

CIGI QUALITA MOSIM 2023

Perspectives sur l'utilisation du jumeau numérique pour améliorer la gestion de l'outillage dans un atelier manufacturier

CHLOE SAMUEL¹, PASCAL FORGET¹, JEAN-FRANÇOIS AUDY¹, MARC-ANDRE GAUDREAU¹, YAN BOURGEOIS²,
MICHELE DUPUIS²

¹ UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

3351 boul. des Forges, Trois-Rivières, Canada, G9A 5H7

chloe.samuel@uqtr.ca; pascal.forget@uqtr.ca; jean-francois.audy@uqtr.ca; marc-andre.gaudreau@uqtr.ca

² CÉGEP DE DRUMMONDVILLE

960 rue Saint-Georges, Drummondville, Canada, J2C 6A2

Yan.Bourgeois@cegepdrummond.ca; michele.dupuis@cegepdrummond.ca

Résumé - L'augmentation de la diversité des produits engendre un besoin de gestion accru pour l'outillage utilisé dans les processus. Le déploiement actuel de l'Industrie 4.0 dans les entreprises permet l'introduction de plusieurs technologies, mais un manque de connaissance ralentit ce déploiement. L'objectif de cet article est d'évoquer l'utilisation du jumeau numérique à des fins d'amélioration de la gestion d'outillage. Une revue de littérature sur la gestion d'outillage, les technologies au service de la gestion d'outillage, le jumeau numérique ainsi que l'utilisation du jumeau numérique à des fins de gestion d'outillage est présentée. La troisième section présente un cas d'application dans une usine-laboratoire. Finalement, les travaux à venir pour le cas présenté sont énoncés.

Abstract – The increase in product diversity creates a greater need for management of the tooling used in the processes. The current deployment of Industry 4.0 in manufacturing companies allows the introduction of several technologies, but a lack of knowledge slows down this deployment. The objective of this article is to discuss the use of a digital twin to improve tooling management. A literature review is presented on tooling management, technologies for tooling management, digital twins and the use of a digital twin for tooling management. The third part presents an application case in a factory-laboratory. Finally, the future work for the presented case is stated.

Mots clés – Jumeau numérique, gestion d'outillage, gestion des salles d'outil, atelier

Keywords – Digital twin, machine tool management, tool room management, Job shop.

1 INTRODUCTION

Les caractéristiques de la demande des différents marchés ont évolué dans les dernières années. Ainsi, une plus grande personnalisation est demandée, mais avec un rythme de production plus élevé. Ce phénomène augmente grandement la diversité des produits et, par le fait même, augmente la complexité des processus [Schaupp et al., 2017]. De ce fait, on constate une augmentation de changement d'outils à travers les différents processus [Schaupp et al., 2017]. Une gestion optimale de l'outillage, entre autres par une meilleure gestion des emplacements des outils, des déplacements et des inspections lors des retours, devient un atout pour répondre aux exigences d'efficience.

Une quatrième révolution industrielle, ou Industrie 4.0, est en cours de déploiement dans l'industrie manufacturière. Cette révolution industrielle met l'accent sur l'autonomisation et la numérisation de certaines tâches et de certains environnements de production, mais permet également l'échange de données entre le réel et le numérique par l'utilisation des systèmes cyberphysiques [Lee et al., 2018]. Pour tirer avantage de ces nouvelles possibilités, plusieurs technologies issues des révolutions industrielles précédentes peuvent être réutilisées ou

adaptées, mais de nouvelles technologies émergentes de cette nouvelle ère technologique peuvent aussi être mises de l'avant.

Certaines de ces technologies émergentes reposent sur l'exploitation des données en temps réel. Le jumeau numérique fait partie de ces technologies et est de plus en plus étudié dans le domaine manufacturier [Son et al., 2021]. Il s'agit également d'une technologie prometteuse qui aide à la transition numérique de plusieurs industries [Singh et al., 2022]. Cependant, la nécessité d'utiliser des technologies complémentaires avec un jumeau numérique peut rendre son application et son intégration plus complexe et coûteuse. De plus, la majorité des entreprises manufacturières ont, en pratique, très peu de connaissance sur les technologies et outils sous-jacents aux jumeaux numériques [Aheleroff et al. 2021].

L'objectif de cet article est d'aborder l'utilisation du jumeau numérique comme moyen d'améliorer la gestion de l'outillage. Pour y arriver, la seconde section présente une revue de littérature sur la gestion de l'outillage, la mise en place et l'utilisation de la technologie du jumeau numérique et également l'utilisation du jumeau numérique dans un contexte de gestion des outils. La troisième section présente le contexte manufacturier devant ultérieurement supporter une démonstration empirique d'utilisation d'un jumeau numérique dédié à la gestion de l'outillage, alors que la quatrième section

expose les principales étapes prévues à cet égard. La cinquième section permet de conclure cet article.

2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Gestion de l'outillage

Denkena et al. (2014) identifient l'objectif principal de la gestion de l'outillage comme un système qui exploite au maximum la performance des outils, qui optimise la sélection des outils, qui réduit les temps d'inactivité causés par un manque d'outil et qui intègre la gestion de la logistique d'utilisation et de l'approvisionnement d'outils.

La gestion de l'outillage est souvent négligée par les entreprises, mais cet aspect devrait être considéré de plus en plus, puisque les outils représentent le tiers des coûts de production [Schaupp et al., 2017]. Dans un contexte de production de type atelier avec des petits lots, Denkena et al. (2014) indiquent que les coûts de production peuvent représenter jusqu'à 40% pour tout ce qui entoure la gestion de l'outillage. De plus, les bris d'outils, pendant leur utilisation, engendrent 20% des arrêts de production, ce qui résulte à une perte de productivité énorme pour les employés et ainsi le système complet [Xie et al., 2021]. Shaupp et al. (2017) indiquent qu'il y a de grandes opportunités d'amélioration en matière de gestion des outils, surtout dans le contexte de l'Industrie 4.0. Bosch et Metternich (2018) expliquent que l'un des aspects qui complexifient grandement la gestion d'outillage est la faible disponibilité des outils. Ces derniers ont recensé les principales causes qui mènent à ce faible taux de disponibilité des outils et l'une des causes est le manque de gestion des données par rapport à l'outillage. En effet, l'absence de traitement de données, le manque de suivi sur les outils et l'écart existant entre le nombre d'outils réels possédés et le nombre d'outils ciblés sont des causes racines qui permettent d'expliquer le faible taux de disponibilité des outils [Bosch et Metternich, 2018].

Shaupp et al. (2017) mentionnent que la gestion d'outillage nécessite trois étapes d'implantation clé, soit (i) établir les objectifs, (ii) identifier les leviers et (iii) analyser les écarts à remplir, afin de procéder à une bonne utilisation de ce concept dans l'industrie.

Ces auteurs indiquent que la première étape est d'établir les objectifs attendus avec l'implantation d'une gestion d'outillage où trois objectifs sont récurrents dans l'industrie, soit d'avoir un taux élevé de disponibilité des outils et d'utilisation des outils ainsi que de conserver un bas inventaire d'outils. D'abord, avec une haute disponibilité des outils, les chances sont meilleures de les obtenir lorsque qu'un.e employé.e veut les utiliser. Afin de répondre à cet objectif, l'un des premiers aspects à améliorer est le magasin dans lequel les opérateurs vont chercher leurs outils. En effet, les opérateurs qui ont besoin d'outil peuvent perdre jusqu'à 20% de leur temps seulement à chercher un outil. Par la suite, le taux élevé d'utilisation permet d'assurer qu'aucun outil n'est acheté en trop. Il n'est pas rare de voir un trop grand nombre d'outils conservés en inventaire ou simplement de n'avoir aucun contrôle sur le nombre d'outils possédés. De plus, il arrive fréquemment que les entreprises ne connaissent pas la quantité optimale d'outils à garder en inventaire. Dans un même ordre d'idée que le deuxième objectif, avoir un bas inventaire permet d'éviter d'immobiliser de l'argent en outils non utilisés. D'autres objectifs peuvent être établis selon les besoins spécifiques de chaque entreprise. L'un des principaux défis auxquels les objectifs doivent répondre est de trouver le bon nombre d'outils à avoir en inventaire afin de répondre à la demande pour l'utilisation des machines.

Les mêmes auteurs mentionnent la deuxième étape telle que l'implantation d'une gestion d'outillage est d'identifier les leviers qui permettront d'améliorer cette gestion. Utiliser les technologies de suivi issues de l'Industrie 4.0 pour gérer les outils est une option qui peut grandement aider à optimiser les objectifs énumérés ci-haut.

Finalement, la troisième étape pour réussir l'implantation d'une gestion d'outillage est d'analyser les écarts à remplir. Ils expliquent que les entreprises doivent identifier comment exploiter le potentiel de la numérisation après avoir précédemment décidé de l'utiliser. De leur côté, Denkena et al. (2014) mentionnent que pour maximiser l'utilisation et la performance des outils, il est nécessaire de faire l'acquisition de données plus précises sur le plancher de production concernant le taux d'utilisation et la condition des outils. Actuellement, le manque d'information sur les outils provenant du plancher de production résulte au changement hâtif des outils plutôt que de les utiliser jusqu'à la fin de leur cycle de vie [Denkena et al., 2014].

Xie et al. (2021) mentionnent que toutes les étapes du cycle de vie d'un outil peuvent être analysées et optimisées, que ce soit à partir de l'étude du marché jusqu'à l'utilisation par le consommateur. Ces derniers indiquent qu'une grande quantité d'information peut être amassée pendant tout le processus de conception d'un outil afin d'optimiser le service offert lors de l'utilisation. Pour ce faire, des données doivent être recueillies pendant l'usage de l'outil tel que les données liées aux défaillances et les données liées à la maintenance. Xie et al. (2021) précisent qu'avec toutes ces données, il est possible de prédire la durée de vie d'un outil, mais il est également possible de prévenir de possibles défaillances ou bris sur l'équipement. La possibilité de contrôler ou prédire la vie utile des outils et la capacité de faire l'acquisition de cette grande quantité de données peuvent jouer un rôle important dans la flexibilité, l'efficacité et l'exactitude des entreprises [Xie et al., 2021].

L'utilisation des nouvelles technologies est très répandue sur les produits eux-mêmes (*smart product*) ou sur les processus complets (*smart logistics*), mais encore très peu d'entreprises utilisent les technologies numériques pour une meilleure gestion des outils [Shaupp et al., 2017]. Selon les mêmes auteurs, l'utilisation des technologies de traçabilité sur les outils peut jouer un rôle considérable dans l'optimisation de la gestion de l'outillage et ainsi répondre aux objectifs énoncés précédemment.

Dans un domaine connexe, Armenzoni (2015) identifie trois éléments de bases afin d'établir une bonne gestion des pièces de rechange dans une entreprise. Le premier élément de base à considérer est une modélisation de la demande permettant de prendre de meilleure décision par rapport aux entrées/sorties du matériel, mais également sur l'approvisionnement. Le deuxième élément de base est une classification des pièces ainsi que le niveau de criticité de chaque pièce. Cette étape permet d'identifier clairement quelles pièces doivent être gérées avec une attention particulière. La classification permet également une meilleure identification des pièces. Le troisième et dernier élément à prendre en compte est le développement d'un stock de contrôle et aider à la prévision de la demande. Ainsi, il est possible de mieux contrôler les risques de rupture de stock et d'établir une certaine tendance d'approvisionnement [Armenzoni., 2015]. Bien que ces éléments de base soient d'abord établis pour les pièces de rechange, ceux-ci peuvent s'appliquer à une gestion d'outillage. En effet, le premier élément permet d'établir une courbe d'utilisation des outils en considérant les entrées/sorties de ceux-ci au magasin. Le deuxième élément permet de faire une identification primaire

des outils et les placer selon leur catégorie par rapport à la classification utilisée. De plus, le niveau de criticité permet d'assurer un meilleur suivi et un meilleur contrôle sur ceux-ci. Le dernier élément permet d'avoir toujours le nombre requis d'outil en inventaire afin de répondre à la demande [Armenzoni, 2015].

2.2 Technologies à l'usage de la gestion d'outillage

En lien avec l'augmentation du nombre d'outils nécessaires pour répondre à la demande de personnalisation, certaines options technologiques peuvent être explorées afin d'améliorer la gestion de l'outillage en industrie.

L'identification par radiofréquences (*radio-frequency identification*, RFID) est l'une des technologies utilisées dans la gestion d'outillage. Denkena et al. (2014) indiquent que l'un des défis à surmonter dans une production de type atelier (*job shop*) est la flexibilité de production qui entraîne une utilisation très variée des outils. De ce fait, l'état des outils à travers le temps varie également [Denkena et al., 2014]. Les mêmes auteurs indiquent que l'utilisation de la technologie RFID permet de contrer cette problématique puisqu'elle permet de conserver une structure de données cohérentes relatives au système décentralisé tel que toutes les données inhérentes à l'utilisation des outils [Denkena et al., 2014]. Chen et al. (2022) indiquent que plusieurs entreprises utilisent la technologie RFID afin de réduire les coûts de gestion des outils et instruments ainsi que les coûts liés aux bris des mêmes équipements. La RFID est très utilisée en gestion d'entrepôt puisque cela permet une bonne traçabilité et identification d'objet spécifique [Lee et al., 2017]. Brenner et al. (2017) utilisent la RFID uniquement pour l'identification individuelle de chaque outil afin de pouvoir les retracer par un numéro unique.

Dans un même ordre d'idée, Lee et al. (2017) présentent l'internet des objets (Internet of Things, IoT) comme l'une des technologies qui permet de pallier les problématiques vécues en gestion d'entrepôt et gestion d'outillage, tels que l'exactitude de l'inventaire, l'utilisation de l'espace et l'optimisation du ramassage des objets. L'IoT améliore la visibilité et l'acquisition de données en temps réel et facilite le développement d'un système automatisé [Lee et al., 2017]. De leur côté, Shicong et al. (2022) utilisent l'IoT afin de mettre en place un système de suivi et de gestion des outils par l'acquisition de données précises en temps réel.

L'intelligence artificielle (AI) est également une technologie qui commence à être adoptée pour améliorer la gestion des outils dans les entreprises. Denkena et al. (2014) indiquent d'autres problématiques en gestion d'outillage dont celle d'ignorer l'état ou la fin de vie des outils. Ainsi, l'intelligence artificielle permet d'établir des prédictions fiables par rapport à l'état des outils ainsi que sur la durée de vie d'un outil par rapport à son utilisation puisque cette technologie permet d'établir différents liens entre les données acquises. Cette technologie permet également de contrôler l'usure de chaque outil [Balazinski et al. 2002]. Ce principe permet de prévenir la pénurie d'outils due à un bris.

Finalement, le jumeau numérique permet aussi de faire un suivi en temps réel de l'emplacement des objets, comme par exemple des outils, lorsqu'il est lié à des technologies de type RFID ou Internet des objets [Julien et Martin, 2020]. Il devient ainsi une alternative pour améliorer la gestion de l'outillage, en ajoutant une possibilité de simuler des scénarios futurs en se basant sur des données en temps réel de positionnement et de nombre d'outils disponibles. C'est précisément cette technologie qui est décrite plus en détail dans les sous-sections suivantes.

2.3 Jumeau numérique

Au cours des dernières années, la recherche scientifique en lien avec la technologie du jumeau numérique a augmenté de façon exponentielle. Onaji et al. (2022) ont recensé 22 définitions différentes émises entre 2010 et 2019. Bien qu'elles soient toutes différentes, un aspect principal est toujours récurrent, soit la connexion entre le monde physique et le monde virtuel.

À partir de ces définitions, il devient possible d'identifier des éléments de base pour arriver à un jumeau numérique. D'abord, Son et al. (2021) proposent que les éléments de bases soient d'avoir (1) un espace physique contenant des objets physiques, (2) un espace virtuel contenant des objets virtuels et (3) un lien pour les données et l'information pour passer de l'espace physique jusqu'à l'espace virtuel afin de synchroniser les deux milieux par l'échange de données. D'un autre côté, Onaji et al. (2022) listent les éléments de base comme (1) la réflexion en temps réel, (2) l'interaction et la convergence dans l'espace physique, (3) l'interaction et convergence entre les données historiques et les données en temps réel, (4) l'interaction et la convergence entre l'espace physique et l'espace virtuel, et (5) observer une auto évolution de la part de la technologie. De leur côté, Hribernik et al. (2021) listent les éléments de base de l'intégration d'un jumeau numérique de façon à avoir une adaptabilité, posséder une sensibilisation au contexte dans lequel il œuvre et d'avoir une autonomie.

Le jumeau numérique peut se trouver en différente forme selon l'application qui est désirée. Celui-ci peut être utilisé pour effectuer la simulation de scénario seulement. L'ajout d'un volet d'analyse de données en temps réel mène à une nouvelle forme possible de cette technologie. Pour aller encore plus loin, une autre forme permet d'ajouter une aide à la décision, ce qui ajoute un état prédictif au jumeau numérique et permet d'optimiser l'efficacité du milieu. Toutes ces formes peuvent également se traduire en maturité de la technologie [Julien et Martin., 2020]. Selon ces auteurs, les deux premières forment sont le modèle numérique et l'ombre numérique. Ces deux formes sont principalement dédiées au contrôle et à la supervision de l'entité physique. La troisième forme suggérée, selon les mêmes auteurs, est celle du jumeau numérique, où un volet prédictif est ajouté aux deux premières formes. Ainsi, cette troisième forme permet la simulation de scénario, mais également la prédiction de comportement et d'événement de l'entité physique. La quatrième forme proposée par les auteurs est le jumeau cognitif. Celui-ci nécessite l'utilisation de l'intelligence artificielle afin d'ajouter un volet prescriptif. Avec l'intelligence artificielle, cette forme peut apprendre selon les données et ainsi offrir une aide à la décision aux utilisateurs. Finalement, la cinquième forme proposée est le jumeau autonome qui fonctionne seul en prenant et appliquant ses propres décisions.

À moins de se trouver dans l'une des deux premières formes présentées précédemment, le jumeau numérique doit être jumelé à une autre technologie afin d'être opérationnel. Ainsi, plusieurs technologies sont complémentaires à l'utilisation des trois dernières formes du jumeau numérique présentées ci-haut. Le jumeau numérique permet principalement la simulation de scénario et l'analyse de données, mais des technologies sont nécessaires pour effectuer la captation, le stockage et l'apprentissage de ces données.

Xie et al. (2021) ainsi que Julien et Martin (2020) indiquent que l'Internet des objets est l'une des technologies qui permet au jumeau numérique de se connecter et d'interagir avec l'entité physique auquel il est lié. L'utilisation des puces RFID est une technologie de captation intéressante à jumeler avec un jumeau numérique pour le volet traçabilité d'objets [Ma et al., 2022].

De plus, des recherches ont été effectuées dans plusieurs domaines d'application différents. Singh et al. (2022) présentent le potentiel de cette technologie dans 13 secteurs d'application différents, dont la construction, le manufacturier, les mines et la santé. De leur côté, Onaji et al. (2022) se concentrent uniquement sur l'application du jumeau numérique dans le manufacturier, mais celui-ci divisé en trois sous-domaines d'application. Ces domaines sont le produit, le système et le plancher de production (*system-of-system*, SoS). D'autres auteurs indiquent des champs d'application plus précis à des situations telles que la construction d'une usine, l'optimisation d'une ligne de production, la formation d'un opérateur, organiser un chantier et effectuer la maintenance d'un équipement [Julien et Martin., 2020].

2.4 Jumeau numérique pour la gestion d'outillage

Selon Xie et al. (2021), pour réaliser un jumeau numérique, de nombreuses données sont requises, notamment les dimensions physiques, les informations de fabrication, les données opérationnelles ainsi que les informations de déplacement. De plus, les mêmes auteurs indiquent un meilleur contrôle du procédé grâce à la grande quantité de données collectées, mais également grâce à l'utilisation de l'historique de données. Avec les données en temps réel, il est possible d'observer une meilleure régulation et un meilleur contrôle sur les outils [Xie et al., 2021].

L'allocation de ressources permet de représenter un schéma où un outil est alloué à une machine pour une période déterminée ou indéterminée, tel qu'on peut assigner un employé à un poste de travail [Chuang et al., 2021]. Les auteurs étudient l'utilisation de différentes technologies émergentes avec le jumeau numérique à différents niveaux du système de production afin d'assigner les bonnes tâches aux bonnes machines. Ces mêmes auteurs utilisent le principe d'allocation de ressources pour allouer les bonnes tâches aux bonnes machines afin d'optimiser la production d'un atelier. D'abord, ils mentionnent qu'il y a trois niveaux à considérer, soit le produit, le processus de fabrication ainsi que le processus d'acquisition de données. L'utilisation des technologies émergentes pour ces trois niveaux permet une meilleure intégration du jumeau numérique. Toujours selon les auteurs, l'intégration d'un jumeau numérique dans un atelier favorise l'implantation au niveau du processus, au niveau opérationnel et au niveau de l'acquisition de données. Niveau processus cette technologie permet d'acquérir l'information relative à la machine à laquelle se trouve le produit ainsi que la machine suivante dans un contexte d'allocation de ressource. De plus, les produits et les machines peuvent enregistrer leur statut et le partager avec les autres objets connectés. Niveau opérationnel, le jumeau numérique permet la connexion entre le processus (produit, machine) et les autres activités telles que l'entreposage et les employés. Finalement, le jumeau numérique permet l'acquisition de données en grande quantité par l'utilisation de l'internet des objets. Plusieurs données peuvent être prises en double, ne pas être de bonne qualité ou manquer d'intégrité. Ainsi, le jumeau numérique peut permettre un certain contrôle afin de capter les informations nécessaires seulement [Chuang et al., 2021].

La revue de littérature permet de constater que seuls deux articles mentionnent l'utilisation d'un jumeau numérique pour réaliser spécifiquement de la gestion d'outillage pour des outils de coupe. Cependant, au terme de cette revue de littérature, aucun cas relate l'implantation d'un jumeau numérique dans un atelier (*job shop*) à des fins d'amélioration pour la gestion d'outillage.

3 CAS D'APPLICATION

L'usine-laboratoire du CNIMI (Centre National Intégré du Manufacturier Intelligent) est gérée par l'Université du Québec à Trois-Rivières et le Cégep de Drummondville. Par l'entremise d'experts en génie et en gestion, ce site devient un lieu privilégié d'enseignement, de recherche et de transfert en lien avec les technologies numériques dans un contexte manufacturier. En effet, plusieurs projets de recherche réalisés permettent d'intégrer de nouvelles technologies utilisées ou en voie d'utilisation dans l'industrie manufacturière. Pour rendre l'environnement de l'usine pédagogique le plus réel possible, environ 80 équipements de production installés permettent de réaliser des activités de production similaires à une usine de type atelier (*job shop*). Quotidiennement, des étudiants de niveau collégial et universitaire utilisent les équipements de production dans le cadre de leur formation.

Le cas d'application proposé est l'implantation d'un jumeau numérique pour améliorer la gestion d'outillage dans l'usine-laboratoire. On peut diviser le processus en cinq étapes, soit la prévision de la demande des outils, l'entreposage des outils au magasin, la sortie des outils du magasin, l'utilisation des outils et le retour des outils au magasin.

Le processus de gestion d'outillage de l'usine-laboratoire, présenté à la figure 1, débute par la prévision de la demande, en se basant principalement sur les réservations pour des cours ou des séances de travail et l'inventaire d'outil disponible. Lors de ces réservations, des données telles que les machines utilisées et les opérations effectuées permettront une meilleure prévision de la demande d'outillage. La deuxième étape de la gestion d'outillage se déroule au magasin où sont entreposés tous les outils nécessaires à l'utilisation des différentes machines. À cet endroit, les utilisateurs d'équipement sélectionnent tous les outils dont ils ont besoin pour réaliser leurs tâches. De ce fait, une gestion doit être mise en place dans le magasin afin de connaître quels outils sont disponibles à quel moment, mais également pour s'assurer qu'une quantité suffisante d'outils est disponible pour tous ceux qui en ont besoin. De plus, une bonne gestion d'outillage permet de réduire le temps de recherche pour trouver le bon outil. La troisième étape est la sortie des outils du magasin. Un certain contrôle doit être effectué à ce moment afin d'identifier l'outil qui sort du magasin ainsi que la personne qui l'emprunte. La quatrième étape du processus est l'utilisation des outils sur les machines. Lorsque les outils sortent du magasin, il est difficile de connaître exactement à quel endroit ils se trouvent et combien de temps ils seront utilisés. Le même outil peut être transféré à un autre équipement de production sans revenir nécessairement au magasin. De plus, des prêts entre les utilisateurs peuvent être des scénarios possibles. La cinquième et dernière étape du processus de gestion de l'outillage est le retour au magasin ainsi que l'inspection. Lors du retour des outils au magasin, une inspection doit être effectuée afin d'identifier s'il y a présence d'un bris ainsi qu'établir le niveau d'usure pour prévoir la maintenance de celui-ci. De ce fait, une vérification de chaque outil doit être réalisée avant de le retourner à son endroit habituel dans le magasin. Une gestion doit être établie afin de traiter les outils à retirer du processus normal afin de les envoyer en réparation ou en maintenance.

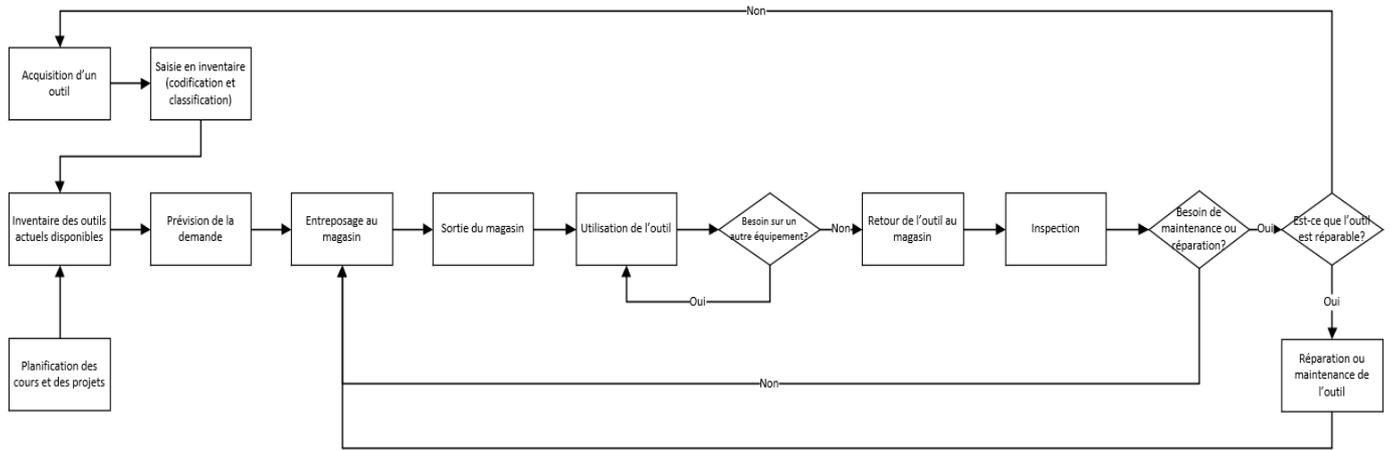


Figure 1 : Processus de gestion de l'outillage du CNIMI

D'un côté, l'implantation d'une gestion d'outillage efficace nécessite un suivi serré en temps réel des outils. De plus, il est nécessaire de compter sur des prévisions d'utilisation afin d'assurer une quantité d'outils suffisante pour les besoins des utilisateurs. D'un autre côté, le jumeau numérique permet de faire l'acquisition de données en temps réel par l'utilisation de technologies complémentaires (comme l'IoT). Aussi, le jumeau numérique permet l'acquisition, l'analyse et la génération de scénario possible en fonction de données en temps réel ou par rapport aux données historiques. Cette technologie permet, également, d'intégrer des technologies de traçabilité. Ce cas d'application permet de tester l'utilisation du jumeau numérique dans le cas de la gestion d'outillage dans le processus complet de l'utilisation des outils dans un milieu manufacturier de type atelier. L'usine-laboratoire du CNIMI devient un milieu intéressant pour développer un jumeau numérique permettant de tester une approche de conception et d'en évaluer les impacts au niveau de la gestion de l'outillage.

4 TRAVAUX FUTURS

Plusieurs travaux seront réalisés afin de répondre à l'objectif principal de ce projet de recherche, soit le développement d'une approche de simulation connectée de type jumeau numérique pour la gestion d'outillage dans un contexte d'aménagement de type atelier (*job shop*) de PME manufacturière 4.0. Les travaux prévus visent à combler une lacune liée à l'utilisation du jumeau numérique pour la gestion d'outillage dans le contexte d'un atelier manufacturier.

La première étape est de mettre en place un processus de collecte de données afin de pouvoir créer un historique de l'utilisation de l'outillage. Pour assurer une acquisition de données de qualité, il est important de connaître les groupes d'outils utilisés dans le magasin. De ce fait, il sera également possible d'établir un niveau de criticité pour chaque groupe d'outils, ce qui permettra d'identifier ceux qui nécessitent une plus grande attention pour le choix de données puisqu'ils peuvent avoir un impact plus important sur le système. Ce niveau de criticité devra être établi selon des critères préétablis tels que le taux d'utilisation, la valeur et la qualité. Le taux d'utilisation est un critère pertinent puisqu'il n'est pas souhaitable d'avoir une rupture de stock sur un outil utilisé plusieurs fois par jour contrairement à un outil qui est rarement utilisé. La valeur de l'outil est également un critère à considérer puisqu'il est désiré d'avoir un meilleur contrôle sur les outils plus dispendieux afin d'éviter d'en acheter pour rien. La qualité, de son côté, est pertinente afin d'avoir une gestion efficace de la maintenance et du niveau de bris des outils ce qui permet

d'éviter le manque d'outil disponible en inventaire. Également, cette information devient un bon indicateur pour déterminer la quantité d'outils de surplus à conserver dans le magasin. Bien entendu, plusieurs autres critères peuvent être explorés afin d'identifier ceux qui peuvent s'appliquer au contexte étudié. À l'aide de la revue de littérature, il sera possible d'identifier les variables communes à l'intégration d'un jumeau numérique. Ainsi, par ces variables, il sera possible d'identifier des données essentielles à récolter pour alimenter le système. Étant donné l'absence d'un historique de données, cette collecte de données sera effectuée manuellement directement dans les locaux du CNIMI.

La deuxième étape à réaliser est de développer un modèle de simulation du milieu étudié, soit l'usine-laboratoire du CNIMI. Cette simulation sera effectuée sur un sous-ensemble d'équipements parmi les 80 équipements disponibles. Cependant, les équipements seront sélectionnés afin de représenter le plus possible toutes les activités de l'usine-laboratoire. Ce modèle permettra de valider la collecte de données en observant si le système se comporte de la même façon dans la simulation que sur le plancher de l'usine-laboratoire. La simulation sera également utilisée pour améliorer la gestion d'outillage. Celle-ci identifiera les trajets empruntés par les outils, les équipements qui utilisent quels types d'outils ainsi que le temps avant qu'un outil revienne au magasin. Ainsi, des tendances pourront être établies pour différents outils. Le développement d'un jumeau numérique de type prédictif a été évoqué dans la revue de littérature. En effet, cette forme de jumeau numérique permet d'utiliser les données acquises pour prévoir certains comportements du système par rapport à des scénario de simulation. La méthodologie de simulation utilisée dans le cadre de ce cas d'application permettra d'utiliser ce volet prédictif afin d'améliorer la gestion d'outillage. L'un des objectifs visés est de pouvoir prédire le manque d'outils dans le magasin pour satisfaire la demande ainsi que d'optimiser le prêt d'outils entre les utilisateurs de machine dans un contexte de rupture d'inventaire.

La troisième étape est de monter un plan d'expérience qui permettra de tester la relation entre différentes variables cibles. Comme présenté dans la revue de littérature, trois grands objectifs sont identifiés pour une bonne gestion d'outillage soit un haut taux de disponibilité, un bon taux d'utilisation et un petit inventaire. Avec l'identification des variables qui répondent à ces trois objectifs, il est possible de trouver la combinaison optimale, par l'utilisation d'un plan d'expérience, afin d'obtenir le meilleur rendement possible par le système de production. De ce fait, il sera possible de simuler ces différentes interactions, en

utilisant la variation des paramètres, afin d'observer le comportement que le système pourrait avoir. De ces variations, des réponses seront également calculées pour les différents scénarios. Ces réponses permettent de quantifier les variations des paramètres afin de faciliter la comparaison entre chaque scénario. Les résultats obtenus par ce plan d'expérience permettront d'identifier des paramètres optimaux à utiliser dans le cadre du cas d'application énoncé précédemment.

La quatrième étape est l'identification et le choix des technologies d'acquisition de données, notamment l'Internet des objets. En effet, pour arriver à l'obtention d'un jumeau numérique qui permettra l'aide à la décision dans un contexte de gestion d'outillage, un volet d'acquisition de données en temps réel doit être mis en place. Pour ce faire, il est primordial d'identifier plusieurs outils de captation de données et de les comparer pour réussir à extraire les données souhaitées. Des technologies telles que l'identification par puce RFID seront utilisées dans un contexte de traçabilité. Des capteurs qui permettent d'identifier l'usure d'un l'outil est également une solution plausible afin d'assurer une maintenance adéquate et d'identifier à quel moment retirer l'outil du magasin. Les données établies lors de la première étape joueront un rôle majeur dans l'identification des bonnes technologies de captation à comparer.

Finalement, comme cinquième étape, l'élaboration d'une méthodologie d'implantation ainsi que le développement d'un jumeau numérique seront effectués. En plus de l'Internet des objets, plusieurs autres technologies telles que l'intelligence artificielle et l'analyse des données massives (*big data*), peuvent être utilisées avec le jumeau numérique. Une étude pourra être réalisée afin d'identifier si celles-ci peuvent être pertinentes en fonction de l'objectif établi, mais également en tenant compte du retour désiré par le jumeau. Étant donné qu'un aspect d'aide à la décision est souhaité pour la gestion d'outillage, l'utilisation de l'intelligence artificielle devra être explorée.

5 CONCLUSION

Cet article a d'abord permis d'établir ce qu'était la gestion d'outillage ainsi que les objectifs ciblés lors de la mise en place d'un système d'optimisation pour les outils. Sans que le coût ne soit réellement calculé par les entreprises, un temps énorme est perdu à la recherche d'outil attribuable à une mauvaise gestion de ceux-ci. Le jumeau numérique est quant à lui identifié comme une technologie avec un large éventail de possibilité pouvant aider à répondre à cette problématique. En effet, celui-ci peut être utilisé à plusieurs niveaux, soit simplement pour superviser et contrôler un système jusqu'à avoir le contrôle complètement de celui-ci en prenant et appliquant ses propres décisions. Cette technologie présente également un large éventail d'applications possibles et peut être utilisée à différents niveaux de l'industrie manufacturière tels que pour un produit, une ligne de production ou une usine complète. La traçabilité en temps réel est l'une des caractéristiques du jumeau numérique et ce volet est très intéressant pour la gestion d'outillage. Cependant, le manque de connaissance indiqué en introduction a pu être observé lors de la revue de littérature puisqu'il est encore difficile de trouver des informations qui mettent en lien le jumeau numérique à des fins de gestion d'outillage.

Par la suite, un cas d'application est présenté avec l'usine-laboratoire du CNIMI, présentant un environnement de type atelier similaire à une PME manufacturière. Le processus complet, de la prise de possession d'un outil au magasin jusqu'à l'inspection lors de son retour, sera utilisé pour l'implantation de la gestion d'outillage. Plusieurs étapes seront réalisées, dont effecteur le processus de collecte de données, développer un

modèle de simulation représentatif, réaliser un plan d'expérience, identifier les technologies complémentaires à utiliser et élaborer une méthodologie d'implantation. Cependant, il est certain que ce type de contexte de production présente certaines limitations qu'il faut considérer pour cette étude. La première limitation est que le modèle d'affaire d'une usine-laboratoire est différent de celui d'une PME. En effet, l'objectif premier n'est pas de produire le plus possible, mais de favoriser un apprentissage par l'utilisation des lieux. De plus, dans un contexte d'usine-laboratoire les aléas sont moins nombreux et leurs impacts sont moins importants que dans une réelle usine. Une deuxième limitation existante est l'accès aux ressources. Dans le cadre de l'usine-laboratoire du CNIMI le nombre de ressources est plus grand que celui dans une PME puisque cette usine se trouve à l'intérieur d'une plus grande institution soit l'Université du Québec à Trois-Rivières. Ainsi, le CNIMI a accès aux ressources de l'UQTR tel que le service des technologies et de l'information. Finalement, une autre limitation est la résistance à l'utilisation de certaines technologies. Étant à l'intérieur d'une grande institution l'usine-laboratoire peut être limité dans les différentes technologies ou solutions qui peuvent être implantés contrairement aux PME manufacturières. Pour résumer, le contexte de l'usine-laboratoire est intéressant, mais il est important de considérer les limitations mentionnées précédemment dans le cadre d'un projet de recherche.

6 REFERENCES

- Aheleroff, S., Xu, X., Zhong, R. Y., & Lu, Y. (2021). Digital Twin as a Service (DTaaS) in Industry 4.0: An Architecture Reference Model. *Advanced Engineering Informatics*, 47, Article 101225. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101225>
- Armenzoni, M., Montanari, R., Vignali, G., Bottani, E., Ferretti, G., Solari, F., & Rinaldi, M. (2015). An integrated approach for demand forecasting and inventory management optimisation of spare parts. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 10(3), 223-240. <https://doi.org/10.1504/IJSPM.2015.071375>
- Bosch, E., Metternich, J. (2018). Understanding and assessing complexity in cutting tool management.
- Balazinski, M., Czogala, E., Jemielniak, K., & Leski, J. (2002). Tool condition monitoring using artificial intelligence methods. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 15(1), 73-80. [https://doi.org/10.1016/S0952-1976\(02\)00004-0](https://doi.org/10.1016/S0952-1976(02)00004-0)
- Chuang, W., Guanghui, Z., & Junsheng, W. (2021). Smart cyber-physical production system enabled workpiece production in digital twin job shop. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(9). <https://doi.org/10.1177/16878140211040888>
- Denkena, B., Krüger, M., & Schmidt, J. (2014). Condition-based tool management for small batch production. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74(1-4), 471-480. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6013-2>
- Eyring, A., Hoyt, N., Tenny, J., Domike, R., & Hovanski, Y. (2022). Analysis of a closed-loop digital twin using discrete event simulation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123(1-2), 245-258. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10176-5>
- Feng, Q., Maier, W., Stehle, T., & Möhring, H. C. (2022). Optimization of a clamping concept based on

- machine learning. *Production Engineering*, 16(1), 9-22. <https://doi.org/10.1007/s11740-021-01073-z>
- Gulewicz, M. (2022). DIGITAL TWIN TECHNOLOGY - AWARENESS, IMPLEMENTATION PROBLEMS AND BENEFITS. *Engineering Management in Production and Services*, 14(1), 63-77. <https://doi.org/10.2478/emj-2022-0006>
- Hribernik, K., Cabri, G., Mandreoli, F., & Mentzas, G. (2021). Autonomous, context-aware, adaptive Digital Twins—State of the art and roadmap. *Computers in Industry*, 133, Article 103508. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103508>
- JULIEN, Nathalie; MARTIN, Éric (2020). *Le jumeau numérique : De l'intelligence artificielle à l'industrie agile*. Malaoff : Dunod, 229 p.
- Leng, J., Liu, Q., Ye, S., Jing, J., Wang, Y., Zhang, C., Zhang, D., & Chen, X. (2020). Digital twin-driven rapid reconfiguration of the automated manufacturing system via an open architecture model. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 63, Article 101895. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101895>
- Lu, Y., Liu, C., Wang, K. I. K., Huang, H., & Xu, X. (2020). Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, Article 101837. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>
- Ma, S., Ding, W., Liu, Y., Ren, S., & Yang, H. (2022). Digital twin and big data-driven sustainable smart manufacturing based on information management systems for energy-intensive industries. *Applied Energy*, 326, Article 119986. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119986>
- Marksberry, P. W., & Jawahir, I. S. (2008). A comprehensive tool-wear/tool-life performance model in the evaluation of NDM (near dry machining) for sustainable manufacturing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(7-8), 878-886. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.11.006>
- Onaji, I., Tiwari, D., Soulatiantork, P., Song, B., & Tiwari, A. (2022). Digital twin in manufacturing: conceptual framework and case studies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 35(8), 831-858. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2027014>
- Peng, K., Huang, H., Bilal, M., & Xu, X. (2022). Distributed Incentives for Intelligent Offloading and Resource Allocation in Digital Twin Driven Smart Industry. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 1-11. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3184070>
- Ruppert, T., & Abonyi, J. (2020, 2020/12/01/). Integration of real-time locating systems into digital twins. *Journal of Industrial Information Integration*, 20, 100174. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100174>
- Schaupp, E., Abele, E., & Metternich, J. (2017). Potentials of Digitalization in Tool Management. *Procedia CIRP*.
- Singh, M., Srivastava, R., Fuenmayor, E., Kuts, V., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2022). Applications of Digital Twin across Industries: A Review. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(11), Article 5727. <https://doi.org/10.3390/app12115727>
- Son, Y. H., Park, K. T., Lee, D., Jeon, S. W., & Do Noh, S. (2021). Digital twin-based cyber-physical system for automotive body production lines. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(1-2), 291-310. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07183-3>
- Thürer, M., & Stevenson, M. (2022). Order release, dispatching and resource assignment in multiple resource-constrained job shops: an assessment by simulation. *International Journal of Production Research*, 60(12), 3669-3681. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1930240>
- Xie, Y., Lian, K., Liu, Q., Zhang, C., & Liu, H. (2021). Digital twin for cutting tool: Modeling, application and service strategy. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 305-312. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.08.007>
- Zhao, Z., Zhang, M., Chen, J., Qu, T., & Huang, G. Q. (2022). Digital twin-enabled dynamic spatial-temporal knowledge graph for production logistics resource allocation. *Computers and Industrial Engineering*, 171, Article 108454. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108454>