

# CIGI QUALITA MOSIM 2023

## Le processus d'entreposage des PME manufacturières à l'ère de l'Industrie 4.0

SOUMAYA ZAKKARI<sup>1</sup>, PASCAL FORGET<sup>1</sup>, MARC-ANDRÉ GAUDREAU<sup>1</sup>, JEAN-FRANÇOIS AUDY<sup>1</sup> et MICHÈLE DUPUIS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES  
Département de génie industriel, 3351 boul. des Forges, Trois-Rivières (Québec), Canada

<sup>2</sup> CÉGEP DE DRUMMONDVILLE  
555 boul. de l'université, Drummondville (Québec), Canada

soumaya.zakkari@uqtr.ca; pascal.forget@uqtr.ca; marc-andre.gaudreau@uqtr.ca;  
jean-francois.audy@uqtr.ca; michele.dupuis@cegepdrummond.ca

---

**Résumé** – Avec l'avènement de l'Industrie 4.0, les systèmes de stockage automatisés sont devenus la base de la logistique des entrepôts des grandes entreprises. Cependant, les entrepôts des petites et moyennes entreprises (PME) tirent peu d'avantage des technologies issues de l'Industrie 4.0 dans leur processus d'entreposage. Cet article présente une revue de la littérature sur l'automatisation du processus d'entreposage pour les PME manufacturières. Tout d'abord, les étapes du processus d'entreposage sont définies avec le détail de leurs fonctions. Ensuite, le besoin d'automatisation de ce processus est défini et justifié, et les solutions concrètes d'automatisation des entrepôts sont présentées pour chaque étape du processus. Les critères de sélection des différentes solutions sont également évoqués.

**Abstract** – Automated storage systems have become the basis of warehouse logistics for large companies with the advent of Industry 4.0. However, the warehouses of small and medium-sized enterprises (SME) take little advantage of Industry 4.0 technologies in their warehousing process. This article presents a review of the literature on the automation of the warehousing process for SMEs. First, the stages of the warehousing process are defined as well as their functions. Then, the need for automating this process is defined and justified, and concrete warehouse automation solutions are presented for each step of the process. The criteria for selecting the different solutions are also mentioned.

**Mots clés** - PME, stockage automatisé, processus d'entreposage, Industrie 4.0

**Keywords** – SME, automated storage, warehouse processes, Industry 4.0

---

### 1 INTRODUCTION

L'industrie 4.0 fournit de nouveaux paradigmes pour la gestion des entreprises manufacturières. Ce constat est particulièrement ressenti au niveau des entrepôts, levier important de performance pour les entreprises, de toutes tailles et de tous secteurs. Plusieurs grandes entreprises font figure de pionniers et meneurs en recherche et développement dans l'intégration des technologies issues de l'Industrie 4.0 au sein des entrepôts automatisés, laissant loin derrière les petites et moyennes entreprises (PME) [Dekhne et al., 2019]. Les PME manquent généralement de ressources financières et de connaissances en technologies d'industrie 4.0, et s'appuient donc sur l'expérience pour gérer leurs entrepôts [Choy et al. 2014]. Ainsi, les entrepôts des PME ne tirent pas parti des avantages des technologies issues de l'Industrie 4.0 en raison de problèmes de compatibilité et d'inadéquation non résolus, en plus des coûts d'infrastructure élevés [Ud Din et al., 2021].

La littérature existante manque d'articles qui guident les PME vers une implantation modulable de technologies 4.0 dans leurs entrepôts. Ainsi, la contribution de cet article consiste en un modèle d'automatisation incrémentale de l'entreposage pour les PME. Les PME, n'ayant pas les

moyens d'investir dans une automatisation complète de leur processus d'entreposage, nécessitent des solutions adaptées à leurs besoins. Cette adaptation est possible en considérant des solutions partiellement automatisées. Le modèle définit donc chaque étape du processus pour mieux cerner les besoins spécifiques des PME.

Cet article vise à présenter une stratégie d'accompagnement des PME dans leur automatisation d'entrepôt. La section 2 présente une revue de littérature couvrant les fonctions d'un processus d'entreposage, ainsi que l'importance d'automatisation des étapes de ce processus. La section 3 décrit le modèle d'automatisation du processus d'entreposage pour les PME, recense les différentes solutions automatisées existantes dans la littérature, et finalement, définit les critères à suivre pour faire le choix entre les solutions proposées. La section 4 présente les prochaines étapes pour une implantation et une application réelle du modèle proposé dans l'usine-laboratoire en intelligence manufacturière du Centre National Intégré du Manufacturier Intelligent (CNIMI) à Drummondville (Canada).

## 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Cette section définit d'abord les fonctions d'un entrepôt, puis propose deux modèles issus de la littérature pour illustrer le processus d'entreposage. Les points forts de chaque modèle sont présentés. Et enfin, les perspectives d'automatisation de ce processus sont discutées.

### 2.1 Fonctions de l'entreposage

L'entreposage est généralement nécessaire quand les flux de matières entrants et sortants ne sont pas synchronisés dans le temps. Il sera alors défini comme étant une interruption planifiée du flux de matières [Schneider et al., 2008]. La zone où se déroule le stockage est le magasin, où les marchandises sont temporairement stockées, transportées et emballées. Selon Schneider et al., (2008), un magasin remplit cinq fonctions :

- le pontage : concerne la satisfaction des conditions temporelles ou spatiales de la chaîne logistique ;
- la sécurité : comble les planifications asynchrones (p. ex., les stocks de sécurité) ;
- la transformation : inclut le tri, le prélèvement et l'emballage des marchandises entrantes ;
- l'approvisionnement : est la satisfaction de la demande de marchandises dans la bonne quantité au bon moment et au bon coût ;
- le contrôle : concerne le contrôle des tâches en amont et en aval de la chaîne d'approvisionnement (p. ex., le transport des marchandises au/du magasin).

### 2.2 Processus de l'entreposage

En ce qui concerne le processus d'entreposage, plusieurs modèles ont été présentés dans la littérature. Les présentes sous-sections définissent deux modèles d'intérêt pour nos travaux.

#### 2.2.1 Modèle de Schneider

Le processus d'entreposage comporte une série d'étapes, à partir de la réception des marchandises, son utilisation puis expédition et, dans certains cas, la gestion des retours. Schneider et al. (2008) propose, comme présenté à la figure 1, une séparation du processus d'entreposage en 8 étapes [Kempe, N., 2013] :

- entrée de marchandises : les marchandises sont déchargées, déballées, contrôlées, triées et regroupées dans des unités de stockage ;
- distribution vers les zones de stockage : les unités de gestion de stock (SKU) sont transportées vers leurs zones de stockage appropriées (ce processus comprend l'allocation à une zone de stockage) ;
- admission en magasin : les SKU arrivent à leur destination finale (ce processus comprend la sélection de la méthode de transfert et son acheminement) ;
- gestion du magasin : concerne la surveillance et l'administration des données de stockage (p. ex., le taux de remplissage du magasin, les positions libres et pleines) et des données des SKU (p. ex., l'identifiant, la taille, le poids) ;
- relocalisation : le déplacement de SKU d'une zone de stockage à une autre dans le magasin ainsi que son contrôle ;
- récupération : comme le processus d'admission en

magasin, la récupération comprend le transfert des SKU identifiées (sortie du magasin) ainsi que les décisions sur le routage ;

- distribution de la zone sortante : la remise des SKU à la zone de sortie appropriée selon le mode de transport prévu de l'expédition ;
- sortie de marchandises : les SKU sont préparées pour la remise au client, après vérification des dommages, regroupement et emballage des SKU ainsi que la préparation des documents d'expédition. Et finalement, les SKU sont expédiées.

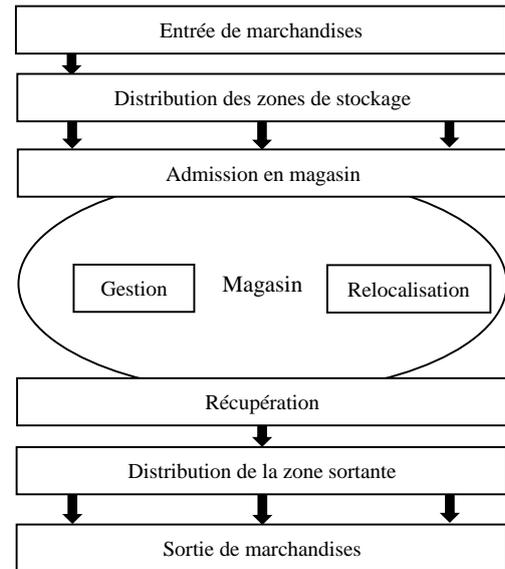


Figure 1. Modèle du processus d'entreposage (adaptée de [Schneider et al., 2008])

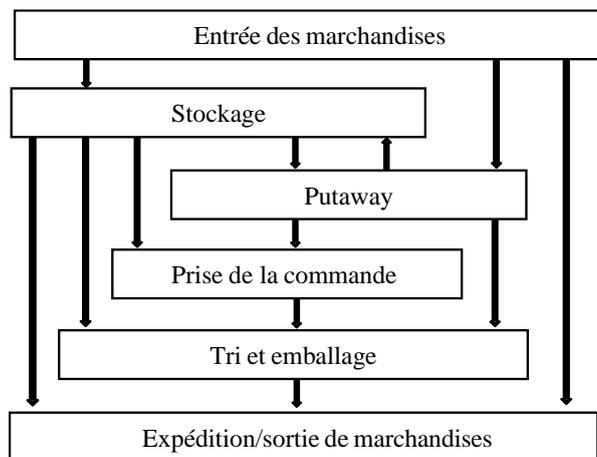
#### 2.2.2 Modèle de Ivanov

Ivanov et al. (2012) a défini le processus d'entreposage par les 6 étapes suivantes :

- arrivée et inspection des marchandises : les marchandises sont reçues et contrôlées. Dans le cas de correspondance ou transbordement direct (*cross-docking*), les commandes sont transférées automatiquement de la zone d'entrée vers celle de sortie sans stockage intermédiaire. Les retours sont également traités dans cette étape ;
- stockage : la stratégie de stockage est choisie (p. ex., stockage aléatoire, dédié, en grappe) ;
- rangement en stock (*putaway*) : traitement entre la réception des marchandises des fournisseurs et leur stockage dans les emplacements qui leur sont assignés (p. ex., stratégies FIFO et LIFO) ;
- prise de la commande : les marchandises sont transportées automatiquement à l'opérateur (*goods-to-person*) ou bien c'est l'opérateur qui se charge d'aller les chercher du magasin (*person-to-goods*) ;
- tri et d'emballage : préparation des marchandises pour l'expédition ;
- expédition : sortie des marchandises vers les clients.

La figure 2 présente ces étapes. Les flèches représentent les différents flux de marchandises possibles. Si le produit passe directement à l'expédition sans passer par le stockage, c'est le transbordement direct (*cross-docking*). Les produits soit passent au stockage automatiquement (stockage aléatoire) ou bien passent par l'étape de rangement en stock (*putaway*) qui

assigne les emplacements à chaque produit. Les produits peuvent aussi être réassignés dans le magasin. Les produits sont soit automatiquement triés et emballés pour leur expédition ou bien attendent l'entrée d'une commande. À la fin du processus, les marchandises sont livrées.



**Figure 2. Modèle du processus d'entreposage (adaptée de [Ivanov et al., 2012])**

**2.2.3 Points forts des modèles de Schneider et de Ivanov**  
 Les modèles de Schneider et de Ivanov présentent le processus d'entreposage de deux perspectives différentes. Celui de Schneider décrit les processus qui se déroulent notamment dans l'industrie portuaire (dans les terminaux à conteneurs des ports maritimes) et détaille les fonctions de chaque étape du processus, il permet donc la conception de l'automatisation de l'entreposage de manière incrémentale. Par exemple, l'automatisation du magasin peut être envisagée en partie, soit en automatisant sa gestion ou bien la relocalisation des articles.

Le modèle de Ivanov, développé en se basant sur les entrepôts des détaillants de produits alimentaires et des entreprises en vente de pièces d'automobiles, illustre tous les mouvements possibles des articles entre les différentes étapes du processus. L'entrepôt est le lieu de plusieurs flux de matières, parmi lesquels : le transbordement qui concerne les articles expédiés sans stockage intermédiaire, l'entrée directe des marchandises au stockage (cas de stockage aléatoire), le passage des articles par le rangement en stock (*putaway*) avant le stockage pour que leurs emplacements soient assignés, etc.

### 2.3 Automatisation du processus d'entreposage dans un contexte d'Industrie 4.0

Selon Winkelhaus et al. (2020), l'intégration de l'Internet des objets (*Internet of Things*) dans la logistique permet un suivi en temps réel des flux de matières et une meilleure gestion des unités de manipulation. Une meilleure efficacité des processus logistiques peut être obtenue en mettant en œuvre les principes de l'industrie 4.0 dans des domaines clés tels que l'entreposage, le transport, l'emballage, la distribution, le chargement/déchargement et le partage d'informations. Une logistique efficace est un aspect clé pour que les entreprises restent compétitives, et est essentielle pour atteindre l'objectif de fournir des produits de haute qualité personnalisés en masse de manière durable.

L'automatisation d'un entrepôt permet une maîtrise des flux de marchandises, un meilleur contrôle des stocks, une

réduction des délais et des erreurs, augmentant ainsi l'efficacité [Ivanov et al., 2012].

Winkelhaus et al. (2020) a mené une revue de littérature exhaustive afin de proposer un cadre conceptuel de la logistique 4.0 en citant les systèmes logistiques 4.0 existants. Il présente un aperçu de divers exemples de technologie tels que les données massives, l'infonuagique, les systèmes cyber-physiques et l'IoT qui est prédominant dans la littérature. Ces dernières peuvent être adaptées et combinées pour améliorer la logistique d'une organisation selon ses contraintes de coût, de temps et de qualité. Finalement, il souligne les perspectives de la logistique 4.0 comme élément nécessaire pour les systèmes de production du futur, et plus précisément en matière de systèmes d'entreposage.

Les différentes étapes du processus d'entreposage peuvent être effectuées manuellement par du personnel ou automatisées, en partie ou totalité, par des moyens technologiques. Il est à noter, par ailleurs, qu'une automatisation totale n'est pas toujours la meilleure option, puisqu'elle nécessite de grands investissements significatifs et peut être moins flexible que du personnel qualifié.

### 3 MODELE D'AUTOMATISATION INCREMENTALE DE L'ENTREPOSAGE POUR LES PME

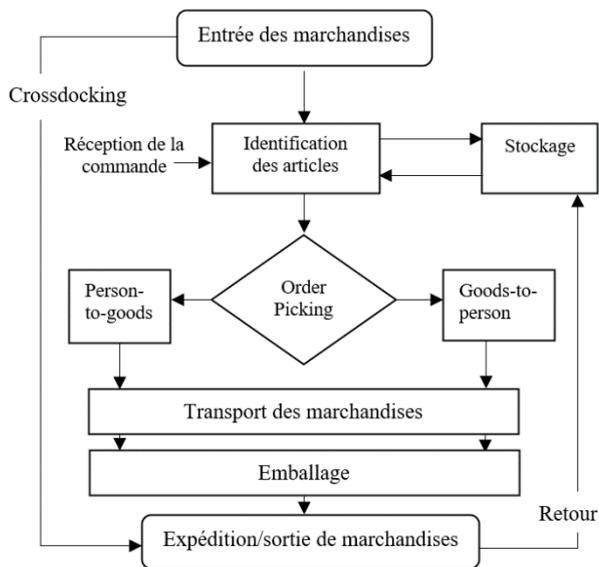
Dans cette section, les fonctions du processus d'entreposage sont reprises dans un nouveau modèle qui illustre les flux de matière en amont, au sein et en aval de l'entrepôt. Ce modèle s'appuie sur les avantages des deux modèles proposés par Schneider (2008) et Ivanov (2012), et servira de base pour notre analyse pour les PME désirant automatiser leur processus d'entreposage.

La modularité de notre modèle permet aux PME d'envisager l'intégration d'une solution partiellement automatisée, puisque l'automatisation totale d'un entrepôt à 100% peut s'avérer coûteuse et inefficace pour les PME. En effet, les PME seront en mesure de sélectionner les solutions d'automatisation les plus adaptées à leurs besoins. Par exemple, si une PME estime que ses pertes de temps se situent au niveau de l'identification des articles, elle pourra décider d'automatiser uniquement cette étape dans son processus d'entreposage.

Des solutions d'automatisation du processus d'entreposage sont présentées pour chaque étape, puis des solutions automatisées spécifiques aux PME sont mentionnées. Et finalement, des critères de sélection sont élaborés pour faciliter leur choix de solutions automatisées.

#### 3.1 Proposition d'un nouveau modèle de processus d'entreposage

La figure 3 présente la proposition de processus d'entreposage générique, en se basant sur les processus recensés (figures 1 et 2).



**Figure 3. Nouveau modèle de processus d'entreposage**

### 3.2 Solutions d'automatisation du processus

Le tableau 1 dans l'annexe présente une liste non exhaustive de solutions existantes pour l'automatisation des diverses étapes du processus d'entreposage générique présenté à la figure 3. Les prochaines sous-sections élaborent sur chacune d'elles.

#### 3.2.1 Entrée des marchandises

L'entrée des marchandises est la première opération d'un entrepôt. Les articles entrants sont notifiés, puis s'en suit un long processus de comptage, d'identification et de contrôle des marchandises. Les marchandises sont acceptées si les différents critères (date de livraison, qualité) sont remplis. Le produit est alors accepté, marqué, enregistré puis mis en attente de rangement [Karásek, 2013].

Pour automatiser cette fonction, Schneier (2015) discute l'utilisation des AGV (*automated guided vehicles*), ce sont des robots de transport à navigation automatique sur un parcours prédéfini. Ils servent pour le transport, le stockage et la récupération des marchandises. D'autre part, Fragapane (2021) présente les AMR (*automated mobile robots*) qui sont des robots de transport à navigation automatique flexible, pouvant adapter leur trajectoire en fonction des obstacles rencontrés. Et finalement, Ashrafian (2019) présente les convoyeurs comme solution d'automatisation de cette fonction, ce sont des tapis roulants industriels permettant le déplacement de marchandises.

#### 3.2.2 Stockage

Le stockage consiste en la répartition des marchandises vers les zones de stockage prévues : l'affectation de l'emplacement de stockage, la mise en place des articles et leur relocalisation si nécessaire. La surveillance du stock est aussi primordiale pour savoir en permanence quelle marchandise est disponible et où [Karásek, 2013].

Selon Roodbergen et Vis (2009), cette étape peut être effectuée par les AS/RS (*Automated Storage and Retrieval Systems*) qui englobent des technologies d'entrepôt dans lesquelles les marchandises sont placées et retirées automatiquement du stockage (e.g., carrousel vertical, carrousel horizontal, stockeur de micro-charges).

#### 3.2.3 Identification des articles

L'identification est une étape qui survient à deux reprises dans le processus d'entreposage : à l'entrée des marchandises afin de les stocker à l'endroit prévu, et après réception de la commande. Les objets peuvent être identifiés et reconnus avec un procédé assisté par ordinateur où l'employé est orienté par un voyant lumineux ou une commande vocale (*pick-to-light*/cueillette par commande vocale) ou bien par le biais d'un lecteur permettant d'identifier un objet avant sa manutention (p. ex., reconnaissance par caméra avec intelligence artificielle) [Happonen et Minashkina, 2019]. Cette étape peut être aussi remplie automatiquement par certains AS/RS (grue, stockeur de micro-charges), des AGV ou AMR.

#### 3.2.4 Récupération des articles

La récupération des articles est une étape complexe. Une liste d'articles est remise à l'employé qui doit se déplacer, rechercher, extraire les articles et faire l'inventaire. Quand la liste d'articles comporte des éléments hétérogènes, la récupération est encore plus compliquée [Karásek, 2013].

Cette étape est généralement effectuée par un bras robotique qui est un appareil programmable qui fonctionne comme un bras humain, dont la fonction est la fixation, le déplacement de marchandises, la cueillette ou l'assemblage de pièces [Happonen et Minashkina, 2019]. Les AS/RS, les AGV et les AMR peuvent aussi remplir cette fonction.

#### 3.2.5 Transport des articles

Le transport des articles vient après leur récupération. Les produits sont transportés vers le service d'emballage où ils sont préparés à l'envoi. Les AGV, AMR et les convoyeurs sont les solutions les plus convenables pour cette étape, tandis que les carrousels ne conviennent qu'au stockage des articles et leur récupération.

#### 3.2.6 Emballage

L'emballage garantit que les marchandises sont bien emballées pour le transport et acheminées au service d'expédition. L'emballage peut également être assuré par un service d'emballage autonome dans l'entrepôt [Karásek, 2013]. Parfois, cette étape est sautée (p. ex., si l'emballage initial de chaque objet est suffisant), mais elle peut être automatisée à l'aide d'un bras robotique.

#### 3.2.7 Sortie des articles

La sortie des articles ou l'expédition garantit que l'article précédemment emballé est pris en charge, affecté au camion et chargé de manière optimale. Ce processus peut être assuré par des convoyeurs [Ashrafian et al., 2019].

#### 3.2.8 Retour des articles

Les articles retournés subissent d'abord une étape de contrôle qualité, car en fonction de l'état dans lequel revient un produit, il ne sera pas traité de la même façon. Ceci peut être effectué par des AGV et des AMR.

#### 3.2.9 Solutions multi-étapes

Le tableau 2 (en annexe) présente des exemples de solutions commerciales dans l'industrie manufacturière. Ce sont des solutions basées sur les solutions classiques, mais touchant plus d'une étape du processus d'entreposage. Plusieurs

entreprises proposent d'utiliser les machines distributrices<sup>1</sup> qui sont un cas spécial de carrousel vertical. Elles servent généralement à fournir des objets consommables pour les travailleurs d'usine. D'autre part, Snap-on<sup>2</sup> propose des chariots pour le stockage et le suivi des objets. AutoStore<sup>3</sup> présente un AS/RS cubique qui est composé d'une grille structurelle, de robots de livraison, de bacs de stockage et d'un port opérateur. Amazon<sup>4</sup> et Google ont développé des drones pour les livraisons. Et finalement, Spot<sup>5</sup> de Boston Dynamics est un robot mobile agile qui navigue sur le terrain avec une mobilité, permettant d'automatiser les tâches d'inspection de routine et la capture de données en toute sécurité, avec précision et fréquemment.

### 3.3 Solutions existantes pour les PME

L'intégration dans les PME des solutions citées dans la section précédente peut sembler une tâche ardue en raison de la complexité et le coût élevé des solutions. Le but de notre modèle est de définir le contexte nécessaire pour comprendre les besoins de la PME en question, et par la suite, choisir la solution automatisée optimale. Une PME avec un goulot dans le transport des marchandises peut envisager une solution d'entreposage partiellement automatisée uniquement pour cette étape.

Cependant, des solutions semi-automatisées spécialement conçues pour répondre aux besoins des PME ont été proposées dans la littérature, mais la plupart ne traitent que l'étape d'identification des articles du processus d'entreposage.

Les PME, qui manquent généralement de ressources et dont le personnel a de faibles connaissances en intelligence artificielle, s'appuient toujours sur l'expérience pour attribuer des emplacements de stockage à divers produits. En conséquence, la qualité de la prise de décision n'est pas garantie [Choy et al. 2014]. C'est donc dans cette perspective que Choy et al. ont conçu, par exemple, un système intelligent facilement adoptable par les PME pour améliorer les problèmes d'affectation des emplacements de stockage. Le système proposé est un système d'attribution de stockage basé sur RFID qui fournit une aide à la décision pour l'attribution de stockage dans un entrepôt. Frankó et al. (2020) ont également discuté la mise en œuvre d'une nouvelle méthode à bas coût (*low-cost*) pouvant être adoptée par les PME pour améliorer le suivi des articles dans un entrepôt. Cette solution combine les RFID pour la traçabilité des articles, et la technologie Ultra-Wideband radio, pour que les informations soient accessibles en temps réel, mais sans exigences de calcul coûteuses. Les résultats d'évaluation de cette approche parlent de sa haute évolutivité, vu que la solution permet d'augmenter le nombre d'articles traçables sans ajustement physique de l'infrastructure globale de l'entrepôt.

### 3.4 Critères de sélection de solutions

Pour faire un choix éclairé du bon degré d'automatisation des différentes étapes du processus d'entreposage, il est nécessaire de déterminer des critères basés sur les caractéristiques au sein de l'organisation.

Darmawan et al. (2022) ont présenté un modèle de sélection du système de stockage automatisé le plus approprié et l'ont validé dans le cas d'une PME de fabrication de plastique, en visant deux objectifs dans le processus de sélection : le design du système et un fournisseur compétent pour mettre en œuvre le système de stockage. Parmi les critères présentés, certains portent sur le design du système de stockage :

- utilisation d'espace : maximisation de l'utilisation des dimensions et de la capacité de l'entreprise ;
- correspondance du système de stockage avec les caractéristiques du produit : dimensions, poids, durée de vie, environnement de stockage ;
- coût total : construction, opérations, maintenance, consultation, expansion future ;
- fonctionnalité du système : temps de mouvement, connectivité avec le système de base de données de l'entreprise qui contrôle des stocks en temps réel, sécurité ;
- maintenance : préventive, conditionnelle, corrective.

Happonen et Minashkina (2019) ont proposé une approche de sélection de WMS (*warehouse management system*, qui désigne les progiciels destinés à gérer les opérations d'un entrepôt de stockage) avec des considérations durables, qui transforment les entreprises traditionnelles en entreprises du savoir. Les auteurs se concentrent sur les opérations améliorées grâce aux robots et les paramètres de choix du robot de manutention :

- cueillette d'articles : la méthode d'identification des articles dans le bac source, stabilité de la cueillette ;
- manutention des articles : nature et limites de dimensions/poids des articles, possibilité d'imiter le mouvement et la fonction des muscles humains (nommée *soft touch*) ;
- flexibilité : l'adaptabilité du robot aux changements d'articles (p. ex., autoformation à de nouvelles formes d'articles) ;
- angles de cueillette : prise en charge d'angles de prélèvement spéciaux, possibilité de cueillette optimisée pour une vitesse améliorée selon les itinéraires à parcourir ;
- mouvements fluides : prise en charge des accélérations et des décélérations douces, possibilité de sélection de vitesse/fluidité en fonction de l'autre ;
- sécurité ;
- maintenance : cycle de maintenance, niveau d'expertise nécessaire.

Tosun et Erdoğan-Aktan (2013, 2016) ont proposé deux outils de prise de décision pour classer des alternatives de systèmes de stockage et de récupération automatisés (AS/RS) pour une entreprise de fabrication d'électronique grand public. Ces deux approches ont été appliquées après la sélection de onze critères à partir d'entretiens avec les personnes responsables de l'entreprise :

- compatibilité avec le système en place : la conformité du AS/RS avec le système de fabrication et d'information actuel de l'entreprise ;

<sup>1</sup> <https://www.fastenal.ca/fr/fast/services-and-resources/fast-solutions/vending-solution/units>

<sup>2</sup> <https://shop.snapon.com/categories/Tool-Storage/700030>

<sup>3</sup> <https://www.autostoresystem.com/>

<sup>4</sup> <https://www.aboutamazon.com/news/transportation/amazon-prime-air-prepares-for-drone-deliveries>

<sup>5</sup> <https://www.bostondynamics.com/products/spot>

- possibilité d'expansion : la capacité des propriétés physiques de l'entrepôt à faire face aux changements à long terme de la demande ;
- capacité : la capacité des alternatives AS/RS à faire face à une demande croissante à l'avenir ;
- vitesse de transfert : la vitesse de livraison du produit fini du point de stockage aux racks, des racks au point de livraison ;
- matériel : le bon fonctionnement de l'équipement physique qui supportera l'AS/RS ;
- flexibilité : la conformité avec les plans d'expansion de l'entreprise et les demandes variables des clients ;
- assistance technique : l'assistance rapide et précise pour les problèmes survenus lors de l'utilisation d'AS/RS ;
- éducation : la nécessité de la formation des travailleurs sur le nouveau système installé ;
- coût d'achat : l'un des critères de jugement les plus utilisés pour tout processus de sélection ;
- communication : le support continu des systèmes après la vente ;
- documentation : la disponibilité des informations nécessaires sur l'installation et l'utilisation du système.

#### 4 TRAVAUX FUTURS

L'industrie 4.0 étant un sujet émergent pour les PME, le but de ce travail à long terme est de développer une stratégie efficace de transformation numérique des processus d'entreposage des PME. Cette stratégie sera ultimement validée par un cas d'application.

##### 4.1 Proposition de méthode pour accompagner les PME

Pour guider une PME dans l'automatisation de son entrepôt, il est primordial de définir ses besoins à chaque étape du processus d'entreposage. Le modèle présenté en figure 3 servira de base pour mettre en exergue l'ensemble des besoins, et ainsi effectuer un choix réfléchi de technologies d'entreposage.

##### 4.1.1 Définition des besoins en entreposage de la PME

Lors de la prise d'une décision d'investissement, il est nécessaire de passer par un processus décisionnel basé sur les critères les plus significatifs pour l'entreprise en question. Ces critères varient selon les besoins de chaque entreprise.

Pour y arriver, il sera nécessaire d'établir un arbre décisionnel pour mieux définir et comprendre les besoins des entreprises, et par la suite choisir la meilleure solution d'entreposage. Cet outil sera établi en se basant sur des critères trouvés dans la littérature, comme mentionné dans la section 3.3.

##### 4.1.2 Conception d'un guide d'accompagnement pour la PME manufacturière

En se basant sur les résultats de l'arbre décisionnel, les besoins de la PME peuvent être définis. Si une PME doit idéalement automatiser les étapes d'identification et de transport des marchandises, on pourra envisager une solution combinée. Par exemple, une solution combinée peut inclure un système de reconnaissance visuelle qui identifie des articles et un bras robotisé qui met les articles sur un convoyeur pour le transfert vers l'étape suivante.

#### 4.2 Cas d'application

Ce travail de recherche sera ancré dans la pratique, dans l'usine-laboratoire du CNIMI au campus de l'UQTR à Drummondville où un magasin automatisé sera implanté, profitant de différentes technologies issues de l'Industrie 4.0 pour améliorer la fluidité de travail.

##### 4.2.1 Description du CNIMI et de son magasin

L'usine-laboratoire du CNIMI a pour but l'enseignement, la recherche et le transfert de connaissances en lien avec l'Industrie 4.0 et ses technologies. Cette usine-laboratoire permet aux chercheurs et partenaires de développer de nouvelles techniques et connaissances liées aux technologies issues de l'Industrie 4.0. Divers équipements conventionnels sont à leur disposition : les fraiseuses, les tours, les machines-outils à commande numérique, les perceuses, les équipements de tôlerie, les soudeuses, etc. Durant l'utilisation des équipements par les étudiant.e.s des différents programmes de formations, ces derniers ont continuellement recours aux articles nécessaires rangés dans le magasin : outils, porte-outils, pastilles d'usinage ou produits de sécurité. Ces articles, consommables ou pas, sont récupérés manuellement par les étudiant.e.s dans le magasin de l'usine-laboratoire où ils sont mis à disposition.

##### 4.2.2 Les processus d'entreposage dans le CNIMI

Le processus d'entreposage dans la CNIMI est défini dans la figure 4. En premier lieu, les outils entrent dans l'usine-laboratoire. Ils sont identifiés puis stockés dans le magasin. Lorsqu'une commande est passée, les outils commandés sont d'abord identifiés, puis récupérés de la zone de stockage. Ils sont ensuite transportés vers l'atelier pour être utilisés. Après l'utilisation, les consommables ne reviennent pas au magasin, tandis que les objets à longue durée de vie tels que les porte-outils sont remis en inventaire au magasin. Enfin, certains périssables comme les pastilles d'usinage voient leur statut de durée de vie mis à jour avant d'être retournés.

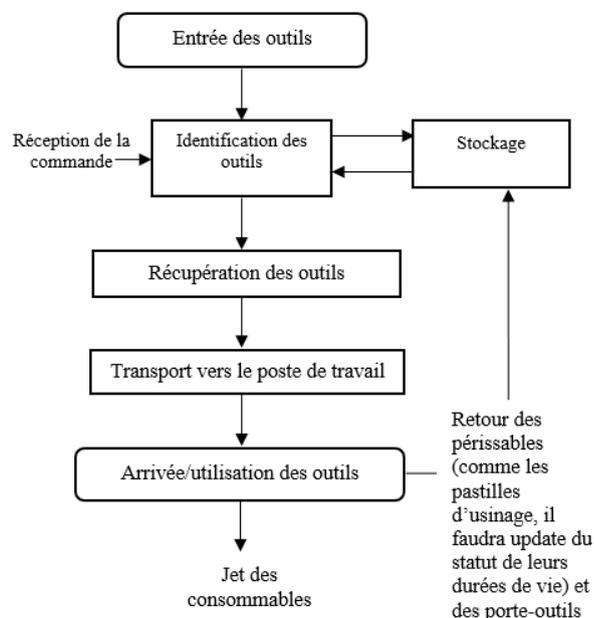


Figure 4. Processus d'entreposage dans la CNIMI

#### 4.2.3 Perspectives d'application du guide d'accompagnement au CNIMI

En utilisant le guide d'accompagnement proposé, l'usine-laboratoire pourra améliorer son processus d'entreposage. L'utilisation de technologies de l'Industrie 4.0 telles que l'IoT et l'analyse de données, par exemple, pourraient aider à surveiller et à optimiser le mouvement des outils en temps réel.

En mettant en place une stratégie efficace de transformation numérique des processus d'entreposage, l'usine-laboratoire pourrait non seulement améliorer la fluidité de son travail, mais également servir d'exemple pour d'autres PME qui cherchent à s'adapter aux technologies de l'Industrie 4.0. En partageant ses résultats après le choix et l'intégration d'une solution adaptée, le CNIMI pourra contribuer à la sensibilisation des PME aux avantages de la numérisation de leur processus d'entreposage et à les aider à adopter des solutions appropriées pour améliorer leur efficacité opérationnelle et leur compétitivité sur le marché.

## 5 CONCLUSION

Cet article présente un état de l'art et une stratégie pour mieux accompagner les PME dans leur transition numérique, en particulier pour ce qui est de l'automatisation du processus d'entreposage. Malgré l'essor des nouvelles technologies du 4.0, peu d'études ont été réalisées dans l'optique de rendre les magasins automatisés accessibles aux PME. Afin de bénéficier du contexte de l'Industrie 4.0, les PME doivent adopter des solutions d'entreposage adaptées à leurs besoins qui diffèrent de ceux des grandes entreprises. Ce papier apporte un modèle d'automatisation incrémentale d'entreposage tenant compte des besoins spécifiques des PME.

La finalité du projet de recherche à venir sera de fournir un outil aux PME visant à les accompagner dans l'implantation d'une solution automatisée pour leur processus d'entreposage. Une validation de la pertinence de l'outil sera aussi réalisée dans l'usine-laboratoire du CNIMI. Ce prototype sera fonctionnel tant au niveau mécanique que logiciel.

## 6 REFERENCES

- Aktan, H. E., & Tosun, A. (2013). An integrated fuzzy AHP-fuzzy TOPSIS approach for AS/RS selection. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 11(2), 228-245.
- Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A., Tempelmeier, H., & Furmans, K. (Éds.). (2008). *Handbuch Logistik*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72929-7>
- Ashrafian, A., Pettersen, O.-G., Kuntze, K. N., Franke, J., Alfnes, E., Henriksen, K. F., & Spone, J. (2019). Full-Scale Discrete Event Simulation of an Automated Modular Conveyor System for Warehouse Logistics. In F. Ameri, K. E. Stecke, G. von Cieminski, & D. Kiritsis (Éds.), *Advances in Production Management Systems. Towards Smart Production Management Systems* (Vol. 567, p. 35-42). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-29996-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-29996-5_4)
- Choy, K., Ho, G. T. s., & Lee, C. K. H. (2014). A RFID-based storage assignment system for enhancing the efficiency of order picking. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10845-014-0965-9>
- Darmawan, A., Son, N. H., Santoso, H. B., & Ping, H. Y. (2022). Selection process for an automated storage system : A unison framework approach. *South African Journal of Industrial Engineering*, 33(1), 87-100. <https://doi.org/10.7166/33-1-2509>
- Dekhne, A., Hastings, G., Murnane, J., & Neuhaus, F. (s. d.). *Automation in logistics : Big opportunity, bigger uncertainty*.
- Fragapane, G., de Koster, R., Sgarbossa, F., & Strandhagen, J. O. (2021). Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics : Literature review and research agenda. *European Journal of Operational Research*, 294(2), 405-426. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.01.019>
- Frankó, A., Vida, G., & Varga, P. (2020). Reliable Identification Schemes for Asset and Production Tracking in Industry 4.0. *Sensors*, 20(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/s20133709>
- Haase, J., & Beimborn, D. (2017). Acceptance of Warehouse Picking Systems : A Literature Review. *Proceedings of the 2017 ACM SIGMIS Conference on Computers and People Research*, 53-60. <https://doi.org/10.1145/3084381.3084409>
- Happonen, A., & Minashkina, D. (2018). *Operations automatization and digitalization – a research and innovation collaboration in physical warehousing, AS/RS and 3PL logistics context*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4171437>
- Hernández Corbato, C., Bharatheesha, M., Ko, W., Gaiser, H., Tan, J., Deurzen, K., Vries, M., Mil, B., Egmond, J., Burger, R., Morariu, M., Ju, J., Germann, X., Ensing, R., Frankenhuyzen, J., & Wisse, M. (2017). *Team Delft's Robot Winner of the Amazon Picking Challenge 2016*. 613-624. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-68792-6\\_51](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68792-6_51)
- Ivanov, D., Tsipoulanidis, A., & Schönberger, J. (2021). *Global Supply Chain and Operations Management : A Decision-Oriented Introduction to the Creation of Value*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-72331-6>
- Jeschke, S., Brecher, C., Meisen, T., Özdemir, D., & Eschert, T. (2017). Industrial Internet of Things and Cyber Manufacturing Systems. In S. Jeschke, C. Brecher, H. Song, & D. B. Rawat (Éds.), *Industrial Internet of Things : Cybermanufacturing Systems* (p. 3-19). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-42559-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42559-7_1)
- Kamarul Bahrin, M. A., Othman, M. F., Nor Azli, N. H., & Talib, M. F. (2016). INDUSTRY 4.0 : A REVIEW ON INDUSTRIAL AUTOMATION AND ROBOTIC. *Jurnal Teknologi*, 78(6-13). <https://doi.org/10.11113/jt.v78.9285>
- Karasek, J. (2013). An Overview of Warehouse Optimization. *International Journal of Advances in Telecommunications, Electrotechnics, Signals and Systems*, 2, 111-117. <https://doi.org/10.11601/ijates.v2i3.61>
- Kemme, N. (2013). *Design and Operation of Automated Container Storage Systems*. Physica-Verlag HD. <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2885-6>
- Manary, M. P., Wieland, B., Willems, S. P., & Kempf, K. G. (2019). Analytics Makes Inventory Planning a Lights-Out Activity at Intel Corporation. *Interfaces*, 49(1), 52-63.
- Roodbergen, K. J., & Vis, I. (2009). A survey of literature on automated storage and retrieval systems. *European Journal of Operational Research*, 194, 343-362. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.01.038>
- Shneier, M., & Bostelman, R. (2015). *Literature Review of*

