane Sondes
- Chalvin Maxime
- Chambard Anne
- Chanal Helene
- Chapelin Julien
- Chavatte Theo
- Chehami Lynda
- Cheutet Vincent
- Chevrot Thierry
- Chielens Arnaud
- Chinesta Francisco
- Clanche Fabien
- Claude Alexis
- Claustre Thomas
- Collot Eric
- Conrard Blaise
- Coupeaux Sebastien
- Coutellier Daniel
- Daaboul Joanna
- Daidie Alain
- Daille-Lefevre Bruno
- Danion Alexandre
- Danjou Christophe

- Debernard Serge
- Delacourt Celine
- Demoly Frederic
- Deneux Dominique
- Dequidt Antoine
- Derigent William
- Derks Didier
- Dessaux Florian
- Devic Catherine
- Devos Camille
- Di Mascolo Maria
- Dimassi Saoussen
- Djemai Mohamed
- Dogheche El Hadj
- Dougier Nathanael
- Douin Chloe
- Duponnois Romain
- Durand Camille
- Durupt Alexandre
- Ecrepont Constant
- Emeriau Quentin
- Evrard Damien
- Eynard Baptiste
- Eynard Benoit
- Foissac Charly
- Fonta Didier
- Foucault Gilles
- Francois Remy
- Frein Yannick
- Gabrovska Velina
- Galaup Michel
- Gardan Julien

- Gaudin Julie
- Gault Timothee
- Gellot Francois
- Gendreau Dominique
- Genevois Pierre
- Germain Guenael
- Gilles Patrick
- Giraud Herve
- Godineau Kevin
- Godot Xavier
- Gouyon David
- Grandvallet Christelle
- Grimal Lou
- Gruescu Ion Cosmin
- Gruhier Elise
- Guerin Jean-Dominique
- Guerineau Julia
- Guillaume Romain
- Guyon Jean-Baptiste
- Haddadi Halim
- Hanifi Masih
- Hassan Alaa
- Henocque Thierry
- Hillion Florian
- Ho Minh Hung
- Horent Helene
- Houssin Remy
- Humbert Maxime
- Icart Lucas
- Jacquand Raoul
- Jeannee Nicolas
- Jimenez Lucas

- Jouffroy Jules
- Joussaume Aurelien
- Julien Nathalie
- Kahouadji Mouad
- Khalij Leila
- Kim Lise
- Klement Nathalie
- Kouiss Khalid
- Kremer Arnaud
- Kromer Robin
- Lagarrigue Pierre
- Laguna Salvado Laura
- Lalevee Alexis
- Lamouri Samir
- Laroche Florent
- Lartigau Julie
- Lauer Mathieu
- Le Duigou Julien
- Le Loch Sebastien
- Le Mortellec Antoine
- Le Picart Denis
- Lecasse Stephane
- Leclaire Patrice
- Lemarquis Elie
- Level Pascal
- Levesque Benoit
- Levrat Eric
- Limousin Maxime
- Lino Alain
- Lombard Muriel
- Loret Vincent
- Lou Ruding

- Luu Duc-Nam
- Ma Fujing
- Malaval Jean-Louis
- Malchair Corentin
- Malige Pierre
- Mandil Guillaume
- Mangeot Mathieu
- Mangione Fabien
- Many Annick
- Marange Pascale
- Maranzana Nicolas
- Marin Philippe
- Martin Patrick
- Masclet Cedric
- Masschelein Olivier
- Mayo Solis Jennifer
- Maze Christophe
- Meaude Mathieu
- Mechekour El-Hadi
- Mege-Revil Alexandre
- Mehdi Souzani Charyar
- Mendez Leon Eduardo
- Mercier David
- Merlo Christophe
- Merzouki Rochdi
- Meunier Rachel
- Millet Dominique
- Moreau Frederic
- Morel Anne
- Moutsinga Irmella
- Museau Matthieu
- Nadir Fouka

- Ndiaye Nogaye
- Neira Yauri Richard Roberto
- Nicolas Perry
- Nicolet Pierre-Marie
- Niederlender Nathan
- Noel Clement
- Noel Frederic
- Nouiri Maroua
- Nzetchou Stephane
- Olivier Nicolas
- Orquera Myriam
- Ostermeyer Emeric
- Paccot Flavien
- Pailhes JerÃ´me
- Panzoli David
- Paquet Elodie
- Parant Alexandre
- Paredes Manuel
- Penas Olivia
- Pennel Christophe
- Perenon Marie-Laure
- Pernot Jean-Philippe
- Petre Christophe
- Philippot Alexandre
- Pichon Guillaume
- Pietrac Laurent
- Plateaux Regis
- Pourabdollahian Borzoo
- Pourroy Franck
- Proriol Francois
- Quaegebeur Philippe
- Rabany Thierry

- Ramirez Emilio
- Ranger Tom
- Raoudha Gaha
- Raynaud Stephane
- Rebergue Guillaume
- Remane Mohamed
- Richir Simon
- Riera Bernard
- Rio Maud
- Riondet Lucas
- Riviere Alain
- Robin Vincent
- Romain Pinquie
- Rose Bertrand
- Roucoules Lionel
- Sadaoui Sif Eddine
- Salim Belouettar
- Sallez Yves
- Santin Jean-Jacques
- Scaravetti Dominique
- Scrive Olivier
- Seck Ramatoulaye
- Seitier Philippe
- Sequies Thierry
- Serra Roger
- Souifi Amel
- Strykers Francois
- Stumme Ludovic
- Sturm Peter
- Tahiri Imane
- Taix Michel
- Taniere Thierry

- Tassin Regis
- Tatiana Reyes
- Tebani Karima
- Terrenoir Laurent
- Thibaut Cadiou
- Thomann Guillaume
- Tollenaere Michel
- Toumi Salem
- Troussier Nadege
- Vaissette Julien
- Valentin Le Gauche
- Vanderhaegen Frederic
- Vignat Frederic
- Villeneuve Francois
- Vo Thanh Hoang
- Vu Hai Canh
- Williatte Philippe
- Wu Zhenhang
- Yahia Esma
- Yang Xinrui
- Zamai Eric
- Zaparoli Cunha Barbara
- Zhang Yicha
- Zhang Huibin
- Zolghadri Marc
- Zwolinski Peggy

Comité Scientifique

Co-Présidents

Daniel COUTELLIER – INSA Hauts-de-France
Dominique DENEUX – INSA Hauts-de-France

Membres

ABISSET-CHAVANNE Emmanuelle – ENSAM Bordeaux
ANWER Nabil – Université Paris-Saclay
BALLU Alex – Université de Bordeaux
BEAREE Richard – ENSAM Lille
BELLENGER Emmanuel – Université de Picardie Jules Verne
BERNARD Alain – Centrale Nantes
BONJOUR Éric – Université de Lorraine
BOUJUT Jean-François – Grenoble INP
BOURAS Abdelaziz – Qatar University
BRIAND Cyril – INSA Toulouse
BRISSAUD Daniel – Grenoble INP
CAMPOCASSO Sébastien – Université de Toulon
CARDIN Olivier – Université de Nantes
CASTAGNA Pierre – Université de Nantes
CHANAL Hélène – Université de Clermont-Ferrand
CHEUTET Vincent – INSA Lyon
DAIDIE Alain – INSA Toulouse
DEMOLY Frédéric – Université de Technologie Belfort-Montbéliard
DERIGENT William – Université de Lorraine
DUC Emmanuel – Université de Clermont-Ferrand
EYNARD Benoit – Université de Technologie de Compiègne
FISCHER Xavier – ESTIA Bidart
FREIN Yannick – Grenoble INP
FURET Benoit – Université de Nantes
GARDAN Nicolas – AF MICADO
GERMAIN Guenaël – ENSAM Angers
GRABOT Bernard – ENI de Tarbes
GRUESCU Ion Cosmin – IUT de Lille
HOMRI Lazhar – ENSAM Metz
HOUSSIN Rény – Université de Strasbourg
LAMOURI Samir – ENSAM Paris
LAROCHE Florent – Centrale Nantes
LE CARDINAL Julie – Centrale Supelec
LE DUIGOU Julien – Université de Technologie de Compiègne
LE LOCH Sébastien – Université de Nantes
LEGARDEUR Jérémy – ESTIA Bidart
LEVRAT Eric – Université de Lorraine
LOMBARD Muriel – Université de Lorraine
MERZOUKI Rochdi – Polytech'Lille
MILLET Dominique – Université de Toulon
NOEL Frédéric – Grenoble INP

PAILHES Jérôme – ENSAM Bordeaux
PERRY Nicolas – ENSAM Bordeaux
RAYNAUD Stéphane – INSA Lyon
REYES Tatiana – Université de Technologie Troyes
RIERA Bernard – Université de Reims Champagne-Ardenne
ROBIN Vincent – Université de Bordeaux
ROSE Bertrand – Université de Strasbourg
ROUCOULES Lionel – ENSAM Aix-en-Provence
SALLEZ Yves – INSA Hauts-de-France
TEISSANDIER Denis – Université de Bordeaux
TOLLENAERE Michel – Grenoble INP
TRENTESAUX Damien – INSA Hauts-de-France
TROUSSIER Nadège – Université de Technologie de Troyes
VILLENEUVE François – Grenoble INP
YANNOU Bernard – Centrale Supelec
ZAMAI Eric – INSA Lyon
ZOLGHARDI Marc – SupMéca

Comité d'organisation

Co-présidents

Jean-Dominique GUERIN – INSA Hauts-de-France
Annick MANY – Université Polytechnique Hauts-de-France

Membres

BAUDEZ Jean-Christophe – IMT Lille Douai
BERGER Thierry – INSA Hauts-de-France
BRUNEL Jean-François – Polytech'Lille
CAUFFRIEZ Laurent – INSA Hauts-de-France
CAULIER Patrice – INSA Hauts-de-France
MERZOUKI Rochdi – Polytech'Lille
QUAEGEBEUR Philippe – Centrale Lille
VANDERHAEGEN Frédéric – INSA Hauts-de-France

Partenaires sponsors











Partenaires institutionnels















