



Contribution à un modèle durable de logistique urbaine par le développement de l'entrepôt urbain 4.0.

Aurélie Edouard

► To cite this version:

Aurélie Edouard. Contribution à un modèle durable de logistique urbaine par le développement de l'entrepôt urbain 4.0.. Autre. HESAM Université, 2023. Français. ⟨NNT : 2023HESAE018⟩. ⟨tel-04174311⟩

HAL Id: tel-04174311

<https://pastel.hal.science/tel-04174311v1>

Submitted on 31 Jul 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
[LAMIH UMR CNRS 8201– Campus de Paris]

THÈSE

présentée par : **Aurélie EDOUARD**

soutenue le : **24 février 2023**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialité : **Génie Industriel**

Contribution à un modèle durable de logistique urbaine par le développement de l'entrepôt urbain 4.0

THÈSE dirigée par :
[Professeur LAMOURI Samir]
et [Professeur SALLEZ Yves]

et co-encadrée par :
[Docteure FORTINEAU Virginie]

Jury :

Mme Zohra CHERFI-BOULANGER, Professeure, UTC
Mme Roberta COSTA-AFFONSO, MCF HDR, ISAE SUPMECA
Mme Sahin EVREN, Professeure, CentraleSupélec
Mme Virginie FORTINEAU, Docteure, Vivalto Santé
M. Samir LAMOURI, Professeure, LAMIH, Arts et Métiers
M. Yves SALLEZ, Professeur, LAMIH, UPHF
M. Alexandre BERGER, Directeur industriel, Groupe La Poste

Présidente
Rapporteure
Rapporteure
Examinatrice
Examineur
Examineur
Invité

Remerciements

Cette thèse fait partie de ces expériences nouvelles et riches que j'ai eu la chance de vivre. Elle a été très enrichissante tant du point de vue technique que relationnelle. La réalisation de ces travaux n'aurait pas été possible sans le soutien, les conseils et l'aide de plusieurs personnes que je remercie sincèrement.

Je te remercie tout particulièrement, Samir LAMOURI, mon directeur de recherche, pour ta patience, ton soutien et ta ténacité. Tu n'as eu de cesse de me pousser à progresser. Tu ne m'as jamais abandonné, m'apportant tes conseils avisés tant d'un point de vue scientifique que d'un point de vue humain. Tu n'as cessé de me rappeler que ce travail était le mien, mais il n'existerait pas si tu n'avais pas été à mes côtés pendant ces années. Merci d'avoir pris le temps nécessaire à la réussite de ce projet.

Je tiens à te remercier Yves SALLEZ, codirecteur de ces travaux, pour tes lectures attentives, ta grande pédagogie et ta réactivité. Tu m'as permis d'avancer avec méthodologie dans mes recherches.

Merci Virginie FORTINEAU, encadrante de ces travaux de recherche, pour ton accompagnement, ton aide et tes conseils qui m'ont systématiquement permis d'avancer tout au long de ces trois années.

Je tiens à remercier également le jury scientifique, qui me fait l'honneur d'examiner ces travaux de recherche.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à notre partenaire industriel, le Groupe La Poste. Je remercie plus particulièrement Alexandre BERGER, qui m'a fait confiance pour mener ce doctorat au sein de la BU Nouveaux Services et accueilli au sein de ses équipes de l'Unité d'affaires Solutions de Logistique et Transport de Proximité. Je remercie aussi mes collègues de la direction des opérations, Nacima, Sylvie et Louis, et mon responsable, Xavier VAN KERREBROUCK.

Je tiens à remercier AMVALOR, notre partenaire académique qui a cru dans notre projet de recherche.

J'aimerais également remercier les membres du laboratoire LAMIH aux Arts et Métiers et plus particulièrement Mme Angie NGUYEN pour son amitié et son ouverture à partager ses connaissances scientifiques.

Je remercie Jason, mon « beau-frère » américain, pour ses relectures et ses corrections commentées de mes écrits en anglais.

Je remercie infiniment ma famille et mes amis pour l'amour et le soutien inconditionnel qu'ils m'ont apporté tout au long de mes années d'études, et à qui je dois une grande partie de ce bel accomplissement. Vous m'avez donné la confiance qui dans les moments de doute nous donne la force de ne pas m'arrêter. Vous avez toujours été présents pour m'aider et me soutenir, disponibles pour m'écouter et m'éclairer, partageant avec moi vos expériences et vos savoirs.

Enfin, j'aimerais remercier mon compagnon de vie et le petit être que nous avons recueilli en mars 2021, notre chienne Penny, pour leur soutien inconditionnel et leur présence emplie de compréhension et de tranquillité. Merci de m'avoir soutenue avec patience et amour durant ces trois ans.

Résumé

Les questions de développement durable font l'objet d'une prise de conscience croissante. Les acteurs de la chaîne logistique sont de plus en plus conscients de cette situation, d'autant plus que les pressions réglementaires, sociales et sociétales dans ce domaine sont nombreuses. Cette situation n'est pas sans conséquence sur les pratiques des entreprises. Ainsi, le modèle d'entrepôt urbain s'impose comme l'une des solutions étudiées dans le contexte de la logistique urbaine, domaine de recherche en émergence, qui aborde le développement durable des pratiques de gestion des flux de marchandises dans les centres-villes. Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un contrat de recherche Cifre réalisé en partenariat avec l'entreprise La Poste qui cherche à développer un réseau national d'entrepôts urbains afin de proposer des prestations de services de logistique de proximité.

Ce travail apporte deux contributions principales. D'une part, l'absence d'un modèle générique a nécessité de définir le concept d'entrepôt urbain et de préciser les composantes du modèle (caractéristiques, contraintes et défis). D'autre part, pour optimiser les processus internes de ces nouvelles installations logistiques, une proposition de nouveaux outils, tirés de l'Industrie 4.0, a été réalisée. Son objectif étant d'améliorer la satisfaction des clients à moindres coûts, en intégrant les contraintes du terrain et répondant à des problématiques actuelles.

Le travail a été réalisé en plusieurs étapes. En premier lieu, deux états de l'art ont exploré la littérature scientifique, d'une part, sur les entrepôts urbains, et d'autre part, sur les pratiques 4.0 observées en entrepôts de distribution traditionnels, analysées en tant que perspective intéressante pour l'amélioration des processus des entrepôts urbains. Ensuite, appuyées par les données d'observations du terrain et les conclusions des états de l'art, les composantes du modèle des entrepôts urbains ont été définies afin de relever les contraintes et les enjeux de ces installations, impactant leur développement sous une forme durable. La définition de ces composantes a mené à la proposition d'une amélioration des processus par l'emploi des outils adaptés tirés de l'Industrie 4.0. Pour finir, un cas d'étude a été mené, avec des données réelles d'un client et l'application d'une méthodologie de conception de systèmes intelligents, sur l'application d'un des outils 4.0 : les systèmes de stockage et de prélèvement automatique, dont l'emploi a été identifié pertinent pour relever les défis d'optimisation du foncier, de modularité, de reconfigurabilité et de durabilité des entrepôts urbains. Cette étude a permis d'observer les conséquences de la mise en place d'un tel système sur la performance de ces installations.

Mots-clés : Développement durable, Logistique urbaine, Entrepôts urbains, Gestion des entrepôts, Industrie 4.0, Logistique 4.0

Résumé en anglais

There is a growing awareness of sustainable development issues. Supply chain actors are increasingly aware of this situation, especially as regulatory, social and societal pressures in this area are growing. This situation is not without consequences for business practices. Thus, the urban warehouse model is one of the solutions studied in the context of urban logistics, an emerging research field that addresses the sustainable development of goods flow management practices in city centers. This thesis is part of a Cifre research contract carried out in partnership with La Poste, the French post office company, which is seeking to develop a national network of urban warehouses as part of local logistics services.

This work provides two main contributions. On the one hand, the lack of a generic model required defining the concept of urban warehouse and specifying the components of the model (characteristics, constraints and challenges). On the other hand, in order to optimize the internal processes of these new logistic facilities, a proposal of new tools, drawn from Industry 4.0, was made. Its objective is to improve customer satisfaction at lower costs, by integrating the constraints of the field and responding to current issues.

The work was carried out in several stages. First, two state of the art studies explored the scientific literature, on the one hand, on urban warehouses, and on the other hand, on 4.0 practices observed in traditional distribution warehouses, analyzed as an interesting perspective for the improvement of urban warehouse processes. Then, based on the field observation data and the conclusions of the state of the art, the components of the urban warehouse model were defined in order to identify the constraints and challenges of these facilities, impacting their development in a sustainable way. The definition of these components led to the proposal of a process improvement by using adapted tools from Industry 4.0. Finally, a case study was conducted, with real data of a customer and the application of a methodology of intelligent systems design, on the application of one of the proposed 4.0 tools. The systems studied were automated storage and retrieval systems, which were identified as relevant to address the challenges of land optimization, modularity, reconfigurability and sustainability of urban warehouses. This study allowed us to observe the consequences of the implementation of such a system on the performance of these facilities.

Keywords: Sustainable development, Urban logistics, Urban warehouses, Warehouse management, Industry 4.0, Logistics 4.0

Table des matières

Remerciements	1
Résumé	3
Résumé en anglais	4
Table des matières	5
Liste des tableaux	7
Liste des figures	8
Liste des sigles et des abréviations.....	10
Notes sur la langue et le formatage de cette thèse.....	12
Notes sur le partenariat industriel de cette thèse CIFRE.....	13
Introduction générale.....	15
Chapitre 1. Contexte	19
1.1. Le développement durable et la logistique.....	19
1.2. Logistique urbaine.....	22
1.2.1. De nouvelles solutions de livraison.....	24
1.2.2. Des moyens de transport écologiques	25
1.2.3. Nouvelle génération d'installations logistiques	26
1.3. Chaîne d'approvisionnement des centres-villes	27
1.3.1. Les entrepôts de distribution traditionnels	28
1.3.2. Processus des entrepôts	30
1.3.3. Critères de performance	32
1.3.4. Nouveau schéma de distribution	33
1.4. Conclusion.....	33
Chapitre 2. Problématique et méthodologie de recherche	36
2.1. Problématiques de recherche et objectifs	36
2.2. Ancrage industriel	37
2.3. La recherche-intervention	38
2.4. Plan de mise en œuvre.....	40
2.5. Conclusion.....	43
Chapitre 3. État de l'art	44
3.1. Les entrepôts urbains.....	44
3.1.1. Méthodologie	44
3.1.2. Résultats	45

3.1.3.	Discussion	49
3.2.	Les entrepôts de distribution à l'ère de l'Industrie 4.0	53
3.2.1.	Cadre d'analyse	53
3.2.2.	Méthodologie de revue de la littérature.....	57
3.2.3.	Analyse de la littérature.....	58
3.2.4.	Discussion	73
3.3.	Conclusion.....	79
Chapitre 4.	Contribution à une caractérisation du modèle d'entrepôt urbain 4.0	82
4.1.	Définition du modèle des entrepôts urbains	82
4.1.1.	Caractéristiques des entrepôts urbains	82
4.1.2.	Défis des entrepôts urbains	84
4.2.	Les technologies de l'Industrie 4.0 sur les processus actuels.....	86
4.2.1.	L'étude par les processus	87
4.2.2.	Modélisation des processus actuels (Version T0)	88
4.2.3.	Analyse du processus d'entreposage urbain actuel	96
4.2.4.	Proposition d'un processus 4.0 (Version Tn).....	97
4.2.5.	Discussions.....	105
4.2.6.	Conclusion.....	108
Chapitre 5.	Cas d'application.....	111
1.1.	Présentation de l'étude de cas	111
1.2.	Le contexte de La Poste et la problématique du client final	112
1.3.	Méthodologie	114
1.4.	Présentation des résultats	116
1.5.	Discussion	126
1.6.	Conclusion.....	128
	Conclusion générale et perspectives.....	131
	Résumé	145
	Résumé en anglais	145

Liste des tableaux

Tableau 1 : Méthodologie de sélection des papiers.....	45
Tableau 2 : Classification des articles analysés.....	61
Tableau 3 : Niveaux de capacité des technologies de l'industrie 4.0 ayant un impact sur les objectifs de performance de la gestion d'entrepôt	66
Tableau 4 : Résumé des occurrences du tableau 2	74
Tableau 5 : Résumé des occurrences du tableau 3	75
Tableau 6 : Quantités d'articles selon les combinaisons de mots-clés et par année	77
Tableau 7 : Principales caractéristiques de chaque type d'entrepôt.....	84
Tableau 8 : Évaluation des propositions 4.0.....	106
Tableau 9 : Caractéristiques principales des AS/RS	118
Tableau 10 : Contraintes physiques liées aux caractéristiques du client (10a) et du site sélectionné (10 b).	120
Tableau 11 : Les caractéristiques de la grille Autostore modélisées pour La Poste.....	122
Tableau 12 : Résultats de l'analyse des caractéristiques physiques de la grille.....	123
Tableau 13 : Exemple d'une matrice « prix au mouvement des bacs »	124

Liste des figures

Figure 1 : Liste des 17 ODD de l'ONU (ONU, 2022).....	20
Figure 2 : Chiffre d'affaires du e-commerce en France (en milliards d'euros) (Fevad, 2022) .	22
Figure 3 : Exemple de consignes Pickup.....	24
Figure 4 : Chariots suiveurs en expérimentation par La Poste	26
Figure 5 : Chaîne logistique des centres-villes.....	28
Figure 6 : Nombre d'entrepôts/platformes logistiques (EPL) et surface moyenne en 2016 en France, selon la durée de stockage (Commissariat général au développement durable, 2019).....	29
Figure 7 : Géographie des installations logistiques en Île-de-France en 2017 (Heitz, 2021)	30
Figure 8 : Les macro-processus de l'entrepôt avec leurs sous-fonctions.....	32
Figure 9 : Plan de mise en œuvre du doctorat	42
Figure 10 : Les quatre axes du cadre d'analyse	54
Figure 11 : Méthodologie de sélection des articles	58
Figure 12 : Positionnement des outils 4.0 dans le processus d'entreposage.....	78
Figure 13 : Processus des entrepôts urbains à T0.....	89
Figure 14 : Processus de réception T0.....	91
Figure 15 : Processus de stockage T0	92
Figure 16 : Processus de préparation de commandes T0	93
Figure 17 : Processus d'expédition T0.....	94
Figure 18 : Processus des fonctions transverses T0	96
Figure 19 : Processus de réception 4.0 (version Tn)	99
Figure 20 : Processus de stockage 4.0 (version Tn).....	101
Figure 21 : Processus de préparation de commandes 4.0 (version Tn).....	102
Figure 22 : Processus d'expéditions 4.0 (version Tn).....	103
Figure 23 : Processus des fonctions transverses 4.0 (version Tn).....	105
Figure 24 : Étapes du processus d'un système intelligent. Réimprimé avec permission de (Bauer & Dey, 2016).....	116
Figure 25 : Exemple d'une grille Autostore.....	121
Figure 26 : Représentation de l'économie de place des systèmes Autostore.....	122
Figure 27 : Évolution des montants facturés au client/mois en fonction du nombre de commandes et du nombre d'années d'amortissement des investissements.....	125

Figure 28 : Taux d'utilisation du système automatisé par le nombre de commandes traitées par mois.	126
---	-----

Liste des sigles et des abréviations

- **3PL** : Third-Party Logistics (Logistique tierce partie)
- **AFNOR** : Association Française de NORmalisation
- **AGV** : Automated Guided Vehicle (véhicules à guidage automatique)
- **ANRT**: Association Nationale Recherche Technologie
- **ASLOG**: Association Française de la Supply Chain
- **AS/RS** : Automated Storage and Retrieval System (système de stockage et prélèvement automatisé)
- **BPMI**: Business Process Management Initiative; consortium d'entreprises spécialisées dans le marché des produits pour la gestion des processus dont BPMN
- **BPMN**: Business Process Model and Notation
- **CIFRE**: Convention industrielle de formation par la recherche
- **EPL** : Entrepôt/Plateforme Logistique
- **FEVAD** : Fédération du E-commerce et de la Vente à Distance
- **GPS** : Global Positioning System
- **IA** : Intelligence Artificielle
- **IdO** : Internet des objets
- **INSEE** : Institut National de la Statistique et des Études Économiques
- **IoT** : Internet of Things (Internet des objets)
- **LIDAR** : Laser Imaging Detection And Ranging (détection et estimation de la distance par la lumière)
- **MAV/UAV**: Micro Aerial Vehicle /Unmanned Aerial Vehicle (drones)
- **ODD** : Objectifs de Développement Durable
- **ONU**: Organisation des Nations Unies
- **PDA**: Personal Digital Assistant (assistant personnel numérique)
- **QR code**: Quick Response code
- **RFID** : Radio Frequency Identification (radio-identification)
- **RI** : Recherche-Intervention

- **TMS** : Troubles musculosquelettiques
- **UE**: Union Européenne
- **WMS**: Warehouse Management System

Notes sur la langue et le formatage de cette thèse

Cette thèse a été rédigée en français ; toutefois, le contexte de la recherche de la logistique et de l'Industrie 4.0 étant largement international, la grande majorité de la bibliographie de cette thèse est en langue anglaise, et beaucoup de concepts afférents ont été originellement énoncés en anglais. Afin de faciliter la lecture, notamment pour les chercheurs et professionnels de ces sujets, certains mots sont donc, volontairement, restés en langue anglaise, puisque couramment utilisés comme tels dans la littérature scientifique et en entreprise.

Notes sur le partenariat industriel de cette thèse CIFRE

La présente thèse a été réalisée dans le cadre d'un contrat CIFRE (Conventions Industrielles de Formation par la Recherche) entre l'entreprise La Poste et le Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH UMR CNRS 8201) de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM).

L'entreprise La Poste est une société française principalement présente en tant qu'opérateur de services postaux (courrier, colis et express), banque, assurance, opérateur de téléphonie mobile, fournisseur de services numériques et de solutions commerce, commerce en ligne (marketing, logistique) et collecte et vente de données. Les activités du groupe La Poste sont organisées en cinq branches : Services Courrier Colis, GeoPost, Réseau La Poste, La Banque Postale et Branche numérique. Les travaux de recherche ont été effectués en collaboration avec l'unité d'affaires « Services de logistique et transport de proximité », « Business Unit Nouveaux Services », Branche Services Courrier Colis, sous la responsabilité de Alexandre BERGER.

Au sein du laboratoire LAMIH, ces travaux ont été réalisés sous la codirection de Samir LAMOURI et Yves SALLEZ.

Ce type de collaboration a pour but de créer des ponts entre la recherche scientifique et les recherches applicatives menées sur le terrain.

Introduction générale

Face aux pressions environnementales et économiques de notre société, il n'est plus possible pour les villes d'absorber les flux croissants liés au transport de marchandises. Il y a encore quelques années, la fonction logistique, qui prend en charge cette activité, était considérée comme une fonction secondaire dans l'entreprise. Le rôle des logisticiens se limitait à l'organisation matérielle des transports de matières premières ou de produits finis. Cependant, les nouveaux enjeux de la société ont accéléré l'évolution de la fonction, devenue une des clés fondamentales de la compétitivité des entreprises. Au sein des villes, le domaine de recherche de la logistique urbaine vise à augmenter l'efficacité des flux de marchandises et améliorer la dynamique économique tout en supprimant les effets négatifs des nouvelles tendances de consommation (pollution, emplois précaires, bruit, insécurité, embouteillages, pénuries de terrain) (Lagorio et al., 2016). Il englobe divers projets d'innovation, dont la création d'infrastructures visant à faciliter la distribution urbaine. Parmi celles-ci, le modèle d'entrepôts urbains se développe. Ces infrastructures émergentes cherchent encore leur modèle durable d'existence, et un travail de recherche scientifique approfondi est nécessaire pour le construire. La difficulté technique de ce travail est de définir les meilleurs processus de gestion de ces espaces logistiques. En effet, contrairement aux entrepôts traditionnels de distribution construits sur des processus et équipements connus et standardisés (logistique 4.0) (Winkelhaus and Grosse, 2020), l'environnement contraint dans lequel s'intègrent les entrepôts urbains implique une refonte de ces processus. Les contraintes principales qui pèsent sur les entrepôts urbains sont : rareté et coût élevé de l'espace, perception négative des entrepôts et des flux de transport par les populations voisines, nécessité de modularité pour s'adapter à l'évolution des besoins et l'impératif de respecter l'environnement. Par conséquent, ce travail vise à répondre à la question de recherche suivante : « **Comment adapter les processus d'entreposage traditionnels pour faire des entrepôts urbains un modèle fiable, durable et duplicable ?** »

Notre approche nous a amenés à organiser notre manuscrit en cinq chapitres :

Le **chapitre 1** explicite le positionnement des travaux de recherche par rapport à la communauté scientifique et les sujets de société. Il y est défini le champ général dans lequel nos travaux de recherche s'inscrivent : développement durable, logistique urbaine, processus d'entreposage traditionnels.

Le **chapitre 2** définit la méthodologie de recherche. Nous présentons dans un premier temps notre question de recherche et les objectifs associés. Dans la deuxième section, nous décrivons l'ancrage industriel de ces travaux de recherche. Ce partenariat industriel nous a permis de mener une « recherche-intervention » dont le concept est présenté en section suivante. Enfin,

nous exposons le plan de mise en œuvre que nous avons défini pour atteindre les objectifs de ce projet de recherche.

Le **chapitre 3** présente deux états de l’art ayant permis de faire un état de la recherche dans les domaines étudiés. Tout d’abord, une revue bibliographique a été réalisée au sujet des entrepôts urbains afin d’explorer la connaissance scientifique sur ce sujet. Cette étape permet de collecter des informations sur le domaine de recherche exploré et recentrer les travaux sur les voies non encore explorées ou identifier les éléments manquants. Après avoir expliqué notre stratégie de revue de la littérature, nous exposons les résultats de ce travail et détaillons les lacunes de recherche identifiées.

Une fois les subtilités des entrepôts urbains assimilées, un état de l’art des solutions technologiques 4.0 employées pour le pilotage des entrepôts traditionnels a ensuite été réalisé. Pour cet état de l’art, nous présentons en plus un cadre d’analyse structuré autour des technologies de l’Industrie 4.0, des processus d’entreposage, des objectifs de performances des entrepôts de distribution et les niveaux de capacité atteints grâce à la mise en place des solutions 4.0. Celui-ci a permis de cadrer les résultats de l’étude et de structurer une schématisation pertinente de ceux-ci.

Le **chapitre 4** décrit dans un premier temps les caractéristiques du modèle des entrepôts urbains. Avec l’appui des connaissances acquises lors de l’étude de la littérature et des observations du terrain, définir ces caractéristiques permet de convenir d’un modèle générique. En faisant le comparatif de ces caractéristiques avec celles des entrepôts de distribution traditionnels, nous avons conclu que les solutions 4.0 utilisées pour améliorer les processus des entrepôts traditionnels, relevées dans l’état de l’art, n’étaient pas toutes duplicables et devaient être adaptées aux contraintes auxquelles font face les entrepôts urbains.

La deuxième partie de ce chapitre présente par conséquent une proposition d’un modèle d’intégration des groupes technologiques tirés de l’Industrie 4.0 dans le processus d’entreposage urbain. À l’aide d’observations du terrain, nous avons dans un premier temps modélisé le processus actuel de notre partenaire industriel. Nous avons ensuite proposé et modélisé des processus intégrant les technologies 4.0 et discuté de l’effet des propositions sur la performance des entrepôts urbains.

Le **chapitre 5** expose un cas d’application ayant pour but de valider l’approche proposée. Lors de l’analyse des propositions 4.0 faites en amont, nous avons conclu que la mise en œuvre de

systèmes de stockage et de prélèvement automatisés présente un intérêt pour le modèle des entrepôts urbains. Pour nous en assurer, nous avons mené une étude de cas appuyée par des données réelles du terrain.

Finalement, en dernière partie, nous concluons notre travail de recherche en exposant les apports, les limites et les perspectives de recherche.

L'originalité de ces travaux repose principalement sur deux aspects. D'une part, ils s'inscrivent dans un domaine de recherche avec des problématiques d'actualités dans lequel est constaté un vrai besoin d'instruire le modèle d'entrepôts urbains. D'autre part, ils visent à faire passer les nouvelles technologies de la fonction R et D (nécessitant des spécialistes ; applications « one shot ») vers les fonctions « métiers », en favorisant l'émergence de problématiques sur l'intégration de ces techniques dans l'entreprise apprenante.

Publications :

- Revues JCR :

[2022] EDOUARD A., SALLEZ Y., FORTINEAU V., LAMOURI S., BERGER A. "Automated Storage and Retrieval Systems: An Attractive Solution for an Urban Warehouse's Sustainable Development.". Sustainability. 2022, 14(15), 9518. JCR. DOI : <https://doi.org/10.3390/su14159518>

- Chapitre de livre :

[2021] EDOUARD A., SALLEZ Y., FORTINEAU V., LAMOURI S., BERGER A. "*Survey on a Set of Features for New Urban Warehouse Management Inspired by Industry 4.0 and the Physical Internet*". In: Service Orientation in Holonic and Multi-agent Manufacturing. **Springer International Publishing**, Studies in Computational Intelligence. Volume 952, 2021, Pages 449-459.

- Workshop Doctoral :

[2021] EDOUARD A., "Urban Warehouses in the era of Industry 4.0: a warehouse management tools review" Marco Garetti Doctoral Workshop (APMS) IFIP, Nantes, France.

[2020] EDOUARD A., « Logistique urbaine et technologies de l'entrepôt 4.0? Le cas de La Poste », GDR MACS - 27 -ème Journées STP, Nantes, France.

- Congrès Internationaux :

[2020] EDOUARD A., LAMOURI S., SALLEZ Y., FORTINEAU V., BERGER A. "Utilisation des approches de l'industrie 4.0 et de l'internet physique pour le déploiement d'entrepôts urbains. ". (MOSIM'20), Agadir, Maroc.

Chapitre 1. Contexte

Ce premier chapitre positionne nos travaux de recherche par rapport aux sujets de société tels que le développement durable, la logistique urbaine ou encore la gestion d'entrepôts de distribution, afin d'identifier les enjeux scientifiques et industriels qui en découlent.

1.1. Le développement durable et la logistique

La science a pour but d'apporter des solutions aux défis de la vie quotidienne. Les préoccupations majeures actuelles de la société sont le changement climatique, la perte de biodiversité et la pollution, majoritairement causés par l'activité humaine. L'anthropocène est un terme, sujet à débats, relatifs à une nouvelle ère géologique dans laquelle l'Homme a acquis une telle influence sur la biosphère qu'il en est devenu l'acteur central. Thierry Lefèvre, docteur en biophysique, diffuse par le biais de son blog « planète viable » (Lefèvre, 2013) (<https://planeteviable.org/> consulté le 31 octobre 2022) de l'information sur les résultats des recherches scientifiques en environnement et développement durable. Il décrit le rôle des activités humaines dans les crises planétaires. Les activités humaines peuvent se diviser en six classes : le prélèvement des ressources, la fabrication de biens, le transport des biens et des personnes, l'agriculture & l'élevage, l'urbanisation et la production et consommation d'énergie (Lefèvre, 2013). Ces activités sont à l'origine de diverses crises environnementales avec des effets de grande ampleur : érosions, dégradation des océans, réchauffement planétaire et changements climatiques, altération des cycles, diminution de la qualité des sols, déforestation, désertification et raréfaction de l'ozone. Ces crises environnementales ont de forts impacts sur les populations, tels que la raréfaction de l'accès à l'eau potable et aux soins sanitaires, les crises alimentaires, les réfugiés environnementaux, les catastrophes environnementales, la menace pour la santé ainsi que les pertes pour la culture et la science (réduction de l'inspiration culturelle et l'acquisition de connaissances scientifiques tirées de la nature avec la disparition des espèces). De par la nature de ces impacts sont impliquées des crises sociales. Par conséquent, pour préserver notre planète et protéger nos générations futures, chaque développement doit s'étudier et se faire de façon à ce qu'il soit durable.

Le développement durable est un mode d'organisation qui peut s'appliquer à un pays, une ville, une entreprise, ou pour un individu, dont l'objectif est de concilier les stratégies de développement suivantes :

- Économique, pour obtenir une croissance de qualité ;
- Environnementale, afin de protéger les ressources et être capable de répondre aux besoins actuels et futurs ;
- Sociale, pour garantir une équité entre les individus.

Dans le rapport Brundtland (Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations unies, 1987), une publication, officiellement intitulée « Our Common Future », le développement durable est défini comme « *un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs* ». En se basant sur cette définition, les états membres des Nations unies se sont fixés comme ligne directrice de répondre aux objectifs généraux suivants : éradiquer la pauvreté sous toutes ses formes et dans tous les pays, protéger la planète et garantir la prospérité pour tous. À partir de ces trois piliers, ils ont établi dix-sept « objectifs de développement durable » (ODD) (Figure 1).



Figure 1 : Liste des 17 ODD de l'ONU (ONU, 2022)

Bien qu'il ne s'agisse pas d'un objectif explicite, la logistique et plus précisément, la logistique urbaine est reconnue comme un domaine clé d'amélioration transversal et implicite dans plusieurs ODD. La mise en place de solutions de logistique urbaine durable contribue à la réalisation de plusieurs objectifs :

- ODD 9 - Bâtir une infrastructure résiliente, promouvoir une industrialisation durable qui profite à tous et encourager l'innovation.
- ODD 11 - Faire en sorte que les villes et les établissements humains soient ouverts à tous, sûrs, résilients et durables.
- ODD 12 - Établir des modes de consommation et de production durables.

La prise de conscience du développement durable progresse. Aujourd'hui, les consommateurs font un effort particulier pour acheter des produits fabriqués par des fournisseurs qui respectent l'environnement, recyclent et utilisent des matériaux naturels. Cela traduit un changement sociétal fondamental qui exerce une pression sur chaque entreprise.

De plus, la directive de l'Union européenne (UE) sur le développement durable des sociétés prévoit des règles strictes qui rendront obligatoire la publication de rapports sur le développement durable en 2023 pour des milliers d'entreprises. Faute de quoi les entreprises se verront infliger de lourdes sanctions en cas de non-respect.

La logistique est une discipline qui vise à « *planifier, exécuter et maîtriser les mouvements et les mises en place des personnes ou des biens, ainsi que les activités de soutien liées à ces mouvements et ces mises en place, au sein d'un système organisé pour atteindre des objectifs spécifiques* », selon la définition donnée par l'AFNOR (Pan, 2010). Autrement dit, la logistique sert toutes les activités économiques qui ont besoin de mouvoir des marchandises voire des personnes. Sur la base de la définition de la durabilité, nous pouvons considérer qu'un système logistique est durable s'il contribue à la croissance économique globale ainsi qu'à l'équité sociale, sans dégrader l'environnement naturel. Cependant, la croissance générale de l'économie actuelle et la forte progression du commerce électronique impliquent une augmentation des flux de marchandises. Les activités de fret urbain ont, dans de nombreux cas, des répercussions directes sur l'environnement, la société et l'économie. Certains impacts, tels que la pollution atmosphérique et sonore, les accidents de la circulation, les encombrements et les émissions de gaz à effet de serre, conduisent à des résultats non durables, tels que le changement climatique, des résultats médiocres en matière de santé et de sécurité, des retards

et, finalement, des villes invivables, dans lesquelles il est prévu que 66 % de la population mondiale soit regroupée en 2050 (ONU, 2019).

Le transport de fret en ville représentant une fonction essentielle à l'économie et à la vie des urbains, le domaine de recherche de la logistique urbaine a pour objectif d'étudier et développer des solutions visant à réduire les impacts négatifs du fret urbain tout en veillant à ne pas diminuer la qualité de service.

1.2. Logistique urbaine

Taniguchi et Thompson définissent la logistique urbaine comme « *le processus d'optimisation totale des activités de logistique et de transport, réalisées par des entreprises privées, à l'aide de systèmes d'information avancés, dans les zones urbaines en tenant compte de l'environnement du trafic, de la congestion du trafic, de la sécurité du trafic et des économies d'énergie dans le cadre d'une économie de marché* » (Taniguchi and Thompson, 2002). Autrement dit, la logistique urbaine vise à optimiser le transport urbain de marchandises, en équilibrant la croissance économique et le respect de l'environnement, la sécurité et les économies d'énergie. Elle s'inscrit dans un domaine de recherche complexe qui doit évoluer en même temps que la ville et s'adapter aux innovations technologiques, aux changements des modes de consommation et aux développements économiques plus larges.

La consommation des ménages a subi de profondes modifications avec le développement du e-commerce. Le chiffre d'affaires du e-commerce a été multiplié par plus de 13 en 17 ans en France. Il correspondait à 8,4 milliards d'euros en 2005 et a atteint 112,2 milliards d'euros en 2021, affichant une progression de 8,5 % par rapport à 2019 (Fevad, 2022).

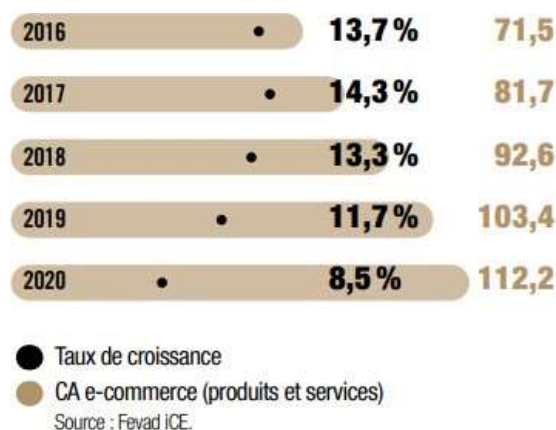


Figure 2 : Chiffre d'affaires du e-commerce en France (en milliards d'euros) (Fevad, 2022)

La vente en ligne représente aujourd'hui 13,4 % du commerce de détail. Sur les 67 millions d'habitants français, près de 42 millions ont réalisé un achat en ligne en 2020 (Fevad and Mediamétrie, 2021).

Plus généralement, le chiffre d'affaires du e-commerce s'élevait à 4213 trillions de dollars dans le monde en 2020, représentant 17,8 % du total du commerce de détail (eMarketer, 2021).

Le développement du e-commerce a entraîné une augmentation rapide de la demande de nouveaux services de distribution urbaine, tels que la « livraison rapide », la « livraison le jour j » (allant parfois jusqu'à des options de livraison en 1 à 2 heures), la « livraison directe au consommateur ». Parmi les modes de livraison liés aux achats en ligne, la réception à domicile reste la plus courante avec un taux de pénétration de 86,2 %, suivie par les points relais avec 64,3 % et le « click & collect » (le consommateur passe commande sur un site e-commerce, « *clique* » pour commander en ligne et se rend dans le point de vente physique pour « *collecter* » son produit) particulièrement mis en avant durant les périodes de confinement liées à la crise du Covid 19, avec 41 % des acheteurs qui y ont eu recours (Fevad and Mediamétrie, 2021). De nouveaux modes de livraison se répandent tels que les livraisons « au travail » ou « en consigne ».

L'acheminement des marchandises se confronte à un triple enjeu : la satisfaction client, le coût et les contraintes socio-environnementales (Janjevic and Winkenbach, 2020). Cette activité a fait émerger de nombreuses préoccupations au sein des villes telles que les émissions de gaz à effet de serre, le bruit, l'insécurité, les embouteillages, les emplois précaires, les pénuries de terrain et des expansions incontrôlées d'installations logistiques. De plus, la Fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) estimait en 2016 un taux de succès de la livraison lors du premier passage aux alentours de 84 % (Moncef et al., 2018). Or, ces échecs n'ont pas pour seule conséquence le sentiment d'insatisfaction ressenti par le consommateur, ils génèrent également des surcoûts liés aux tentatives de relivraison qui leur font suite.

Au-delà des attentes traditionnelles des consommateurs (rapidité, coûts, qualité), les e-acheteurs se montrent de plus en plus concernés par les démarches écoresponsables. Cette considération pousse ces acheteurs à regrouper les commandes afin de limiter les livraisons (71 % d'entre eux), privilégier l'achat auprès de sites français (68 %), la livraison en point relais (66 %) et la livraison à domicile (57 %) ou encore l'achat de produits issus de l'économie circulaire (produits écoconçus, biosourcés, recyclés, réparables, seconde-main) (Fevad and Mediamétrie, 2021). Par conséquent, les distributeurs et les partenaires de la chaîne logistique sont amenés à repenser leurs avantages concurrentiels et incités à utiliser de nouveaux canaux de distribution plus efficaces.

Afin d'accompagner ces nouveaux besoins, la logistique urbaine fait appel à plusieurs disciplines comme l'aménagement du territoire, les nouvelles technologies d'information et de communication, le développement des technologies de véhicules et les stratégies logistiques et de transport innovant. Aujourd'hui, nous pouvons observer, tant dans la pratique que dans la recherche, le développement de mesures de pointe en matière de logistique urbaine. Nous en décrivons quelques-unes ci-après.

1.2.1. De nouvelles solutions de livraison

Parmi les nouvelles solutions de livraison se distingue par exemple la livraison collaborative. Ce mode de fonctionnement s'appuie sur un réseau de particuliers qui sont en charge de réceptionner et livrer les colis en cas d'échec de livraison par le transporteur moyennant une rémunération (Moncef et al., 2018). Le modèle permet alors d'éviter l'échec de livraison, de satisfaire le client et de réduire l'impact négatif d'une relivraison. Une autre solution intéressante pour limiter les échecs de livraison, qui favorise la réduction du trafic et regroupe les livraisons sont les consignes automatiques (Figure 3) (Iwan et al., 2016). Elles s'apparentent à des regroupements de boîtes aux lettres ou de casiers, non nominatifs, placés dans des lieux fréquentés par les consommateurs particuliers (centres commerciaux, super marchés, parkings, gares, stations service, etc.) dans lesquels sont déposés les colis. Le destinataire accède à son colis à toute heure avec un code d'accès pour déverrouiller le casier qui lui a été assigné. Moins contraignants que les points relais ou les drives (pas d'horaires de fermeture), ils se sont largement démocratisés.



Figure 3 : Exemple de consignes Pickup

1.2.2. Des moyens de transport écologiques

Au niveau des moyens de livraison, le développement de moyens de transport plus écologiques est en plein essor. Parmi les travaux les plus accomplis, on observe le déploiement des biocarburants (betterave, canne à sucre, huiles usagées, algues, résidus forestiers...), l'électrification, l'usage du fluvial et du train, ou encore les vélos-cargos (Nikitas et al., 2017). Dans cette dernière publication, les auteurs citent aussi des solutions encore à un stade expérimental. Par exemple, l'Hyperloop est un train supersonique composé d'une capsule propulsée par un champ magnétique circulant dans un tube exempt d'air (Armagan, 2020). Il est capable de se déplacer à plus de 1 000 km/h. Cette solution a pour avantage un coût réduit en énergie et assure un transfert de marchandises en un temps record. On observe aussi un accroissement du nombre d'études sur les véhicules autonomes. Leurs atouts reposent principalement sur un moteur électrique non polluant et une fluidité de conduite entraînant une réduction des accélérations et des freinages intempestifs, très gourmands en énergie. Trains, navettes, camions, voitures, c'est un large panel de véhicules autonomes qui voit le jour progressivement. Le nombre d'études sur des réseaux souterrains de logistique est aussi en croissance (G.S.N. Visser, 2018; Ren et al., 2019). Cette solution vise à connecter les plus grandes villes d'un pays avec un métro logistique dédié au transport de marchandises et prône la forte réduction de la circulation de marchandises sur les voies très empruntées par le grand public (routière, ferroviaire, aérienne), la pollution et la consommation d'énergie.

Dans la catégorie des robots nous retrouvons les robots roulants ou volants (drones et chariots autonomes) qui dotés d'un GPS livrent les colis à leurs destinataires de façon autonome. Les chariots suiveurs semi-autonomes quant à eux secondent les livreurs lors de leurs tournées (voir l'expérimentation de La Poste, Figure 4). Plutôt que d'utiliser une voiture, ces derniers peuvent se déplacer à pied, suivis de leur assistant. Ces robots fonctionnant avec une batterie électrique participent à la réduction des gaz à effets de serre, mais aussi à la diminution des nuisances sonores dans les villes.



Figure 4 : Chariots suiveurs en expérimentation par La Poste

Au-delà des innovations technologiques des véhicules, pour que les transports du futur soient plus écologiques et efficaces, ils doivent être associés à des installations de chargement intelligentes. À l'aide de logiciels de gestion, de planning et d'analyse d'expédition, les chargements se font en fonction de l'itinéraire et des arrêts prévus et les marchandises sont organisées afin que les premiers articles à livrer soient ainsi chargés en dernier et inversement. Les évolutions peuvent aussi se constater au niveau des choix stratégiques pris par les acteurs du secteur tel que l'apparition du transport multimodal. La notion de multimodalité dans le transport de marchandises, qui consiste à utiliser différents modes de transport consécutivement afin d'acheminer les produits de façon la plus efficiente, reposait sur les trois modes de transport principaux : la route, la navigation fluviale et maritime, et le ferroviaire (He et al., 2021). Aujourd'hui, avec les travaux réalisés pour développer de nouvelles solutions, la multimodalité est rentrée dans les pratiques courantes des acteurs du secteur. Cette pratique, aussi désignée « comodalité » depuis 2006 par la Commission européenne dans le domaine de la politique des transports, offre une utilisation optimale et durable des ressources et apporte des avantages économiques, écologiques et sociaux indéniables.

L'optimisation des transports va de pair avec celle des installations logistiques pour lesquelles nous observons aussi des innovations, décrites ci-après.

1.2.3. Nouvelle génération d'installations logistiques

Cross-docking. Les installations logistiques appelées centres de consolidation urbains, centres de distribution urbains ou encore points de transit, situés en périphérie des villes, servent un mode d'organisation, appelé "cross-docking" (Anderluh et al., 2020; López and Cáceres, 2020; Settey et al., 2021). Ces installations sont assimilables à des plateformes logistiques définies comme : « *bâtiment dans lequel les marchandises sont stockées sur une durée de temps très*

limitée (moins de 24 h), dans le cadre d'une opération de dégroupage/groupage. » (Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer, 2010). Elles reçoivent des livraisons sur de gros véhicules de fret en provenance de centres de distribution internationaux, nationaux, régionaux ou locaux et assurent le tri et la mutualisation de la marchandise afin qu'elle soit livrée à l'intérieur de la zone urbaine centrale en utilisant des modes de transport doux et avec un chargement et un nombre de véhicules optimisés au maximum.

Entrepôts urbains. Le modèle d'entrepôt urbain consiste à rapprocher le stockage des marchandises le plus près possible des consommateurs finaux, dont la majorité vit en zone urbaine (Carneiro Freire et al., 2020). Leur situation permet que le produit soit livré par le biais de mode de transport « doux » (véhicules électriques, vélo, marche) et de répondre aux attentes des consommateurs (livraisons rapides, flexibles, personnalisées, écologiques et bon marché). Ce modèle vise à se développer afin de devenir un allié de taille pour les commerçants qui peuvent intégrer les entrepôts urbains dans leur stratégie d'omnicanalité et ainsi permettre aux clients de combiner comme ils le souhaitent les canaux d'achat et de retrait (achat en ligne et retrait en magasin, visite en magasin et livraison, etc.). Similairement aux centres de consolidation urbains, les entrepôts urbains visent à mutualiser les livraisons, cependant ils assurent de plus une fonction de stockage de plus longue durée. En effet, la définition donnée par le ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer sur les entrepôts précise la durée de stockage des produits : *« On appelle entrepôt un bâtiment dans lequel les marchandises sont stockées plus de 24 heures »* (Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer, 2010).

Les entrepôts urbains s'inscrivent dans une chaîne logistique ou d'approvisionnement composée de plusieurs acteurs, installations logistiques, activités, moyens de transports et flux. Également connue par son nom en anglais « Supply Chain », ses composantes pour desservir les centres-villes sont décrites dans la section suivante.

1.3. Chaîne d'approvisionnement des centres-villes

La Figure 5, inspirée de (Beamon, 1999) présente la chaîne logistique desservant les centres-villes. La chaîne logistique est définie comme *« le processus composé des activités de planification, de mise en œuvre et de contrôle des flux et stockage de marchandises, de services et d'informations connexes, du point d'origine au point de consommation, dans le but de se conformer aux exigences d'un client »* (Mentzer et al., 2001). Autrement dit, la chaîne logistique est une fonction stratégique qui lie toutes les opérations qui sont indispensables pour qu'un produit ou une marchandise arrive jusqu'au client final. Elle implique trois types de flux :

physiques (matières premières, produits semi-finis et finis, retours), financiers et d'informations et quatre étapes clés associées à des moyens de transport et des structures : l'approvisionnement (fournisseurs), la production (industriels), le stockage (entrepôts de stockage) et la distribution (entrepôts de distribution). Suite à la fabrication des produits, les entrepôts de distribution (internationaux, nationaux, régionaux ou locaux) reçoivent les produits finis des entrepôts de stockage et gèrent leur acheminement aux consommateurs finaux, selon la stratégie de distribution choisie.

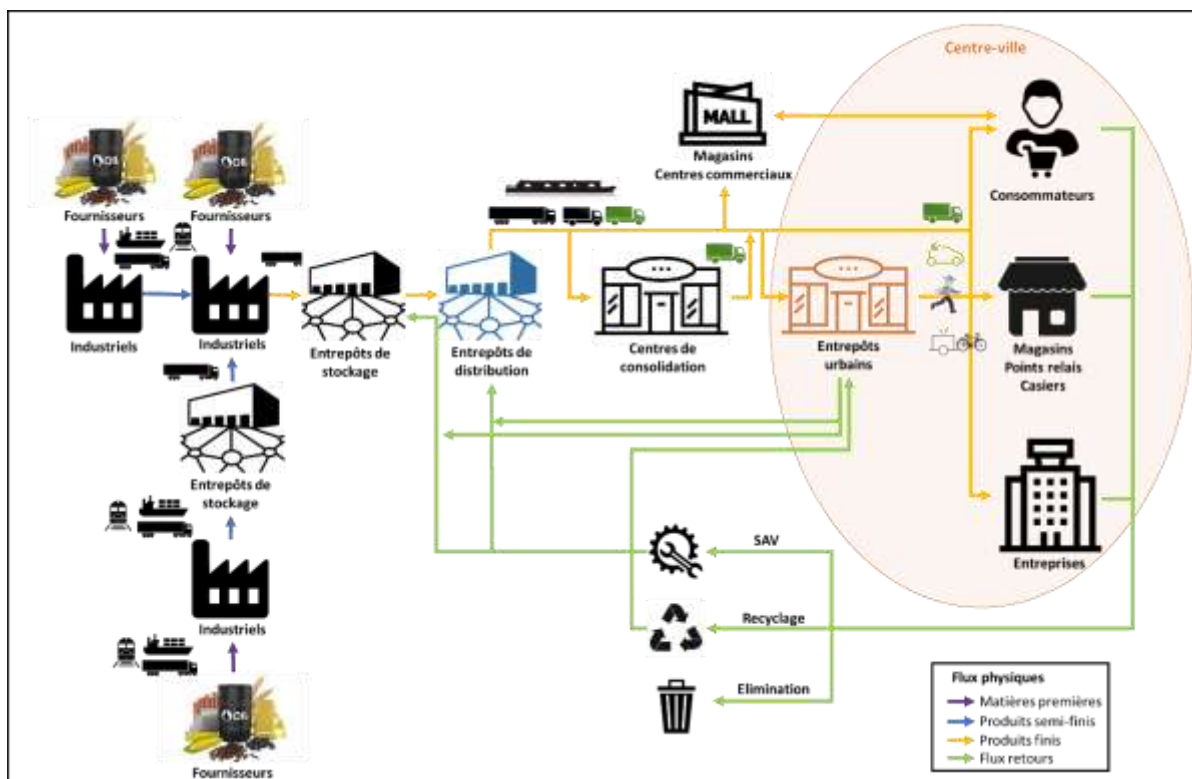
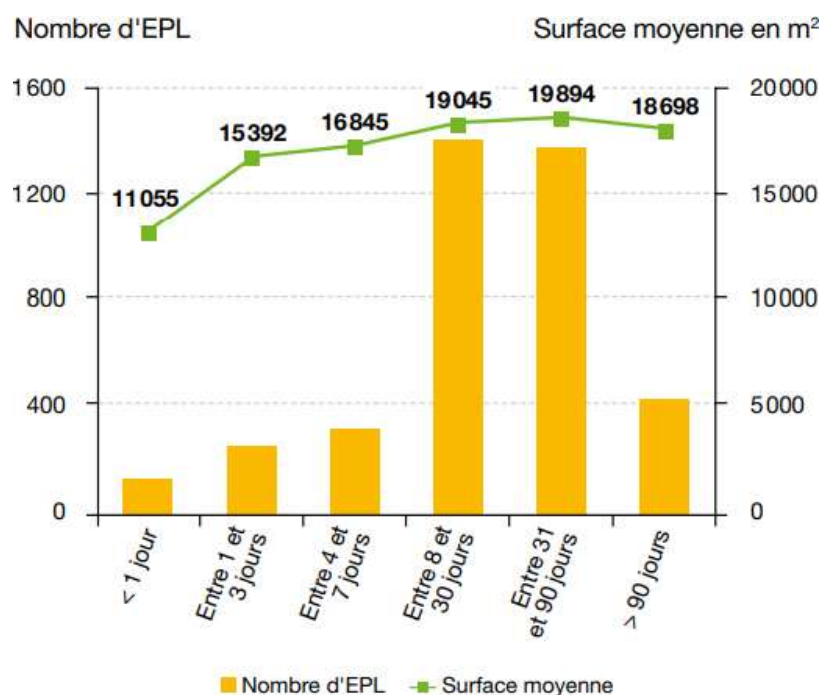


Figure 5 : Chaîne logistique des centres-villes.

1.3.1. Les entrepôts de distribution traditionnels

Traditionnellement, le schéma de distribution des marchandises s'appuie sur un entrepôt centralisé ou un ensemble d'entrepôts continentaux/régionaux/locaux spécialisés par marché (icône bleue dans la Figure 5), que l'on appellera « entrepôts traditionnels » (Arslan et al., 2021). Ils sont situés à l'extérieur des villes, en partie en raison des coûts d'infrastructure moins élevés et la disponibilité de terrains. Dablanc et Rakotonarivo ont rapporté que la distance moyenne en 2008 entre le centre-ville de Paris et les entrepôts qui le desservent était de 16 km (Dablanc and Rakotonarivo, 2010). Ces installations sont de grands espaces, tel que le montre la Figure 6, capable d'accueillir un volume important de produits à stocker puis à préparer pour répondre aux commandes des consommateurs (Bartholdi and Hackman, 2019).



Champ : EPL de plus de 5000 m², France métropolitaine.
 Source : SDES

Figure 6 : Nombre d'entrepôts/plateformes logistiques (EPL) et surface moyenne en 2016 en France, selon la durée de stockage (Commissariat général au développement durable, 2019)

Adeline Heitz (Heitz, 2021) a proposé une cartographie des installations logistiques en Île-de-France en 2017 à partir des données de l'INSEE. Elle montre l'emplacement des installations logistiques en fonction de leur taille et de la densité de la zone (Figure 7). L'auteur a maillé la zone en « urban unities » correspondent à des profils urbains et logistiques et donne les descriptions suivantes : « La classe 1 correspond aux municipalités à forte densité urbaine et à un petit nombre d'installations logistiques (1,3 % du total). La classe 2 correspond aux banlieues, densément peuplées avec 18,9 % des installations logistiques (en nombre), mais qui ne représentent que 8 % des surfaces cumulées. Les classes 3 à 6 représentent les banlieues avec un gradient de faible densité de population et respectivement 41,2 %, 24,1 %, 5,9 %, et 4,6 % du total des installations logistiques. Ces municipalités suburbaines concentrent la plupart des installations logistiques. La classe 6 correspond aux zones rurales où l'on trouve un petit nombre d'installations logistiques (3,5 %). »

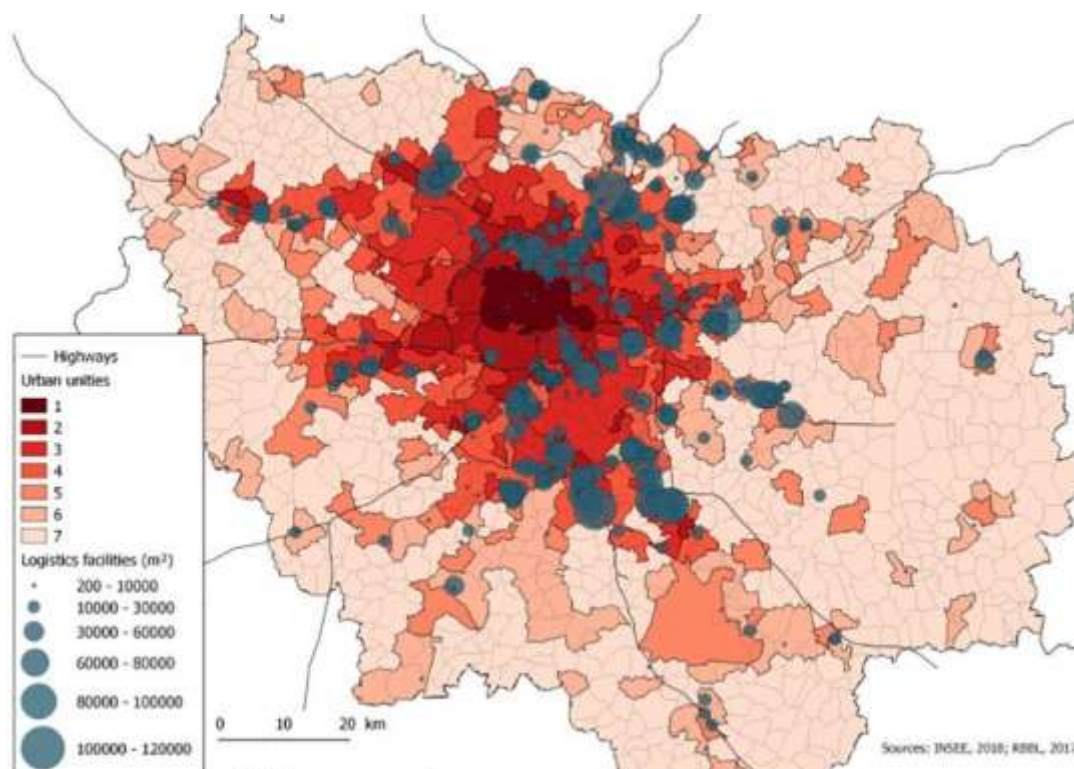


Figure 7 : Géographie des installations logistiques en Île-de-France en 2017 (Heitz, 2021)

La mission principale de ces entrepôts est d’accompagner leurs clients afin qu’ils répondent aux sept « R » de la logistique, l’un des concepts les plus importants de la gestion logistique : *“deliver the right product, in the right quantity and right quality, in the right place, at the right time, at the right price, to the right customer”* (livrer le bon produit, en quantité et en qualité correctes, au bon endroit, au bon moment, au bon prix, au bon client) (Wang, 2016). Pour ce faire, l’entrepôtage traditionnel est constitué de cinq macro-processus principaux décrits ci-après.

1.3.2. Processus des entrepôts

L’activité d’entrepôtage traditionnel est composée des macro-processus suivants : réception, stockage, préparation des commandes, expédition et les fonctions transverses ; et de sous-fonctions, présentées dans la Figure 8, inspirée des travaux de V. Khanzode et B. Shah (Khanzode and Shah, 2017).

1. Le processus de réception est le premier de l’entrepôt. Il implique l’arrivée des marchandises par camion (super camions, poids lourds, camions porteurs), provenant des fabricants et des fournisseurs, au niveau des nombreux quais de réception et leur

déchargement. Une fois déchargées, elles peuvent être vérifiées, parfois traitées (par exemple, déballées et remballées) et préparées pour le stockage.

2. Le processus suivant, le stockage, consiste à disposer les articles dans des lieux de stockage selon les directives d'affectation et de zonage. La zone de stockage se compose généralement de deux parties : la zone de réserve, où les produits sont stockés de la manière la plus économique, en grandes quantités sur des rayonnages à palettes, et la zone avant, où ils sont stockés en plus petites quantités sur des étagères pour être facilement récupérés par un préparateur de commandes. Le transfert des articles de la zone de réserve vers la zone avant est appelé réapprovisionnement.
3. Ensuite, la préparation des commandes fait référence à la recherche et au retrait des articles de leurs emplacements de stockage correspondant aux commandes des clients. Les articles sont ensuite triés et les commandes consolidées afin que les articles destinés à un même client puissent être regroupés pour une seule expédition.
4. Pour finir, les produits sont vérifiés, emballés et étiquetés pour être expédiés par véhicules (camions porteurs, véhicules utilitaires légers) vers le centre-ville pour la livraison du dernier kilomètre à destination des consommateurs finaux. Les entrepôts peuvent également remplir des fonctions à valeur ajoutée pour personnaliser l'expérience du consommateur, comme l'ajout de pièces ou de manuels aux emballages préparés, le test ou la réparation des produits, et la gestion de la collecte des emballages vides ou des produits pour le recyclage.
5. Dans la gestion des entrepôts, on peut également distinguer des fonctions transverses : la sécurité et la sûreté des lieux, la gestion des ressources ainsi que la gestion des flux.

Pour assurer cette gestion, les entrepôts sont équipés de logiciels de gestion, des Warehouse Management System (WMS), qui concentrent les données et proposent des tableaux de bord pour chaque activité et une vue d'ensemble. Ces systèmes permettent l'évaluation de la performance de la structure et le suivi des indicateurs facilitant en continu la gestion de l'entrepôt. Ceux-ci sont détaillés dans la section suivante.

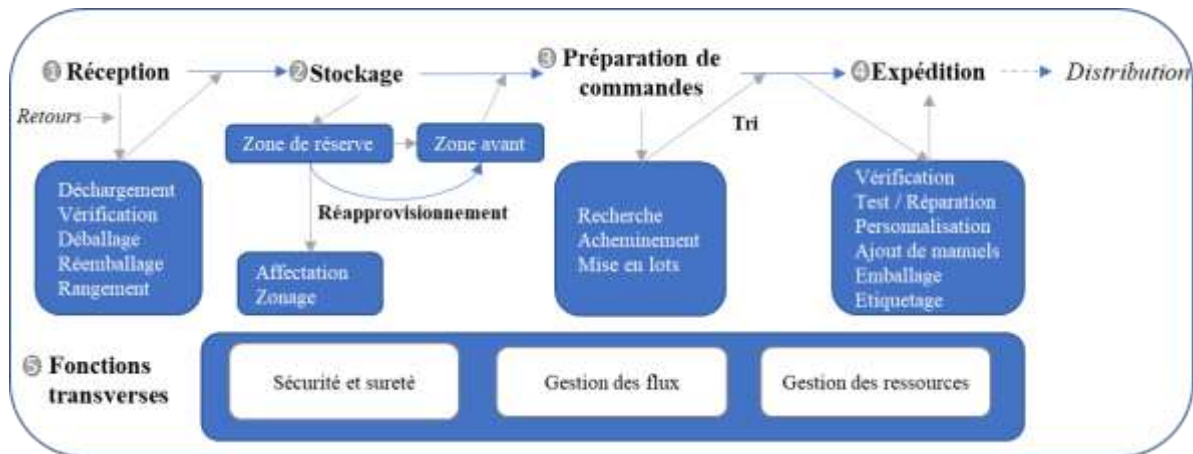


Figure 8 : Les macro-processus de l'entrepôt avec leurs sous-fonctions.

1.3.3. Critères de performance

Pour B. Rouwenhorst et al. (Rouwenhorst et al., 2000), les critères de performance suivants sont reconnus dans le domaine de l'entreposage : les coûts d'investissement et d'exploitation, le volume et la flexibilité, le débit, la capacité de stockage, le temps de réponse et la qualité d'exécution des commandes (la précision).

Selon les critères cités, nous proposons les indicateurs correspondants suivants en termes de performance :

- **Sûreté et sécurité** : la sûreté est l'ensemble des mesures de protection contre les actes de malveillance (vol, vandalisme, terrorisme) ; la sécurité regroupe les mesures de prévention et de secours contre les sinistres (risques naturels ou technologiques) (ASLOG and FAQ Logistique, 2002).
- **Flexibilité** : la flexibilité, appelé aussi la résilience, est définie comme une capacité d'adaptation à des phénomènes d'incertitude et d'urgence (événements externes : provenant des clients, des concurrents, des partenaires (sous-traitants, fournisseurs), de la technique, des règlements ; et internes : pannes, défauts, incidents techniques, incidents sociaux, absences, problèmes logistiques) (Everaere and Perrier, 1999).
- **Réactivité** : la réactivité est la capacité d'une structure à répondre à l'évolution des marchés voire anticiper les changements à venir ("Dictionnaire Larousse," 2022).
- **Efficacité** : l'efficacité des opérations d'une organisation repose sur l'optimisation de l'utilisation de ses ressources (temps, humains, équipements, stocks et argent) (Lagin et al., 2022).
- **Rapidité** : la rapidité correspond à la capacité à mobiliser ses compétences afin de réaliser correctement les tâches en un minimum de temps.
- **Qualité** : la qualité est l'ensemble des propriétés et des caractéristiques d'un produit (bien ou service) qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire les besoins de ses consommateurs.

Dans le contexte de la gestion des entrepôts, compte tenu de ce qui a été présenté ci-dessus, ces indicateurs peuvent se traduire par les objectifs de performance suivants :

- Réduire le volume des stocks nécessaires ;
- Améliorer : la sécurité des produits et des personnes, l'ergonomie, la localisation et navigation, les trajets et allocations des ressources, la manipulation, la traçabilité, la flexibilité et la gestion ;
- Utiliser plus efficacement les infrastructures disponibles.

Ces indicateurs de performance s'appliquent aux entrepôts de distribution traditionnels, mais l'émergence du e-commerce a favorisé l'apparition de nouvelles structures logistiques, modifiant les organisations. Ce nouveau schéma de distribution et ses impacts sont développés ci-après.

1.3.4. Nouveau schéma de distribution

Traditionnellement, les livraisons étaient opérées directement par des entrepôts de distribution classiques, situés en lointaine périphérie, rarement en capacité de couvrir de manière fiable les livraisons le lendemain et/ou le jour même dans les zones urbaines (Arslan et al., 2021). Ce fonctionnement implique de nombreux kilomètres à parcourir, avec des camions moins remplis, et donc à la fin un coût plus élevé pour le consommateur, plus d'émission, plus de bouchons et plus de pollution. C'est pour cela que les stratégies actuelles pour la distribution de la marchandise en ville mettent l'accent sur la mutualisation des livraisons et la proximité des installations logistiques avec les consommateurs finaux, possibles avec l'usage des nouvelles générations d'entrepôts. Parmi elles, les entrepôts urbains présentent un fort potentiel (icône orange dans la Figure 5).

Actuellement, le modèle d'entrepôts urbains est un mode d'organisation dont le fonctionnement interne n'a fait l'objet d'aucune étude approfondie par la communauté scientifique, alors qu'il est de plus en plus développé par les industriels et tend à se démocratiser dans les villes. Dans ce cadre, cette thèse a pour objectif de décrire l'organisation et les fonctionnalités des entrepôts urbains et d'optimiser les processus afin de rendre le modèle durable et qu'il s'inscrive dans les pratiques de la logistique urbaine à long terme.

1.4. Conclusion

L'innovation ayant une part importante dans tous les secteurs pour répondre aux besoins des consommateurs, les entreprises se questionnent perpétuellement sur comment proposer des services toujours plus réactifs, moins coûteux, moins polluants afin de pérenniser ceux existants

et créer de nouvelles sources de revenus. Aujourd'hui, les entreprises s'insèrent dans un contexte où elles doivent faire face aux nouveaux modes de consommation en ligne et répondre à un intérêt grandissant de leurs clients pour une consommation propre et durable, impératif dans le contexte actuel développé dans ce chapitre.

Impactée de plein fouet par ces changements, la fonction logistique se trouve plongée au cœur d'une problématique basée sur l'amélioration permanente de sa performance (économique et environnementale) d'une part, doublée d'une recherche d'accroissement de valeur ajoutée d'autre part. Les industriels du secteur de l'e-logistique se confrontent à un enjeu stratégique de taille, qui est de répondre à la demande croissante des cybermarchands, à la recherche de partenaires compétents. Pour ce faire, le concept des entrepôts urbains intéresse de plus en plus les industriels qui y voient une opportunité pour satisfaire leurs clients et les attentes en termes de développement durable de la société. Cependant, cela reste une boîte noire dont l'organisation et les fonctionnalités doivent être décrites.

Au-delà de ce besoin de caractérisation, les processus internes doivent être fiabilisés afin que le modèle devienne pérenne. Le concept de l'Industrie 4.0 est introduit pour révolutionner le domaine de l'industrie, présentant une nouvelle façon d'organiser nos processus et méthodes de travail (Barreto et al., 2017; Moeuf et al., 2018). S'appuyant sur une mutation numérique des opérations possible avec l'émergence de nouvelles technologies, cette forme de fabrication intelligente a révolutionné la façon dont les entreprises fabriquent, améliorent et distribuent leurs produits. Étendu au domaine de la logistique avec l'apparition du terme « logistique 4.0 », son développement vise à répondre aux enjeux d'amélioration de la compétitivité de la chaîne logistique et de maîtrise de son impact environnemental (Radivojević & Milosavljević, 2019; K. Wang, 2016; Winkelhaus & Grosse, 2020). Cette « nouvelle » logistique a mené à repenser les processus notamment des entrepôts logistiques traditionnels et est devenue le standard de gestion de ces espaces. Par conséquent, nous nous sommes interrogés sur la signification d'intégrer les solutions 4.0 dans les processus d'entrepôt et leur adaptabilité pour les entrepôts urbains.

Pour répondre aux problématiques impliquées par le contexte présenté, nous avons suivi une méthodologie de recherche, présentée dans le chapitre 2.

Chapitre 2. Problématique et méthodologie de recherche

Dans ce chapitre nous présentons la méthodologie suivie pour développer nos travaux de recherche. Nous rappelons l'objectif de la recherche et proposons des objectifs spécifiques pour cadrer les étapes réalisées. Dans une deuxième partie, nous présentons notre partenaire industriel qui nous a ouvert ses portes pour mener ces travaux de recherche. Finalement, nous décrivons le plan de mise en œuvre qui nous a permis d'atteindre les objectifs de recherche.

2.1. Problématiques de recherche et objectifs

L'objectif principal de cette thèse est de décrire l'organisation et les fonctionnalités des entrepôts urbains et d'optimiser leurs processus afin de rendre le modèle durable et de l'inscrire dans les pratiques de la logistique urbaine à long terme. Cet objectif principal se décline en deux problématiques :

- 1. Quelles sont les fonctionnalités, caractéristiques et processus des entrepôts urbains ? Et en quoi se différencient-ils des entrepôts traditionnels ?**
- 2. Comment adapter les processus d'entreposage 4.0 traditionnels aux entrepôts urbains pour faire de ce nouveau modèle d'entrepôts un modèle fiable, durable et duplicable ?**

Nous avons défini quatre tâches spécifiques afin répondre à ces problématiques :

- Explorer le domaine de recherche scientifique des entrepôts urbains et identifier les pratiques de gestion des entrepôts traditionnels de distribution employant les technologies tirées de l'Industrie 4.0 ;
- Définir le concept d'entrepôts urbains et définir les caractéristiques d'un modèle générique ;
- Proposer des processus optimisés par l'usage de groupes technologiques de l'Industrie 4.0 en réponse aux contraintes de l'environnement urbain ;

- Vérifier l'approche avec un cas d'application et des données chiffrées de terrain.

La création d'un partenariat avec un industriel nous a aidé à répondre à certains de ces objectifs. Nous présentons ce partenaire ci-après.

2.2. Ancrage industriel

Les présents travaux de recherche découlent d'une demande émise par le partenaire industriel La Poste. Cette thèse a été financée par un partenariat académique-industriel entre le LAMIH de l'école Arts et Métiers et La Poste.

Depuis sa création au XVII^e siècle, La Poste, entreprise française de services postaux, a subi beaucoup de changements. Dernièrement, l'entreprise est confrontée à de profonds défis : la baisse du volume de courriers (-6,7 % par an en moyenne sur la période 2014-2019, accéléré par la crise sanitaire avec jusqu'à -18,1 % en 2020) (Cour des comptes, 2021), accompagnée d'un nombre croissant de concurrents sur un marché mondial bien développé qui regorge de nouvelles technologies de communication.

En réponse à cette situation, le groupe a présenté son nouveau plan stratégique « La Poste 2030 » en février 2021, qui vise à développer des offres pour mieux servir ses clients et leur simplifier la vie (La Poste, 2021). Pour y parvenir, le choix s'est porté sur la diversification en proposant de nouveaux services de proximité. Ces services visent à s'appuyer sur l'expérience et la couverture territoriale de son réseau postal et sur les compétences des filiales créées ou acquises pour atteindre un nouvel équilibre économique et de préserver les emplois et le réseau. Aujourd'hui, la très grande majorité des colis livrés au domicile des particuliers l'est déjà par La Poste. La Poste se veut résolument offensive dans le domaine du B to C (business to customer), ambitionnant de s'y imposer comme « le » prestataire logistique de référence. Dans le cadre de la logistique urbaine, les bureaux de quartier constituent bien entendu des points de retrait privilégiés. Du point de vue des flux d'information, des efforts importants ont été également entrepris en matière de traçabilité, avec en particulier le système d'alerte via e-mail (ou SMS). La Poste est enfin le seul à pouvoir livrer n'importe quel ménage en France, il n'y a pas en effet de réseau plus maillé ou plus capillaire que le sien. Grâce à ces atouts, le groupe entend bien devenir un des leaders de l'e-logistique urbaine.

Parmi les nouveaux services testés ces dernières années, l'offre « stock de proximité » propose une solution logistique basée sur des mini-entrepôts au cœur de la ville (entrepôts urbains) pour rapprocher le stockage de marchandises de ses clients et de répondre de manière plus efficace

et durable aux besoins de livraisons urgentes. Cette offre est passée d'un niveau expérimental à un niveau stratégique en intégrant la marque « Log'issimo », lancée en décembre 2021, qui regroupe les solutions logistiques de proximité du premier au dernier kilomètre proposées par l'entreprise. Elle s'appuie sur la disponibilité de mètres carrés bien placés dans les centres-villes, espaces qui étaient devenus de véritables friches foncières (anciens centres de tri postaux) et son réseau de plus 80 000 facteurs dans tout le pays, afin de proposer une offre de mutualisation des flux et de la livraison en « instantanée » dans les villes.

Pour fonctionner et perdurer, La Poste a dû mettre l'accent sur le développement d'installations logistiques efficaces, le modèle d'entrepôts urbains étant encore très peu répandu et validé.

La difficulté rencontrée par le partenaire industriel était de définir les meilleurs processus de gestion de ces espaces logistiques afin de développer l'offre et répondre aux attentes des clients. Afin de répondre à cette problématique industrielle, les gérants de l'offre ont donc convenus de se rapprocher de la communauté scientifique pour être accompagnés dans la formalisation des meilleures méthodes de gestion pour ces espaces, origine de ce partenariat et de ces travaux de recherche, menés dans le cadre d'une CIFRE. Ce partenariat a permis de suivre une méthodologie de recherche appelée « recherche-intervention », présentée ci-après.

2.3. La recherche-intervention

La méthodologie « recherche-intervention » (RI) met en lien un sujet de recherche avec une problématique industrielle. Les objectifs d'une RI peuvent être multiples. Elle peut consister à accompagner des transformations où l'entreprise sollicite un regard extérieur, il peut s'agir d'expérimenter de nouveaux modèles et de les conceptualiser, ou encore de concevoir de nouveaux outils voire d'accompagner l'entreprise à mener toute une transformation des processus organisationnels (Aggeri, 2016). Les connaissances produites dans ce contexte de recherche seront bénéfiques non seulement pour des praticiens du terrain en apportant des solutions pertinentes à des problèmes concrets, mais aussi intéressantes du point de vue des scientifiques. La RI implique une théorisation des faits relevant du terrain. Les recherches de terrain sont dites d'intervention, dans le sens où le chercheur intervenant est immergé dans la problématique étudiée et il interagit avec des acteurs du terrain (Jönsson and Lukka, 2005). Les chercheurs ne sont pas amenés à répondre à un cahier des charges fourni par l'entreprise. Ceci fait la distinction de la RI d'une mission de conseil/consulting (Aggeri, 2016). La RI ne vise pas non plus à considérer des hypothèses théoriques identifiées préalablement, mais plutôt à s'engager dans une exploration du terrain pour bien analyser le problème et identifier les pistes

de recherches ainsi que les réflexions à suivre. Le chercheur occupe la position d'intervenant au sein de l'organisation sans s'éloigner de ses activités scientifiques et académiques qu'il considère comme sa fonction principale.

La formalisation de la démarche de RI en France a été menée à travers la contribution de deux centres de recherche, le Centre de Gestion Scientifique (CGS) de MINES ParisTech et le Centre de Recherche en Gestion (CRG) de l'école Polytechnique (Aggeri, 2016).

La démarche peut être synthétisée en 5 étapes :

Étape 1 : La perception d'un problème

Le point de départ est la formulation d'un besoin de transformation ou d'un problème rencontré par une organisation. Dès l'apparition de ce besoin, l'entreprise peut décider de se rapprocher d'un chercheur afin de l'accompagner. C'est l'étape initiale du processus de recherche.

Étape 2 : Exploration du terrain et définition des problématiques

La seconde étape consiste à définir la problématique de recherche à étudier. Pour y parvenir, les travaux commencent par des visites sur le terrain afin de comprendre l'organisation et les problèmes rencontrés. Après plusieurs mois de travail sur le terrain et un nombre important de réunions avec le partenaire industriel, un bilan permet d'acter les premières pistes de recherche à traiter.

Étape 3 : La phase de développement de la solution

Le chercheur réagit pour apporter la solution adéquate. Il s'agit alors du développement de programmes (outils), d'un plan d'action, de l'expérimentation de nouveaux modes de gestion en fonction de la problématique posée. Cette troisième étape se traduit selon Mérini et Ponté (Merini and Ponté, 2008) par l'interaction et l'intervention du chercheur avec les praticiens dans le but de formuler la modélisation adéquate.

Étape 4 : La phase d'analyse et d'évaluation des résultats

Cette étape permet aux différents acteurs, chercheurs et praticiens, une expérimentation de solutions résultantes de l'étape précédente. Les savoirs du chercheur et des praticiens se confrontent. Par conséquent, la vision se construit par rapport aux objectifs et contraintes à considérer et mène à une dynamique de connaissance.

Étape 5 : Expérimentation et conclusion de recherche

Une nouvelle théorie du fonctionnement de l'organisation est proposée. Des schémas d'expérimentation sont développés afin de vérifier l'accord des résultats théoriques avec la pratique. À partir de ce travail, les données collectées sont analysées et une conclusion est formulée.

Ce type de recherche, qui aide à produire à partir du terrain des connaissances à la fois opératoires (outils, méthodes) et théoriques (modèles), a facilité l'acquisition de connaissances pour définir le modèle des entrepôts urbains et proposer les outils tirés de l'Industrie 4.0 adaptés à ce nouveau modèle pour optimiser les processus opérationnels, objets de ces travaux dont le plan de mise en œuvre est décrit dans la section suivante.

2.4. Plan de mise en œuvre

Guidés par cette méthodologie de recherche, nous présentons dans cette section le plan de mise en œuvre de ces travaux.

Lors de la première année de la thèse, nous avons accompagné l'exécution des tâches opérationnelles au sein de l'Unité d'Affaires Solutions Logistiques et Transport de Proximité du partenaire industriel. Ceci nous a permis de prendre connaissance de la culture de l'entreprise et de ses modes de fonctionnement et de cadrer le contexte dans lequel s'insèrent ces travaux, décrit dans le chapitre 1. Parallèlement, nous avons exploré le domaine de recherche des entrepôts urbains, et les méthodes de « gestion 4.0 » des entrepôts de distribution traditionnels. Cette phase de recherche bibliographique a abouti à deux publications : l'une a fait l'objet d'un chapitre de livre (Edouard et al., 2021) et la seconde a été présentée pour un congrès national (Edouard et al., 2020). La rédaction du troisième chapitre de cette thèse, postérieure à la publication de ces articles, constitue la première contribution de cette recherche.

Avec l'appui des connaissances acquises lors de l'étude de la littérature et des observations du terrain, nous avons proposé une caractérisation du modèle des entrepôts urbains. Celle-ci a permis d'observer les différences majeures avec les entrepôts de distribution traditionnels et de comprendre les défis à relever pour fiabiliser le modèle des entrepôts urbains. Nous avons compris que les solutions utilisées pour améliorer les processus des entrepôts traditionnels n'étaient pas toutes duplicables et devaient être adaptées aux contraintes auxquelles font face les entrepôts urbains. Notre objectif suivant a donc été de proposer un modèle d'intégration des

groupes technologiques tirés de l'Industrie 4.0 dans le processus d'entrepôt urbain. Nous avons employé le standard BPMN pour modéliser les processus. A l'aide d'observations de terrain, nous avons dans un premier temps modélisé le processus actuel de notre partenaire industriel. Nous avons ensuite proposé et modélisé des processus intégrant les technologies 4.0 et discuté de l'effet des propositions sur la performance des entrepôts urbains. La caractérisation des entrepôts urbains et la proposition de processus 4.0 font l'objet du chapitre 4.

La dernière phase concerne la validation sur un cas applicatif de l'approche proposée. Lors de l'analyse des propositions 4.0 faites en amont, nous avons conclu que les systèmes de stockage et de prélèvement automatisés, faisant parti du groupe technologique des « dispositifs autonomes/robots », présentent un fort intérêt pour les entrepôts urbains. Pour nous en assurer, nous avons mené une étude de cas grâce à des données réelles du terrain. Elle a été publiée dans une revue scientifique (Edouard et al., 2022). Cette étude est présentée dans le chapitre 5 de ce mémoire.

La Figure 9 synthétise le plan de mise en œuvre décrit.

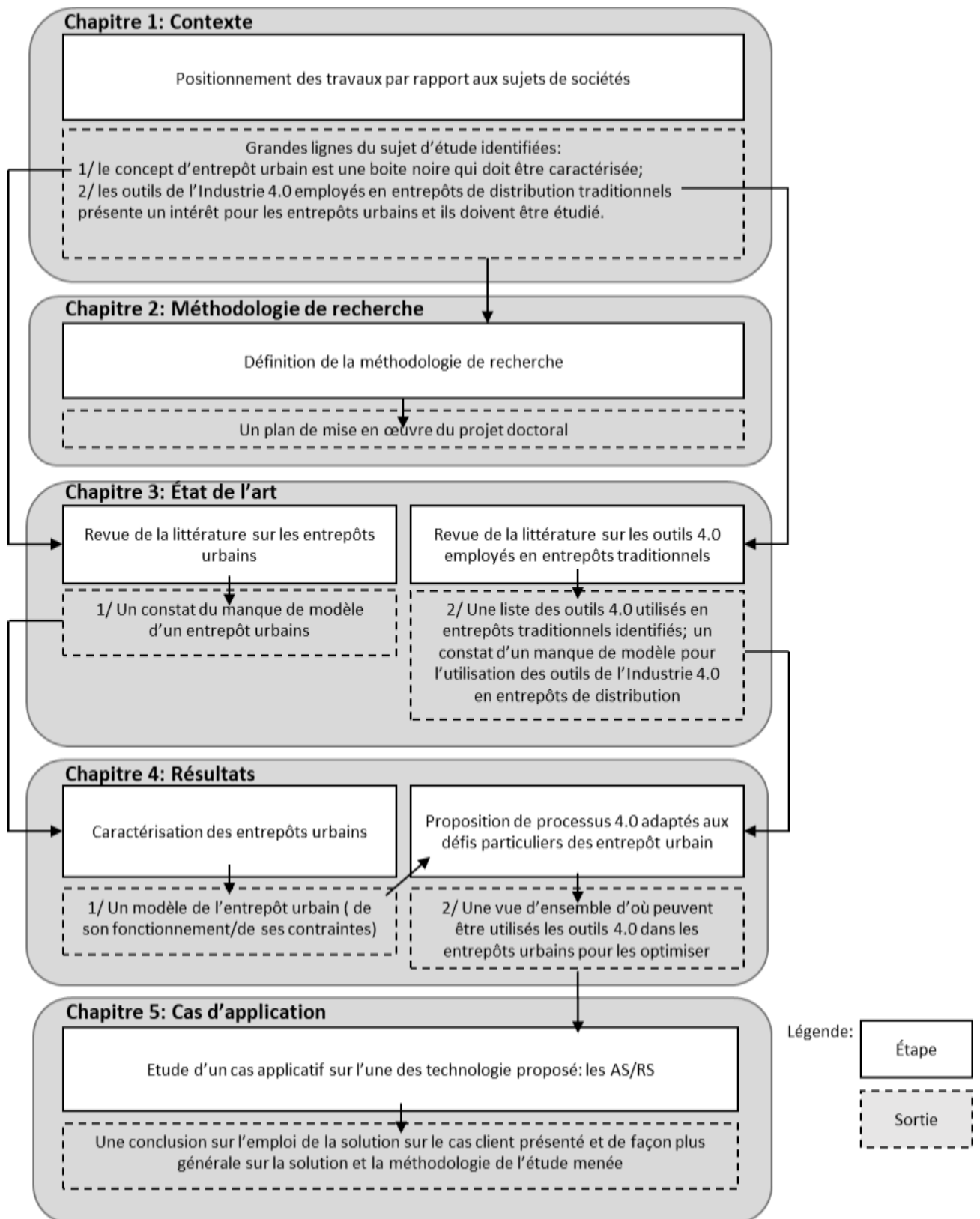


Figure 9 : Plan de mise en œuvre du doctorat

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit la méthodologie proposée pour atteindre l'objectif général de cette thèse. Le chapitre suivant aborde dans un premier temps un état de l'art sur le domaine de recherche des entrepôts urbains. Ce travail a pour but d'identifier si ce domaine de recherche a déjà été exploré et de révéler le manque de formalisation du modèle des entrepôts urbains. Dans un second temps, un deuxième état de l'art s'intéresse aux méthodes de gestion des entrepôts 4.0. Son objectif est de faire un état des connaissances sur les concepts de l'Industrie 4.0 et les processus d'entreposage 4.0.

Chapitre 3. État de l'art

L'état de l'art de ces travaux de recherche est structuré en deux volets. Le premier porte sur le domaine de recherche des entrepôts urbains, et le second sur les méthodes de gestion des entrepôts 4.0. Pour chacun est décrite la méthodologie utilisée ainsi que les résultats obtenus par l'analyse des articles sélectionnés. Une dernière partie propose une discussion de ces résultats, constate les manques de la littérature scientifique et expose les perspectives de recherche.

3.1. Les entrepôts urbains

Nous nous intéressons dans cette partie aux travaux relatifs aux entrepôts urbains.

3.1.1. Méthodologie

L'état de l'art s'est appuyé sur les bases de données SCOPUS et Science Direct. Au cours de nos recherches bibliographiques, nous avons constaté que la terminologie relative aux entrepôts urbains n'est pas encore bien définie et ne fait pas l'objet d'un consensus. Nous avons par conséquent exploré diverses combinaisons et mots-clés.

Parmi les termes explorés, les combinaisons suivantes n'ont pas répondu à l'objectif : « *mini warehouse* », « *city warehouse* », « *micro warehouse* », « *city hub* », « *mini hub* » et « *micro-hub* ». En effet, nous avons observé que certains industriels utilisent à tort le terme « *city hub* » pour parler des entrepôts urbains. Pour clarifier, la situation (Onstein et al., 2021) ont dressé une typologie des centres de distribution de la taille XXS à la taille XXL. Les *city hub* sont définis comme des installations logistiques à partir desquelles les livraisons sont consolidées dans les zones urbaines, situées à proximité de leur zone de service de marché et principalement utilisées pour les livraisons rapides en ville. Aussi, les termes « *mini hub* » et « *micro hub* » sont utilisés pour évoquer des lieux de transbordement de marchandises tel qu'observé dans l'article de (Huang et al., 2020). Ces termes décrivent donc des centres de consolidation urbains dans lesquels sont réalisées des opérations de cross-docking.

La liste de mots-clés retenue est la suivante : « *urban warehouse* », « *micro-warehouse* », « *micro-fulfillment centre* », « *city fulfillment center* », « *urban fulfillment center* » et

« *proximity logistics space* ». Aucune limite de temps n’a été fixée à la recherche, la dernière mise à jour de l’état de l’art ayant été faite en octobre 2022. Au regard de l’activité scientifique du domaine de la logistique urbaine, nous aurions pu appliquer une limite de temps de début à 2016, période à laquelle la publication d’articles sur le sujet a connu une croissance importante. Cependant, nous voulions observer si les termes employés l’avaient déjà été dans la littérature scientifique plusieurs années auparavant. Additionnellement, seules les communications étiquetées comme « *Research Article* » et « *Review* » dans Science Direct et « *Review* » et « *Article* » dans SCOPUS ont été incluses. En appliquant ces paramètres, synthétisés dans le Tableau 1, nous avons obtenu 55 papiers, parmi lesquels 11 ont finalement été sélectionnés, suite à une première analyse des titres et des résumés des articles. Une lecture intégrale des articles a permis une analyse en détail. Les résultats de cette analyse sont décrits dans la section suivante.

Tableau 1 : Méthodologie de sélection des papiers

Critères de sélection	Description
Mots clefs	« <i>urban warehouse</i> », « <i>micro warehouse</i> », « <i>urban fulfillment center</i> » OR « <i>city fulfillment center</i> » OR « <i>micro fulfillment center</i> », « <i>proximity logistics space</i> »
Langue	Anglais
Types des documents	« <i>Research article</i> » et « <i>Review</i> »
Bases de données	SCOPUS et Science Direct
Intervalle de temps	_ - octobre 2022

3.1.2. Résultats

La majorité des articles évoquant les entrepôts urbains se rejoignent sur le fait que l'augmentation du commerce électronique, accentué par la crise Covid, a engendré le besoin de grands centres régionaux et de plus petits entrepôts proches des zones urbaines pour améliorer l'efficacité de l'espace logistique et faciliter le mouvement des marchandises vers les clients qui exigent des délais de livraison plus courts et un système de distribution mieux pensé. En effet (Jin et al., 2019) indiquent que la proximité avec les clients est la clé pour rendre la livraison ultrarapide viable pour les modèles de vente au détail, en particulier dans les villes très fréquentées.

Parmi les résultats obtenus pour donner suite à l'étude des articles sélectionnés, nous distinguons trois catégories : ceux apportant des connaissances sur les caractéristiques des entrepôts urbains, ceux qui décrivent les freins à leur développement et ceux qui explicitent les défis de ces espaces et la réponse des scientifiques.

3.1.2.1. *Quelques caractéristiques des entrepôts urbains*

Les auteurs (Arslan et al., 2021) traitent le problème de déploiement du réseau de distribution des produits du e-commerce (e-DND). Trois stratégies de déploiement sont étudiées, à savoir l'expédition à partir d'un entrepôt (SW : *ship-from warehouse*), l'expédition à partir de magasins (SS : *ship-from stores*) ou depuis des plateformes d'exécution urbaines (SF : *ship-from urban fulfillment platforms*). Les auteurs donnent une description de ces dernières installations : « *Les entrepôts urbains sont consacrés à la réception des stocks avancés provenant de l'entrepôt central sur de grands camions et à l'exécution quotidienne des commandes en ligne avec des véhicules plus petits et respectueux de l'environnement, adaptés à la distribution urbaine.* » Ils précisent qu'en s'appuyant sur les entrepôts urbains, les e-commerçants s'exposent à des coûts supplémentaires liés à l'exploitation de ces installations réalisée par des prestataires logistiques, ajoutés sous la forme d'un coût d'usage. Ces coûts d'utilisation sont sensibles à la localisation des plateformes (centre-ville versus périurbain), cependant les utilisateurs échappent aux coûts d'ouverture de ces installations. De plus, le recours à cette capacité d'exécution supplémentaire offre moins de contraintes de capacité que les magasins et des coûts unitaires de prélèvement et d'emballage plus faibles. Le schéma comprend des coûts de réapprovisionnement et de maintien par produit pour chaque commande expédiée, ainsi qu'un coût de prélèvement par article et un coût de transport. De ce fait, le modèle qui étudie les trois stratégies de distribution anticipe les revenus et les coûts du niveau opérationnel, qui comprend les décisions de réapprovisionnement, de maintien des stocks, de livraison et d'exécution des commandes. Les résultats de l'étude montrent que le schéma s'appuyant sur les entrepôts urbains présente une meilleure rentabilité et des avantages opérationnels tels qu'une utilisation des stocks et des capacités de transport plus homogènes. La principale conclusion en matière de gestion est que cette stratégie semble être plus performante en cas de niveaux élevés de commandes en ligne et de saturation des capacités des magasins dans les grandes villes avec les coûts de structure considérés.

(Heitz, 2021) confirme qu'il existe un marché naissant de l'immobilier logistique urbain dans les zones densément peuplées, ayant pour but de couvrir un nombre limité de secteurs. (Lamb et al., 2022) utilisent le terme « *micro-fulfillment centre* » pour décrire les entrepôts urbains et

indiquent qu'à chaque période, ces installations se réapprovisionnent auprès des entrepôts centraux (traditionnels). (Rai et al., 2022) signalent que ces installations logistiques sont généralement construites sur des espaces inutilisés ou sous-utilisés ou s'intègrent dans d'anciens bâtiments rénovés ou remis en état. (Meryem et al., 2019), qui utilisent le terme « *proximity logistics spaces* », précisent les caractéristiques suivantes : petites plateformes qui permettent un stockage temporaire de marchandises et disposent de véhicules propres assurant les derniers mètres.

3.1.2.2. *Les freins*

Les auteurs (Meryem et al., 2019) indiquent que le développement des entrepôts urbains est freiné par l'absence de modèle économique, le coût élevé du foncier et la nécessité d'une nouvelle organisation logistique entre les utilisateurs. Le processus d'ouverture d'entrepôts urbains dépend fortement du coût d'utilisation associé, de l'évolution des clients vers une livraison plus rapide, de la proximité entre l'entrepôt et la ville pour offrir une capacité de réponse rapide, et la disponibilité de la capacité de transport (Arslan et al., 2021).

Dablanc et al. (Dablanc et al., 2022), qui ont fait un point sur les adaptations apporté par les parties prenantes de la logistique urbaine pendant le Covid pour s'adapter aux changements des comportements de consommation, ont constaté que s'ajoute un autre frein à ce développement : l'écart entre le processus réglementaire actuel et les exigences du marché. Les auteurs donnent pour exemple la France, où il y a des règles spécifiques pour l'entreposage de marchandises, ce qui rend les installations telles que les entrepôts urbains compliqués à construire dans les zones denses.

3.1.2.3. *Les défis*

Lorsqu'il s'agit de décider de l'ouverture ou de la construction de nouveaux centres de distribution/expédition, il faut prendre en compte les décisions relatives à l'emplacement (Arslan et al., 2021). Les entreprises qui peuvent livrer plus rapidement sont généralement plus proches des clients et gagnent par conséquent de plus grandes parts de marché et de bénéfices (Millstein et al., 2022). En s'attaquant au problème de localisation des espaces logistiques et au routage des livraisons et des enlèvements réalisés à partir de ces équipements, l'objectif est de minimiser les coûts encourus en générant une stratégie d'itinéraires faisable et économique, et un ensemble d'emplacements de microcentres où les véhicules logistiques peuvent se réapprovisionner ou décharger des marchandises tels que celles en retours. Il est donc important pour les entreprises de planifier scientifiquement la stratégie d'itinéraire avec ramassage et livraison mixtes,

d'optimiser la planification des réseaux de micro-hub et la logistique de distribution de petits colis dans les villes, et d'améliorer la stratégie de réapprovisionnement et de service d'inventaire des micro-hubs. De nombreux auteurs, tel que (Nolz et al., 2020), (Cempírek et al., 2021), (Huang et al., 2020), se sont attaqués à ce sujet en logistique urbaine cependant les études se limitent aux centres de distribution urbains, s'attelant à des activités de crossdocking.

Ces études ne sont pas les seules nécessaires pour répondre aux exigences de la distribution. Une étude exploratoire récente, menée par (Hübner et al., 2016) auprès de 33 détaillants, a identifié les cinq domaines les plus importants pour y répondre : le développement et l'optimisation des modes de livraison, l'augmentation de la vitesse de livraison, la transparence des stocks, l'optimisation des processus, et l'intégration des stocks.

En raison de l'espace limité, les entrepôts urbains traitent moins de produits que les plateformes en ligne traditionnelles qui sont directement approvisionnées par les entrepôts traditionnels. Par conséquent, les détaillants sont souvent confrontés à la difficulté de sélectionner un bon sous-ensemble de produits différents à proposer sur les plateformes de livraison ultrarapide, à partir d'un océan de produits potentiels qui se trouvent dans les centres de distribution.

(Gao and Zhang, 2022) ont décidé de s'attaquer au traitement de la donnée dans le domaine de la supply chain et porté une attention particulière sur les données de choix des clients. En effet, ils font remarquer que le choix du client est une composante essentielle de la gestion d'un système d'inventaire multiproduits. Les décisions d'achat des clients peuvent être influencées par les disponibilités des stocks. Si deux produits sont des substituts, les clients qui connaissent une rupture de stock du produit A pourraient se tourner vers le produit B. Cependant, si les deux produits sont complémentaires, les clients qui souhaitent acheter les deux articles pourraient ne rien acheter si l'un des produits n'est pas disponible. Dans une stratégie de gestion d'un entrepôt, si cet aspect est ignoré, cela pourrait se ressentir sur les ventes. Les auteurs relèvent particulièrement l'importance du problème de l'assortiment de stocks multiproduits pour les entrepôts urbains. La croissance émergente et la concurrence forte des entreprises de commerce électronique ont accentué les problèmes d'inventaire. Par conséquent, l'article propose un cadre d'algorithmes d'apprentissage à utiliser pour régler le problème de l'assortiment des stocks en prenant en compte les choix des clients. En raison de la limite de capacité de l'entrepôt urbain, la proposition considère les contraintes d'espace et de catégorie des produits.

(Jin et al., 2019) quant à eux, examinent les problèmes de sélection des produits des entrepôts urbains. Cet article se concentre sur la sélection d'un ensemble optimal de produits parmi ceux à demande moyenne à faible pour les détaillants en ligne disposant d'entrepôts urbains, les

produits leaders du marché étant systématiquement intégrés. La difficulté est de déterminer la popularité d'un grand nombre de produits à faible demande. Les algorithmes étudiés apprennent les niveaux de demande de tous les produits, et donnent aux détaillants la possibilité d'adapter leur gamme de produits à chaque ville, afin de mieux répondre aux préférences géodémographiques des clients.

Au travers de cette analyse, nous avons appris aussi que des scientifiques étudient un nouveau réseau de livraison par drones notamment pour améliorer économiquement et environnementalement les livraisons du dernier kilomètre (Qu et al., 2022), (Baldisseri et al., 2022), (Li et al., 2022), (Stolaroff et al., 2018). Celui-ci s'appuie sur des réseaux d'entrepôts urbains, cependant aucun autre détail n'est donné sur l'organisation de ces espaces.

3.1.3. Discussion

À la vue des résultats obtenus pour donner suite à l'état de l'art sur les entrepôts urbains, nous constatons que très peu d'articles abordent ce sujet. La plupart évoquent les entrepôts urbains sommairement en donnant quelques caractéristiques de leur positionnement stratégique au sein des nouveaux parcours de distribution en réponse au boom du e-commerce et des enjeux environnementaux. Ce fait peut-être expliqué par le récent intérêt pour ces installations. En effet, la plupart des articles ont été publiés en 2022.

Parmi les quelques études approfondies, nous retenons que celle du positionnement stratégique de l'entrepôt urbain au sein des zones urbaines est essentielle pour réduire l'impact des commandes sur l'organisation. Ces études doivent considérer le type de produits traités par la structure, les attentes de leurs clients et des consommateurs finaux et l'impact des flux du point de vue des coûts et impacts environnementaux liés à leur choix de positionnement. Généralement, rapprocher les entrepôts des clients permet de réduire les temps de transport, mais fait augmenter les coûts de stockage. L'installation d'un entrepôt urbain doit faire l'objet d'une analyse de rentabilité rigoureuse et il doit être soigneusement configuré pour fournir les revenus nécessaires.

Additionnellement, la gestion des stocks est un élément stratégique à ne pas négliger dans l'étude d'installations logistiques. L'objectif de la gestion des stocks est de disposer des bons produits au bon endroit et au bon moment. Généralement, un fabricant ou distributeur répartit ses stocks sur différents sites de la chaîne d'approvisionnement. Selon la catégorie de l'installation logistique, la stratégie de gestion des stocks varie suivant ses caractéristiques (configurations physiques, cibles, périmètre). Cette activité nécessite de savoir quand passer

commande, de quelles quantités et de quels produits et où les stocker. Avoir une vue précise des stocks garantit la satisfaction des clients (exécution des commandes réussie, réduction des temps de traitement, minimisation des ruptures de stock). Au regard des résultats présentés, là aussi, quelques chercheurs, tels que (Gao and Zhang, 2022) et (Jin et al., 2019), se sont attelés au sujet. De premiers algorithmes d'apprentissage sont proposés pour sélectionner un bon sous-ensemble de produits. Ils prennent en compte les niveaux de demande de tous les produits, et donnent aux détaillants les informations nécessaires pour répondre aux préférences géodémographiques des clients.

Malgré la faible considération du modèle des entrepôts urbains par la communauté scientifique, il présente une plus forte activité du côté des industriels et de la presse spécialisée qui produit de la littérature grise traitant du besoin de ces nouvelles installations et exposant leurs principales caractéristiques.

Une étude récente du cabinet de conseil Deloitte a analysé la distribution urbaine des marchandises à New York et s'interroge sur l'intérêt de mettre en place un réseau d'entrepôts urbains (Deloitte Development LLC, 2019). L'étude qu'ils ont menée montre que bien que l'immobilier et la main-d'œuvre soient plus chers dans la ville, si l'on considère les coûts de livraison du dernier kilomètre, le coût total pour le service est inférieur à un traitement des commandes réalisé en zone extérieure à la ville. En effet, l'avantage concurrentiel des entrepôts urbains est considérable et, dans le cas de la ville de New York, qui présente des coûts d'entrée et de sortie de la ville élevés, l'implantation d'entrepôts dans les villes permet de réduire le coût de transport de chaque article.

La société américaine JLL (Jones Lang LaSalle), spécialisée dans le conseil en immobilier d'entreprise et dans la gestion d'investissements immobiliers, quant à elle, a réalisé une recherche industrielle sur l'« urban infill » (aménagement de parcelles vacantes dans les zones urbaines autrement bâties que pour des activités pour lesquelles on souhaite les utiliser) (JLL, 2020). En utilisant une analyse démographique pointue, la société est capable d'identifier les espaces qui serviront le mieux la demande e-commerce et lui permet de promouvoir des solutions innovantes de logistique, s'apparentant à des entrepôts urbains.

Additionnellement, le média français de la logistique et de la supply chain Voxlog a publié un article intitulé « Micro-fulfillment center : nouveau maillon stratégique pour la supply chain ? » (Voxlog, 2021), qui expose une description détaillée des caractéristiques des entrepôts urbains :

« Derrière ce terme se cachent des sites logistiques urbains ou périurbains de taille réduite, pouvant s'étendre de quelques centaines de mètres carrés jusqu'à des tailles de 2 500 m². »

« Leur situation peut être variable selon les cas de figure : certains seront accolés à des magasins et pourront communiquer directement avec eux. D'autres trouveront leur place dans des sites de type drives, ou parfois dans des bâtiments indépendants, espaces urbains plus ou moins dédiés à la logistique. »

« Ses objectifs peuvent être multiples : proposer du click-and-collect façon drive, être un point de départ pour la livraison à domicile et vers des points relais, ou éventuellement servir de stock central pour équilibrer les besoins des points de vente et gérer les retours. »

« Ces centres de distribution peuvent prendre des formats variés selon leur localisation, et les constructeurs œuvrent à adapter leurs solutions à des sites parfois bas de plafonds ou ayant des formes atypiques. »

« Il est crucial d'exploiter les surfaces existantes pour les transformer en zone de préparation de commandes, ce qui peut se faire dans des magasins, mais aussi des garages ou parkings. »

« Dans toutes ses déclinaisons, son but est le même : créer du stock et de la capacité de traitement des commandes (souvent e-commerce mais pas seulement) au plus près des consommateurs. »

« L'autre caractéristique de ces sites, c'est leur rayon d'action. Là où les grands entrepôts viennent alimenter des métropoles entières, les microfulfillment centers rayonnent eux sur une petite zone, pouvant s'étendre sur une trentaine de kilomètres au maximum, parfois moins en cœur de ville. »

« Le rapprochement des installations logistiques augmente les prix au mètre carré, de par la rareté des surfaces, tout en complexifiant les supply chains,

car il faut alors piloter un grand entrepôt et son réseau de plusieurs petits sites, ce qui pose des questions de réapprovisionnement et de flux. Cependant, ces coûts peuvent être rattrapés par un transport moins coûteux et des leviers de croissance : une efficacité opérationnelle plus importante et de nouveaux services. »

L'article expose aussi les barrières au développement des entrepôts urbains. En premier lieu, il alerte sur la nécessité d'un investissement important, qui peut impacter la viabilité économique du projet, car les entrepôts urbains peuvent présenter un chiffre d'affaires et des volumes moins élevés que des structures traditionnelles. On en revient finalement à la nécessité de réaliser une analyse de rentabilité rigoureuse avant tout déploiement de ces installations, évoquée avant. Secondement, inclure les entrepôts urbains dans sa stratégie de distribution oblige les distributeurs à la repenser entièrement. Cela implique de redéfinir le positionnement des structures logistiques sur lesquelles ils s'appuient, de les dimensionner et d'y adapter la gestion des stocks.

L'article se termine sur une réflexion portant sur la différence entre les sites logistiques traditionnels et les entrepôts urbains. Les premiers éléments de réponse exposés visent à dire qu'en termes techniques, il n'y aurait pas de différence ou du moins, que les entrepôts urbains seraient une évolution voire une réinvention du concept de l'entrepôt traditionnel.

De ce dernier constat et des éléments discutés ci-devant, nous avons tiré deux réflexions. Tout d'abord, si les entrepôts urbains sont si proches au point de vue technique que les entrepôts traditionnels ont-ils les mêmes caractéristiques ? Sinon, quelles sont-elles ? En effet, la littérature scientifique manque d'une description explicite d'un modèle d'entrepôt urbain (fonctionnalités, caractéristiques et processus). Secondement, en introduisant le contexte de l'étude dans le chapitre 1 nous avons évoqué les outils de la logistique 4.0 ou encore entreposage 4.0, largement utilisé en entrepôts traditionnels, car porteurs d'une meilleure productivité. Et nous nous demandons si ce concept est duplicable aux entrepôts urbains. Pour arriver à répondre à ce questionnement, nous avons tout d'abord complété cet état de l'art en explorant les méthodes de gestion des entrepôts 4.0. Celui-ci est présenté ci-après.

3.2. Les entrepôts de distribution à l'ère de l'Industrie 4.0

La révolution digitale et l'accélération de l'adoption des technologies ont permis de créer des innovations (objets connectés, cloud computing, big data, intelligence artificielle, réalité virtuelle ou augmentée, robots collaboratifs, etc.). De nombreux secteurs d'activité se sont emparés de ces innovations pour réinventer leur métier et créer de nouveaux business modèles disruptant les hiérarchies établies. Dans le secteur de l'industrie, l'emploi de ces nouvelles technologies a mené à la démocratisation du concept d'Industrie 4.0 (aussi appelée industrie du futur ou quatrième révolution industrielle) menant à une fabrication intelligente. Dans le domaine de la logistique et notamment de l'entrepôtage, on parle de logistique 4.0 et d'entrepôts 4.0. À l'instar de l'Industrie 4.0, le terme générique « Logistique 4.0 » recouvre l'ensemble des innovations et technologies connectées dont les applications concrètes accroissent la performance de la Supply Chain.

Afin d'étudier l'impact de l'Industrie 4.0 sur le management des entrepôts de distribution, une recherche approfondie de références bibliographiques a été effectuée. Elle vise à répondre aux questions de recherche suivante : **quelles sont les méthodes de gestion des entrepôts 4.0 et à quels processus s'adresse chaque solution ? Quel impact a l'emploi des technologies de l'Industrie 4.0 sur la performance des entrepôts ?**

Ce travail a été structuré grâce à la définition d'un cadre d'analyse et le choix d'une méthodologie, présentés ci-après.

3.2.1. Cadre d'analyse

Basé sur le cadre analytique employé dans l'étude de Alexandre Moeuf et al. (Moeuf et al., 2018), qui montre qu'il existe une relation étroite entre les objectifs, les niveaux de capacités managériales recherchées et les ressources techniques nécessaires pour les atteindre, nous proposons un cadre d'analyse comportant quatre axes pour assembler les connaissances de cette étude :

- a) Les processus d'entrepôtage ;
- b) Les ressources techniques : technologies de l'Industrie 4.0 ;
- c) Les niveaux de capacités managériales induites par ces ressources ;
- d) Les objectifs de performance visés.

La Figure 10 illustre la combinaison des quatre axes du cadre d'analyse.

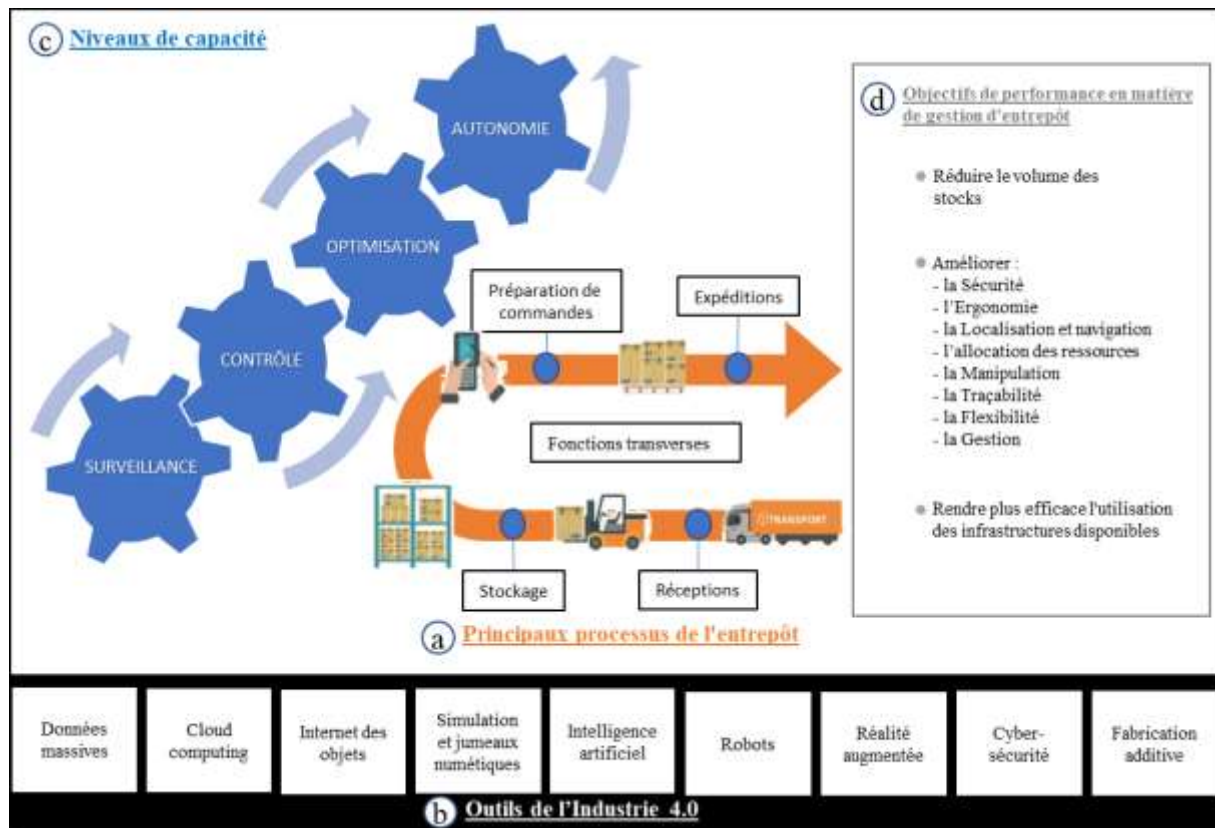


Figure 10 : Les quatre axes du cadre d'analyse

Les composantes du premier (a) et dernier (d) axe ont été présentées dans le chapitre 1, partie 1.3.2 et 1.3.3 respectivement, les autres sont développées ci-dessous.

3.2.1.1. Outils et technologies de l'Industrie 4.0

Le concept d'Industrie 4.0 est basé sur l'émergence d'un ensemble de méthodes et technologies qui ont été présentées comme essentielles pour améliorer la productivité des processus. Comme le montre l'article de (Rosin et al., 2020), les principaux mots-clés utilisés pour définir l'Industrie 4.0 sont : la communication, la flexibilité et le temps réel. La classification des technologies utilisées dans cette étude a été adaptée à partir d'études majeures sur le sujet, telles que German Manufacturing 4.0 (Jean-Daniel and Weisz, 2018), (Russmann et al., 2015) et (Danjou et al., 2017). Chaque groupe technologique est défini brièvement ci-après.

- **Données massives** appelées Big Data : Les processus logistiques génèrent une grande quantité de données. La collecte et l'évaluation complète de ces données permettent de soutenir la prise de décision en temps réel. Le terme Big Data recouvre ce processus. Il permet d'analyser les données (données et métadonnées), ce qui aide à tirer des conclusions et à soutenir un transfert de connaissances plus efficace pour atteindre les objectifs commerciaux (Witkowski, 2017).

- **Cloud computing** : Le cloud computing (informatique en nuage) est utilisé pour le stockage et le calcul de données sur la base de connexions Internet. Il permet le traitement de données à grande échelle avec flexibilité et à faible coût. Certaines des caractéristiques les plus pertinentes sont la possibilité d'un accès omniprésent au réseau, la possibilité d'augmenter ou de réduire la capacité à volonté et la localisation indépendante des ressources (Dopico et al., 2016).
- **Internet des objets (IdO)** : Cette technologie rend possible la collecte de données sans intervention humaine. Elle permet également aux appareils de terrain de communiquer et d'interagir entre eux (Russmann et al., 2015). Par exemple, selon (Olsen and Tomlin, 2020), les étiquettes et les lecteurs d'identification par radiofréquence (RFID) promettent une révolution dans le suivi et la surveillance des stocks. Cette technologie permet de suivre le processus de transport des marchandises, des colis et des lettres (Witkowski, 2017). Le suivi et la traçabilité sont devenus plus rapides, plus précis, plus prévisibles et plus sûrs.
- **Simulation et jumeaux numériques** : Les données en temps réel sont utilisées pour refléter le monde physique dans un « jumeau numérique » (digital twin), un modèle virtuel, qui peut inclure des machines, des produits et des personnes (Russmann et al., 2015). Elles peuvent être utilisées pour tester, simuler et optimiser une organisation ou des choix décisionnels (Tjahjono et al., 2017).
- **Intelligence artificielle (IA)** : L'intelligence artificielle utilise des ordinateurs pour simuler l'intelligence naturelle afin d'interpréter des données externes, d'apprendre de ces données et de les utiliser pour une analyse descriptive, prédictive ou normative (Tang and Veelenturf, 2019).
- **Dispositifs autonomes/robots** : Les progrès récents en matière de technologie des capteurs et d'intelligence artificielle ont permis l'émergence d'une nouvelle génération de technologies robotiques pouvant être déployées aux côtés des travailleurs humains (Olsen and Tomlin, 2020). Ces robots collaboratifs sont appelés « cobots ». Leur déploiement implique l'automatisation des tâches manuelles qui peuvent entraîner des microtraumatismes répétés. En outre, les exosquelettes peuvent aider les travailleurs à atténuer les blessures causées par le soulèvement de lourdes boîtes dans l'entrepôt (Tang and Veelenturf, 2019). Les robots mobiles peuvent améliorer la productivité, par exemple en apportant les produits directement aux employés pour le prélèvement, l'emballage et l'expédition. En outre, les drones peuvent transporter différents capteurs afin d'enregistrer des données (visuelles et audio) pour les opérations de surveillance et de contrôle. L'automatisation des activités est motivée par l'amélioration de la qualité (les robots peuvent effectuer de manière répétée des tâches plus précises que les humains) ou de la sécurité (prévention des troubles musculosquelettiques (TMS))(Olsen and Tomlin, 2020).
- **Réalité augmentée** : Les systèmes basés sur la réalité augmentée améliorent le monde physique grâce à des informations visuelles ou autres informations sensorielles générées numériquement. Ils prennent en charge divers services, tels que la sélection de pièces dans un entrepôt et la fourniture d'informations en temps réel aux travailleurs pour améliorer la prise de décision et les procédures de travail (Russmann et al., 2015).

- **Cybersécurité** : Avec les grandes quantités de données désormais disponibles grâce à l'IdO, une entreprise voudra stocker ces données de manière accessible, mais sécurisée. Une solution possible à ce problème de stockage est la blockchain. La blockchain est un registre de sécurité distribué. Il est possible d'y accéder et d'y écrire de n'importe où ; les données ne sont pas stockées dans un emplacement central et, une fois qu'un bloc est ajouté à la chaîne, il ne peut plus être modifié (Olsen and Tomlin, 2020).
- **Fabrication additive** : Également appelée impression tridimensionnelle (3D), il s'agit d'un processus qui à partir d'une représentation numérique en 3D fabrique l'objet physique correspondant (Olsen and Tomlin, 2020). La localisation des machines de fabrication additive à proximité des actifs permettra l'impression rapide et à la demande d'une pièce requise, ce qui entraînera une réduction des stocks et du transport. Elles peuvent également réduire les déchets, tels que les emballages (Taniguchi et al., 2016). Cette technologie peut également être utilisée pour produire de petits lots de produits personnalisés.

Pour définir la capacité de chaque technologie et leur connectivité, les professeurs d'Harvard Michael E. Porter et James E. Heppelmann ont défini 4 niveaux de capacité, quatrième axe de notre cadre d'analyse, présenté ci-après.

3.2.1.2. *Quatre niveaux de capacité induits par la mise en œuvre de l'Industrie 4.0*

L'intelligence et la connectivité, induites par la mise en œuvre des technologies de l'Industrie 4.0, permettent un ensemble de fonctions et de capacités qui peuvent être regroupées en niveaux. Appelé modèle de Porter et Heppelmann (Michael E. Porter and James E. Heppelmann, 2014), les niveaux de capacité : surveillance, contrôle, optimisation et autonomie ; sont incrémentaux et basés sur les précédents. Par exemple, les capacités de surveillance sont les fondations pour le contrôle, l'optimisation et l'autonomie du produit.

- **Surveillance** : les données, telles que les indicateurs des conditions de fonctionnement, les paramètres de sécurité, la maintenance préventive et les indicateurs de performance, sont collectées et transmises au contrôleur ;
- **Contrôle** : les données passent par des algorithmes qui assurent que les performances des systèmes répondent aux attentes et détectent les situations anormales ;
- **Optimisation** : à partir des résultats précédents, des améliorations sont proposées. Le système agit comme un système d'aide à la décision ;
- **Autonomie** : la combinaison des trois premiers niveaux peut conduire à des systèmes autonomes (fonctionnement autonome du produit et autocoordination avec d'autres produits et systèmes, amélioration et personnalisation autonomes, autodiagnostic et entretien).

Ces niveaux de capacité peuvent être utilisés pour évaluer la maturité des solutions techniques requises pour atteindre les résultats de performance des processus.

3.2.2. Méthodologie de revue de la littérature

L'analyse documentaire approfondie sur les interactions entre l'Industrie 4.0 et la gestion des entrepôts a été menée et exécutée dans les bases de données SCOPUS et Science Direct. Pour ce faire, le mot-clé « warehouse » (entrepôt) a été combiné aux divers termes décrivant les outils de l'Industrie 4.0, présentés ci-devant, pour former les champs de recherche suivants :

- « Warehouse » AND « 4.0 » ;
- « Warehouse » AND « Big data » ;
- « Warehouse » And « Cloud computing » ;
- « Warehouse » AND « Cyber physical systems » ;
- « Warehouse » AND « IoT » ;
- « Warehouse » AND (« Simulation » OR « Digital twins ») ;
- « Warehouse » AND « Artificial Intelligence » ;
- « Warehouse » AND (« Robots » OR « Stand-alone devices ») ;
- « Warehouse » AND « Augmented Reality » ;
- « Warehouse » AND (« Cybersecurity » OR « Blockchain ») ;
- « Warehouse » AND (« Additive Manufacturing » OR « 3D printing »).

Les termes « AND NOT data warehouse » ont été saisis dans chacun des champs de recherche, car la confusion entre les entrepôts de données et l'entrepôt en tant qu'installation logistique a entraîné l'affichage de nombreux articles non pertinents.

Les champs de recherche utilisés ont été limités au « Titre, résumé, ou mots-clés spécifiés par l'auteur ». Tous les documents disponibles entre janvier 2011 et décembre 2020 ont été inclus. L'année 2011 correspond à l'introduction officielle de l'Industrie 4.0 à la foire de Hanovre, l'année 2020 correspond à celle des débuts de ces travaux de recherche et à la période de réalisation de cette recherche bibliographique. Cependant, les derniers travaux du domaine (années 2021 et 2022) sont discutés dans la section 3.2.4.2 pour que les résultats des recherches les plus récentes soient pris en compte. Cette section discute de l'activité scientifique sur le sujet sur les deux dernières années et vérifie l'accord des résultats avec ceux obtenus lors de la recherche initiale. Pour finir, seules les communications « *Research Article* » et « *Review* » dans Science Direct et « *Review* » et « *Article* » dans SCOPUS ont été incluses.

Sur la base des paramètres listés, 1372 articles ont été trouvés dans la base de données Scopus et 352 dans Science Direct. Par la suite, une analyse des titres et des résumés des articles a été effectuée afin de réduire le nombre d'articles inclus. Après l'élimination des doublons, une analyse du texte intégral a été effectuée sur les 154 articles sélectionnés. Les articles qui ne

répondaient pas à l'objectif de ce travail ont été exclus. Les 77 articles restants ont été pris en compte dans l'analyse de la littérature dont les résultats sont présentés dans la section suivante. La méthodologie de sélection des articles est présentée dans la Figure 11.

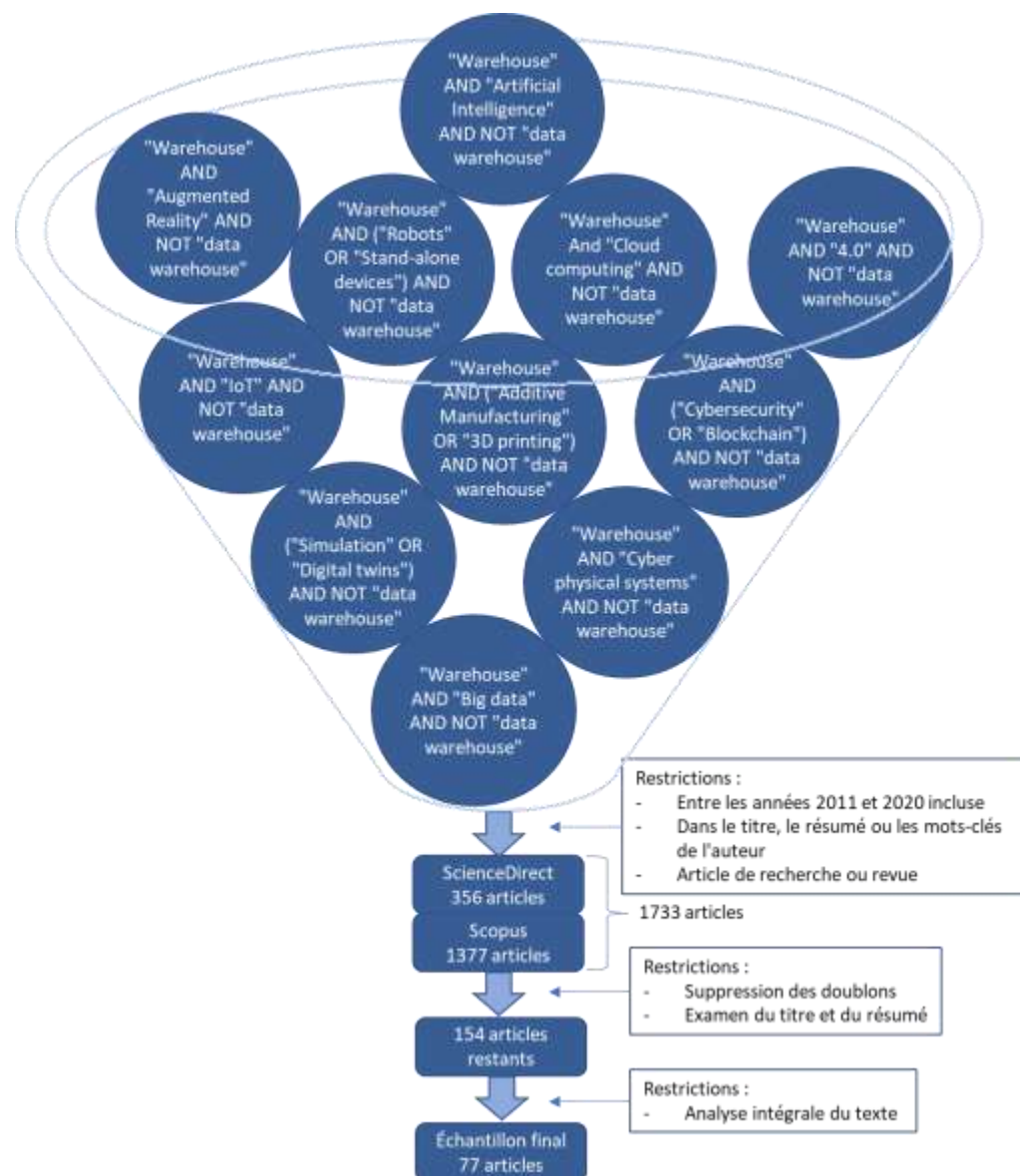


Figure 11 : Méthodologie de sélection des articles

3.2.3. Analyse de la littérature

Cette section présente les résultats de la revue de littérature sur la base du cadre d'analyse présenté ci-dessus. Dans un premier temps, un décryptage du potentiel des technologies tirées de l'Industrie 4.0 a été réalisé pour chaque macro-processus de l'entrepôt. Dans un second

temps, l'analyse vise à montrer l'impact de l'emploi des technologies 4.0 sur la performance des entrepôts.

3.2.3.1. Quel est le potentiel des technologies de l'Industrie 4.0 pour chaque macro-processus de l'entrepôt ?

Tout d'abord, la littérature a été analysée afin de croiser les principaux processus d'un entrepôt avec les méthodes et technologies de l'Industrie 4.0 (Tableau 2). Cette section met en évidence l'utilisation potentielle des technologies de l'Industrie 4.0 sur chaque macro-processus de l'entrepôt. Une analyse détaillée est fournie ci-dessous.

3.2.3.1.1. Réception

Au cours du processus de réception, les marchandises sont déchargées des véhicules d'expédition, vérifiées et préparées pour être transportées vers leurs emplacements de stockage correspondants. Selon la littérature, certaines améliorations peuvent être apportées à cette première activité.

En effet, l'enregistrement en temps réel des flux est possible grâce à des lecteurs fixés aux portes d'entrée, qui peuvent détecter les données enregistrées sur les étiquettes fixées aux produits (Mostafa et al., 2019). Ce processus est intégré à l'IdO, et les données capturées automatiquement sont directement saisies dans le système de gestion d'entrepôt (WMS) (Lee et al., 2017). Cela permet d'accéder en temps réel au niveau des stocks et d'éviter les ruptures de stock.

Parallèlement, D. Smith and S. Srinivas (Smith and Srinivas, 2019) ont présenté un solveur qui, par la simulation, permet de trouver la meilleure stratégie d'enregistrement de la marchandise à employer.

Le processus de réception peut également être équipé d'une solution novatrice de déballage automatique. Elle se compose d'un système de perception, d'un robot monté sur une base mobile, d'un cutter personnalisé et d'une stratégie de planification (Gabellieri et al., 2019).

3.2.3.1.2. Stockage

Après le processus de réception, le processus de stockage consiste à placer les marchandises entrantes dans leurs emplacements de stockage correspondants.

Le stockage est effectué par des robots logistiques automatisés et guidés ou par des « systèmes de stockage et de déstockage automatisés » (AS/RS). Ces systèmes stockent et récupèrent les produits, généralement des palettes ou des boîtes sur des racks, automatiquement grâce à des

machines spécialement conçues pour cet usage (Aguiar et al., 2019) et (Fernandes et al., 2019). D'autres notions, dont celle de « systèmes de stockage et de déstockage par navette » (“shuttle-based storage and retrieval systems”), sont utilisées dans la littérature (Lerher, 2017) ; (Ekren et al., 2015). La modélisation analytique et la simulation sont généralement utilisées pour concevoir ces solutions et analyser leurs performances (Ekren et al., 2015) ; (Lerher, 2017) ; (Zhou et al., 2020) ; (Zou et al., 2016) ; (Ning et al., 2016).

Par ailleurs, les emplacements de stockage peuvent être générés par une technique d'exploration de données (une méthode d'analyse Big Data), dans laquelle les données historiques des processus de préparation des commandes sont analysées pour déterminer les catégories d'articles fréquemment requises ensemble. Ensuite, sur la base de règles extraites, l'espace requis par chaque article, les dimensions de la zone de stockage et les catégories d'articles sont affectés à l'étagère la plus pratique du système de stockage (Bevilacqua et al., 2019). L'optimisation de l'allocation des produits pendant le processus de stockage peut réduire les coûts de stockage en réduisant les niveaux de stock tout en maintenant des niveaux de service définis (Trab et al., 2015a). Une solution de jumeaux numériques peut également être utilisée pour optimiser l'affectation du stockage, comme montré par J. Leng et al. (Leng et al., 2019).

Tableau 2 : Classification des articles analysés

	Réception	Stockage	Préparation de commandes	Expéditions	Fonctions transverses
Données massives		(Bevilacqua et al., 2019)	(Wu et al., 2020a)		
Cloud Computing			(Wu et al., 2020a)		
Internet des objets	(Satish et al., 2020)(Lee et al., 2017) (Keung et al., 2020)	(Lee et al., 2017)(Poon et al., 2011)(Satish et al., 2020)(Kim and Park, 2016)(Mostafa et al., 2019)(Trab et al., 2015a)(Ekren et al., 2015)(Tejesh and Neeraja, 2018)	(Lu et al., 2018)(Satish et al., 2020)(Wu et al., 2020a)(Reaidy et al., 2015)(Lee et al., 2017)(Mostafa et al., 2019)(Kim and Park, 2016)(Ekren et al., 2015)	(Satish et al., 2020)(Mostafa et al., 2019)	(Trab et al., 2017)(Shin et al., 2019)(Halawa et al., 2020)(Trab et al., 2018)(Zhao et al., 2020)(Abdelkrim et al., 2018)(Mohanraj et al., 2019)
Simulation et jumeaux numériques	(Smith and Srinivas, 2019)	(Burinskiene et al., 2018)(Lerher, 2017)(Leng et al., 2019)(Zhou et al., 2020)(Zou et al., 2016)(Ning et al., 2016)	(Zuniga et al., 2015)(Burinskiene et al., 2018)(Bučková et al., 2017)(Altarazi and Ammouri, 2018)(Lerher, 2017)(Wang et al., 2019)(Boysen et al., 2018)(Güller and Hegmanns, 2014)(Bahrami et al., 2016)	(Leng et al., 2019)	(Agalianos et al., 2020)(Bechtsis et al., 2018)
Intelligence artificielle	(Coito et al., 2020)	(Coito et al., 2020)	(Duc et al., 2020)(Su et al., 2019)(Mahroof, 2019)(Coito et al., 2020)(Honig et al., 2019)	(Coito et al., 2020)	(Shin et al., 2019)
Dispositifs autonomes/ Robots	(Emde et al., 2020)(Gabellieri et al., 2019)	(Lin et al., 2020)(Merschformann et al., 2019)(Beul et al.,	(Lee et al., 2020)(Keung et al., 2020)(Merschformann et al., 2019)(Jiang et al., 2020)(D'Souza et al.,	(Lin et al., 2020)(Rhiat et al., 2020)	

		2018)(Aguiar et al., 2019)(Fernandes et al., 2019)(Fernández-Caramés et al., 2019)	2020)(Ham, 2019)(Boysen et al., 2017)(Fager et al., 2019)(Xie et al., 2021)(Kochan, 2016)(Yang et al., 2020)(Fernandes et al., 2019)(Hanson et al., 2018)(Boysen et al., 2019)(Huang et al., 2015)(Azadeh et al., 2019) (Stoltz et al., 2017)		
Réalité augmentée		(Mourtzis et al., 2019)	(Fang and An, 2020)(Nagda et al., 2019)(Cirulis and Ginters, 2013)(Remondino, 2020)(Plakas et al., 2020)(Schwerdtfeger et al., 2011)(Mourtzis et al., 2019)	(Remondino, 2020)	(Piardi et al., 2019)(Remondino, 2020)(Wen et al., 2018)
Cybersécurité					(Song et al., 2019)
Fabrication additive		(Kashurnikov et al., 2019) (Mavri, 2015)			

Un inventaire précis des marchandises stockées est réalisé au moins une fois par an dans les entrepôts. Il peut être amélioré en utilisant l'IdO (Tejesh and Neeraja, 2018), qui permet de supprimer les enregistrements manuels, réduisant ainsi les erreurs et les contraintes humaines (Lee et al., 2017) ou l'utilisation de véhicules aériens (MAV/UAV) équipés de lecteurs RFID, de caméras et d'un système de télédétection (LIDAR). L'objectif de l'IdO est de promouvoir la cybersécurité en combinant la blockchain et l'analyse big data (Fernández-Caramés et al., 2019). La réalité augmentée, qui permet de retrouver l'emplacement des produits, peut également être utilisée dans un système efficace de gestion des stocks (Mourtzis et al., 2019). La fabrication additive peut être employée pour éliminer le besoin de stockage (Mavri, 2015). La technologie d'impression 3D est utilisée pour créer des pièces et des composants individuels, ainsi que des pièces de rechange personnalisées. Cette technologie élimine le besoin de maintenir de grands entrepôts pour les différents pièces et composants. Ils peuvent être remplacés par des entrepôts virtuels contenant des données informatiques sur les pièces nécessaires (Kashurnikov et al., 2019).

3.2.3.1.3. Préparation de commandes

La préparation de commandes décrit la collecte d'objets et de marchandises à partir du stockage en fonction des besoins d'un client (Wang et al., 2019). Généralement, le processus commence par une liste qui définit la position de chaque article à prélever, la quantité de chaque article et la séquence selon laquelle les articles seront prélevés. Les auteurs traitant du sujet de l'entreposage ou au moins du processus de préparation des commandes sont unanimes pour dire que ce processus représente à lui seul environ 50 % du coût total d'exploitation d'un entrepôt standard (Nagda et al., 2019). Par conséquent, trouver des méthodes pour améliorer ces opérations a attiré l'attention des chercheurs dans ce domaine.

Dans ce processus, l'adoption de l'IA peut améliorer les déplacements (Mahroof, 2019). Les solutions d'IdO équipées de dispositifs RFID, de scanners de codes QR, d'une connexion sans fil, d'applications mobiles et de bureau et d'un service cloud prenant en charge les opérations sans papier peuvent, pour leur part, limiter les erreurs, raccourcir la période de formation des employés (Wu et al., 2020a) et améliorer l'efficacité de la préparation des commandes (Lee et al., 2017).

La réalité augmentée permet à l'opérateur d'avoir une connexion constante à la base de données avec le stock disponible, d'enregistrer les entrées ou sorties de produits, tout en pouvant demander des instructions de navigation à l'intérieur de l'entrepôt (Mourtzis et al., 2019). Cette solution est également appelée dans la littérature « Pick-by-Vision ». Elle fournit un contenu

visuel à l'aide d'un système intelligent semblable à des lunettes. Ce système permet de réduire les erreurs, le temps de prise de décision et le stress lié au travail (Cirulis and Ginters, 2013) ; (Plakas et al., 2020) ; (Schwerdtfeger et al., 2011).

Les solutions mentionnées ci-dessus sont principalement utilisées pour la préparation manuelle des commandes, mais des solutions de préparation automatisée des commandes ont également été étudiées. Diverses solutions robotiques sont présentées dans la littérature, telles que les systèmes de stockage et de récupération automatisés (AS/RS), les systèmes de préparation de commandes robotisés guidés par la vision, les robots mobiles se déplaçant dans les rayonnages, les drones et les cobots (Lee et al., 2020) ; (Keung et al., 2020) ; (Ham, 2019) ; (Boysen et al., 2017) ; (Fager et al., 2019) ; (Kochan, 2016) ; (Hanson et al., 2018).

3.2.3.1.4. Expéditions

Dans le processus d'expédition, les commandes sont vérifiées, emballées, étiquetées et chargées dans un véhicule spécifique pour être expédiées. Deux principales solutions d'optimisation sont mises en avant dans cette étape. L'IdO peut être utilisé pour mettre immédiatement à jour le niveau des stocks dès que la commande quitte l'entrepôt (Mostafa et al., 2019). Deuxièmement, un système robotisé utilisant un solveur d'emballage de bacs peut aider l'opérateur de l'entrepôt à charger et à empiler de manière optimale des boîtes de différentes tailles sur une palette, sans intervention humaine (Rhiat et al., 2020).

3.2.3.1.5. Fonctions transverses

Les fonctions transverses comprennent la sécurité et la sûreté des lieux, l'emplacement et le mouvement des matériaux, ainsi que la planification. Le placement et la gestion des flux sont des sujets de recherche importants dans le domaine de l'Industrie 4.0.

Certains articles traitent de la prévention et du contrôle des interactions à risque et des situations dangereuses impliquant des produits et des opérateurs humains, ainsi que l'utilisation des technologies d'IdO pour aider à prévenir les catastrophes environnementales (Trab et al., 2017) ; (Shin et al., 2019) ; (Mohanraj et al., 2019). En outre, les systèmes à bande ultralarge, les systèmes RFID, les systèmes de vision et la technologie Wi-Fi peuvent être utilisés pour suivre l'emplacement des chariots élévateurs à fourche pendant les opérations quotidiennes, ce qui améliore la sécurité et l'efficacité opérationnelle des entrepôts (Halawa et al., 2020). Le contrôle du mouvement des véhicules automatisés dans les entrepôts peut également être soutenu par l'intelligence artificielle en utilisant des décisions de routage, des algorithmes A* (programmes autonomes permettant d'amener un objet d'un point à un autre, le plus rapidement

possible et en évitant les obstacles éventuels) et des modèles d'apprentissage automatique (Coito et al., 2020). De plus, la transparence, la traçabilité et l'auditabilité des flux de marchandises peuvent être améliorées par l'utilisation de la blockchain (Song et al., 2019).

Pour finir, D. Bechtsis et al. (Bechtsis et al., 2018) ont souligné l'importance de simuler des solutions stratégiques pour justifier les investissements. Ce point est particulièrement vrai pour les véhicules autonomes intelligents, qui nécessitent des capitaux importants.

3.2.3.2. Comment l'Industrie 4.0 améliore la performance des entrepôts ?

Le Tableau 3 présente d'autres résultats obtenus en classant les articles trouvés grâce à la méthodologie de recherche selon les trois axes suivants : « Outils de l'Industrie 4.0 », « Objectifs de performance de la gestion d'entrepôt » et « Niveaux de capacité permis par la mise en œuvre des outils 4.0 ». Une analyse détaillée est fournie ci-après.

3.2.3.2.1. Réduire le volume des stocks nécessaires

La réduction du volume des stocks nécessaires commence par une gestion plus sûre des produits. L'IdO est présenté comme une solution pour y parvenir, car il permet de gérer les stocks des entrepôts en temps réel (Kim and Park, 2016) ; (Tejesh and Neeraja, 2018) et peut fournir à l'entreprise une bonne vue d'ensemble des prévisions d'inventaire (Satish et al., 2020). Certains articles mentionnent la technologie de l'impression 3D afin d'éliminer la nécessité de maintenir de grands entrepôts pour diverses pièces et composants et de produire les pièces au besoin (Kashurnikov et al., 2019) ; (Mavri, 2015). Cette idée, qui permettrait une réduction du besoin d'espace de stockage et par conséquent des coûts associés ainsi qu'une réelle capacité d'optimisation, ne semble pas encore très populaire dans le secteur de l'entreposage puisque seuls deux articles la mentionnent. Cependant, compte tenu des contraintes de coûts et d'espace auxquelles sont confrontées les installations logistiques, ce sujet devrait être étudié plus en détail.

Tableau 3 : Niveaux de capacité des technologies de l'industrie 4.0 ayant un impact sur les objectifs de performance de la gestion d'entrepôt

<i>Niveaux de capacités</i>				
<i>Objectifs de performance</i>	<u>Surveillance</u>	<u>Contrôle</u>	<u>Optimisation</u>	<u>Autonomie</u>
Réduire le volume des stocks nécessaires	Internet des objets (Kim and Park, 2016) (Tejesh and Neeraja, 2018) (Satish et al., 2020)		Fabrication additive (Kashurnikov et al., 2019) (Mavri, 2015)	
Améliorer :				
<i>La sécurité</i>	Internet des objets (Trab et al., 2017) (Trab et al., 2015b) (Halawa et al., 2020) (Trab et al., 2018) (Abdelkrim et al., 2018) (Mohanraj et al., 2019)	Cybersécurité (Song et al., 2019)		Dispositifs autonomes/ Robots (Shin et al., 2019) (Keung et al., 2020)
<i>L'ergonomie</i>	Internet des objets (Wu et al., 2020 b) (Satish et al., 2020)		Intelligence artificielle (Su et al., 2019) (Bevilacqua et al., 2019) Réalité augmentée (Cirulis and Ginters, 2013) (Fang and An, 2020) (Nagda et al., 2019) (Remondino, 2020) (Plakas et al., 2020) (Stoltz et al., 2017) (Schwerdtfeger et al., 2011) (Mourtzis et al., 2019)	Dispositifs autonomes/ Robots (Lin et al., 2020) (Lee et al., 2020) (D'Souza et al., 2020) (Beul et al., 2018) (Kochan, 2016) (Fernandes et al., 2019) (Xie et al., 2021) (Fager et al., 2019) (Boysen et al., 2017) (Hanson et al., 2018) (Azadeh et al., 2019) (Gabellieri et al.,

		Simulation and Digital twins (Zhou et al., 2020) (Wang et al., 2019)	2019) (Boysen et al., 2019) (Huang et al., 2015)
<i>La navigation et allocation des ressources</i>	Internet des objets (Lu et al., 2018) (Halawa et al., 2020)	Réalité augmentée (Piardi et al., 2019) Simulation et jeux numériques (Poon et al., 2011) (Bučková et al., 2017) (Merschformann et al., 2019) (Wang et al., 2019) (Agalinos et al., 2020) Intelligence artificielle (Bevilacqua et al., 2019) (Honig et al., 2019) (Duc et al., 2020) (Coito et al., 2020) (Emde et al., 2020) Intelligence artificielle (Jiang et al., 2020)	Intelligence artificielle (Yang et al., 2020) (Zhao et al., 2020) Dispositifs autonomes/ Robots (Stoltz et al., 2017)
<i>La maintenance</i>			Dispositifs autonomes/ Robots (Ham, 2019) (Aguiar et al., 2019) (Wen et al., 2018) (Rhiat et al., 2020) (Azadeh et al., 2019) Intelligence artificielle (Mahroof, 2019)
<i>La traçabilité</i>	Cybersécurité (Song et al., 2019) Internet des objets (Zhao et al., 2020)	Intelligence artificielle (Mahroof, 2019)	Dispositifs autonomes/ Robots (Fernández-Caramés et al., 2019)

<i>La flexibilité</i>			Dispositifs autonomes/ Robots (Huang et al., 2015)
<i>La gestion</i>			Intelligence artificielle (Lee et al., 2017) Simulation et jumeaux numériques (Zuniga et al., 2015) (Burinskiene et al., 2018) (Smith and Srinivas, 2019) (Lerher, 2017) (Zou et al., 2016) (Boysen et al., 2018) (Güller and Hegmanns, 2014) (Bahrami et al., 2016) (Agalianos et al., 2020) (Bechtsis et al., 2018) Intelligence artificielle (Leng et al., 2019) (Bevilacqua et al., 2019) Simulation et jumeaux numériques (Altarazi and Ammouri, 2018) (Agalianos et al., 2020)
Rendre plus efficace l'utilisation des infrastructures disponibles	Internet des objets (Trab et al., 2018)		

3.2.3.2.2. Améliorer la sécurité

La sécurité dans le contexte de la gestion des entrepôts englobe à la fois la sécurité des produits et la sécurité des personnes opérant dans cet environnement. Parmi les outils de l'Industrie 4.0, l'IdO est fréquemment utilisé, car il permet de capturer des informations liées à la température, à l'humidité, aux chocs et aux incendies (Mohanraj et al., 2019). En particulier, lorsqu'ils sont montés sur des robots mobiles, ces outils sont utilisés pour la résolution rapide d'une situation anormale afin de sécuriser l'environnement (Shin et al., 2019). De plus, ils permettent de localiser les produits et par conséquent de les stocker en fonction de leurs contraintes de compatibilité de sécurité (Trab et al., 2015b); (Abdelkrim et al., 2018). Le respect des contraintes de sécurité des produits est essentiel pour éviter toute catastrophe pouvant causer des dommages matériels et humains importants (par exemple, la catastrophe de Seveso (Jain et al., 2017)). Les modèles de simulation peuvent aider dans ce processus en indiquant, par exemple, l'emplacement idéal de chaque produit. Cependant, les articles de recherche traitant de l'utilisation des simulations dans le domaine de l'entrepôt ne présentent pas ce sujet en particulier comme un axe d'étude.

De plus, les systèmes de localisation basés sur l'IdO peuvent assurer la sécurité des flux de chariots élévateurs pour éviter les collisions (Halawa et al., 2020), (Keung et al., 2020). Par conséquent, l'IdO semble être la technologie la plus recommandée pour sécuriser les entrepôts et apporte de réelles solutions pour surveiller les aspects « sécurité » de cet environnement.

Par ailleurs, depuis la mise en œuvre de la collecte intensive de données par des systèmes informatiques en vue de leur traitement, un problème de sécurité des données est apparu, désormais encadré par la cybersécurité. Les entreprises doivent stocker ces données d'une manière accessible, mais sécurisée. Un outil possible est la blockchain (Song et al., 2019). La cybersécurité, dans le cas spécifique des entrepôts, a jusqu'à présent attiré très peu d'attention de la part des chercheurs. En effet, cette solution est applicable à la collecte de données de manière générale, ce qui peut expliquer pourquoi les articles sur ce sujet, appliqué aux entrepôts, sont rares.

3.2.3.2.3. Améliorer l'ergonomie

Les travaux sur l'ergonomie visent à maximiser la productivité en réduisant les facteurs de risque de troubles musculosquelettiques (TMS) pour les travailleurs humains et leur charge de travail. Cela peut commencer par la suppression des comptages manuels pour enregistrer les articles. Cette tâche peut être réalisée par un système d'IdO (Satish et al., 2020), réduisant par

conséquent les erreurs dans les enregistrements d'informations et la pénibilité pour les travailleurs. Cependant, des solutions plus avancées sont disponibles. Par exemple, les solutions « pick-to-light » (Su et al., 2019) ou les systèmes de réalité augmentée (Mourtzis et al., 2019) ; (Schwerdtfeger et al., 2011) ; (Fang and An, 2020) ; (Nagda et al., 2019), qui peuvent être optimisés par l'intelligence artificielle pour guider le travailleur dans le processus de prélèvement et de récupération des produits. Enfin, les technologies les plus développées sont les robots, qui apportent de l'autonomie à la fonction et réduisent la charge de travail humaine. Parmi les solutions étudiées, il est possible de trouver des systèmes « goods-to-picker » dont le nom indique que la marchandise est apportée automatiquement au préparateur lors du processus de prélèvement (Lee et al., 2020) ; (Boysen et al., 2017), des AGV pour le transport de marchandises (D'Souza et al., 2020), des drones volants pour les inventaires (Beul et al., 2018) et des systèmes de déballage autonomes pour le processus de réception (Gabbieri et al., 2019). Le développement de ces solutions est à un stade plus ou moins avancé. Par exemple, les AGV sont souvent utilisés tandis que les drones volants et les solutions de réalité augmentée ont été largement étudiés mais leur application reste rare dans l'organisation concrète des entrepôts.

3.2.3.2.4. Améliorer la navigation et l'affectation des ressources

Grâce à sa capacité à permettre aux appareils de terrain de communiquer et d'interagir, l'IdO est également un outil utilisé pour la localisation des ressources et des produits. Lorsque des AGV sont utilisés pour faciliter le tri et la navigation des colis, des dispositifs d'IdO sont montés sur eux, qui planifient un itinéraire adapté pour éviter les encombrements (Lu et al., 2018). L'intelligence artificielle peut aider dans ce processus, en raison des taux élevés de déplacement des produits et de la génération de données. Grâce à des algorithmes de vision artificielle et d'apprentissage profond basés sur des caméras de surveillance, les colis peuvent être localisés et triés (Yang et al., 2020). L'utilisation de cette technologie peut également conduire à la formulation d'une méthodologie de planification d'itinéraire dynamique et d'automatisation basée sur l'IA pour contrôler le mouvement des véhicules automatisés dans un entrepôt (Duc et al., 2020). Elle consiste en une méthodologie de détermination d'itinéraires qui prend en compte les obstacles en temps réel.

Par ailleurs, la simulation d'entrepôt permet de tester différents scénarios et offre la possibilité de comparer et de sélectionner le meilleur. Par conséquent, elle est utilisée pour acheminer et allouer les ressources de la manière la plus efficace (Bučková et al., 2017) ; (Wang et al., 2019) ; (Agalianos et al., 2020) et s'applique au niveau de la capacité d'optimisation. Dans (Duc et al.,

2020), un environnement de simulation a été développé et utilisé pour tester la mise en œuvre du système de planification d'itinéraire proposé.

3.2.3.2.5. Améliorer la manutention

Les principales actions de la manutention sont le chargement, l'empilage et le déplacement. Au niveau de l'autonomie, différentes solutions robotiques ont été proposées dans la littérature scientifique : des drones pour le transfert de matériel (Ham, 2019), des AGV pour la manutention des stocks (Aguilar et al., 2019) et des robots mobiles pour charger et empiler de manière optimale des boîtes de différentes tailles sur une palette sans intervention humaine (Rhiat et al., 2020). L'intelligence artificielle fournit des solutions d'apprentissage pour optimiser les dispositifs de préhension de ces systèmes. Par exemple (Jiang et al., 2020) a proposé un système de ramassage par robot guidé par la vision et basé sur une image de profondeur, à l'aide d'un réseau neuronal convolutif profond. Le modèle est entraîné sur 15 000 images de profondeur annotées générées synthétiquement dans un simulateur pour prédire directement les points de saisie afin d'aider les robots à saisir des produits ou des emballages. Cette utilisation a montré que l'intelligence artificielle joue un rôle important dans l'optimisation des fonctions des robots. Les robots dépourvus de capacités d'intelligence seraient moins efficaces et n'atteindraient pas les objectifs de performance souhaités, notamment en matière de manutention. Pour cette raison, il est courant de trouver des propositions qui mélangent les différents outils de l'Industrie 4.0 pour les atteindre.

3.2.3.2.6. Améliorer la traçabilité

La collecte des données générées par les appareils et les robots connectés permet la traçabilité au sein de l'entrepôt. Tel que déjà mentionné, la collecte de données est principalement possible avec l'utilisation de l'IdO, agissant au niveau de la capacité de surveillance. Cependant, pour être efficace, la traçabilité nécessite l'engagement actif et la collaboration bien concertée de nombreux participants ou acteurs de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement. Pour cette raison, il est essentiel de déterminer la véracité des informations, et la blockchain a le potentiel de fournir un niveau plus élevé de transparence, de sécurité et de confiance dans ce processus (Fernández-Caramés et al., 2019). Cette technologie peut agir comme un système d'archivage inviolable (Song et al., 2019).

Par ailleurs, les données peuvent être stockées dans des solutions de cloud computing. Cependant, il existe peu de recherches portant spécifiquement sur son application dans le domaine des entrepôts, ainsi que pour le Big Data et la cybersécurité. Tel qu'introduit

précédemment, la majorité de la littérature se concentre sur les principes généraux du traitement des données et non spécifiquement dans le contexte des entrepôts. Par conséquent, nous n'avons trouvé que quelques articles traitant des technologies appliquées dans notre contexte de recherche. Cependant, l'edge computing, qui est un nouveau paradigme pour le domaine de l'IdO, peut être considéré comme un relais entre le cloud et les nœuds de capteurs, notamment dans les réseaux de capteurs sans fil (Wang et al., 2020) et peut être une solution à explorer. Il répond aux exigences de réponse rapide dans le scénario de l'entrepôt intelligent. Le système fournit une première réponse aux exceptions à proximité du lieu de génération des données, plutôt que d'attendre les stratégies de réponse du cloud computing.

3.2.3.2.7. Améliorer la flexibilité

Dans l'environnement actuel, les systèmes doivent être flexibles pour s'adapter efficacement aux changements du marché. Les solutions goods-to-person sont conçues à cet effet et peuvent s'adapter à l'espace disponible, à la quantité de référence et au flux de commandes (Huang et al., 2015). Cependant, il semble, au vu du faible nombre d'articles traitant de ce sujet, que les outils de l'Industrie 4.0 n'aient pas encore été explorés par les chercheurs, du moins dans le contexte des entrepôts offrant de la flexibilité. En effet, la flexibilité est l'un des principaux mots-clés utilisés pour définir l'Industrie 4.0. Cela nous amène à l'observation suivante : la flexibilité en tant qu'objectif de performance fait cruellement défaut dans la littérature relative aux entrepôts, et ce sujet ne devrait pas être négligé au regard des principales fonctionnalités que l'Industrie 4.0 est censée apporter.

3.2.3.2.8. Améliorer la gestion

Les gestionnaires d'entités telles que les entrepôts sont très intéressés par les outils de l'Industrie 4.0. Tout d'abord, les modèles de simulation et les jumeaux numériques aident les gestionnaires à prendre des décisions pour réduire les processus inutiles (Burinskiene et al., 2018), améliorer les performances (Zuniga et al., 2015) ; (Smith and Srinivas, 2019) ; (Lerher, 2017) ; (Bahrami et al., 2016), justifier les investissements et gérer les priorités (Agalianos et al., 2020). Ces solutions utilisent les données collectées par les technologies, comme nous l'avons déjà mentionné, pour simuler l'environnement et tester divers scénarios sans investir dans des équipements physiques.

En outre, l'intelligence artificielle pourrait conduire à une gestion autonome du système et fournir un comportement auto-organisé et des réseaux d'interconnexion entre toutes les entités de l'entrepôt (c'est-à-dire les palettes, les ressources et l'infrastructure informatique (Reaidy et

al., 2015). Les réseaux d'interconnexion peuvent également conduire au concept de consolidation d'entrepôt, qui nécessite des niveaux élevés de collaboration, de confiance et d'engagement entre les fabricants, les détaillants et les fournisseurs de services logistiques. La consolidation d'entrepôts consiste à la mise en commun d'installations logistiques afin de renforcer leur position concurrentielle dans ce secteur. Cette solution est très intéressante en raison de sa rentabilité et de son impact écologique positif, mais sa mise en œuvre est complexe en raison du développement qu'elle nécessite. Cependant, comme l'impact environnemental est de plus en plus un impératif stratégique pour les entreprises, il est nécessaire de développer des solutions qui soutiennent ces réalisations. En effet, lors de nos recherches, nous avons remarqué que l'empreinte environnementale a été jusqu'à présent peu étudiée.

3.2.3.2.9. Rendre plus efficace l'utilisation des infrastructures disponibles

Enfin, l'utilisation efficace de l'infrastructure disponible et l'optimisation du remplissage des stocks ont un impact réel sur les coûts et la productivité. Ce processus est soutenu par l'intelligence artificielle et les simulations. L'exploration de données et les jumeaux numériques sont utilisés dans l'affectation des stocks pour organiser les articles (Leng et al., 2019); (Bevilacqua et al., 2019), de manière similaire au traitement des contraintes de compatibilité de sécurité des produits. La simulation aide à la conception des racks (Ning et al., 2016) et à l'optimisation de l'utilisation de l'espace, et réduit les dépenses énergétiques (Agalianos et al., 2020). Ces solutions, comme c'est également le cas pour la plupart de celles présentées jusqu'à présent, ont très peu d'applications pratiques. La plupart des articles analysés dans cette étude présentent des applications théoriques des technologies. Vérifier l'applicabilité à travers des cas réels semble nécessaire pour s'assurer que les solutions proposées sont employables sur le terrain par les gestionnaires d'entrepôts afin qu'elles conduisent aux résultats escomptés.

3.2.4. Discussion

3.2.4.1. ...sur l'état de l'art initial

Les résultats de la première analyse, dont les données chiffrées sont formalisées dans le Tableau 4, montrent que les outils de l'Industrie 4.0 sont partiellement applicables dans la gestion des entrepôts ou du moins n'ont pas tous été étudiés au moment de la réalisation de l'étude. Les exemples décrits dans chaque catégorie mettent en évidence les domaines de recherche les plus explorés jusqu'à présent (couleur vert foncé, contre rouge pour les moins traités) et montrent le potentiel de ces solutions.

Tableau 4 : Résumé des occurrences du tableau 2

	Réception	Stockage	Préparation de commandes	Expéditions	Fonctions transverses	
Données massives		1	1			2
Cloud Computing			1			1
Internet des objets	3	8	8	2	7	28
Simulation et jumeau numériques	1	6	9	1	2	19
Intelligence artificielle	1	1	5	1	1	9
Dispositifs autonomes/Robots	2	6	17	2		27
Réalité augmentée		1	7	1	3	12
Cybersécurité					1	1
Fabrication additive		2				2
	7	25	48	7	14	

D'une manière générale, l'IdO a reçu le plus d'attention dans la littérature scientifique. Ce résultat est probablement dû au fait que cette technologie permet la collecte de données et, par conséquent, sert le premier niveau de capacité managériale, la surveillance. La préparation des commandes a été le processus le plus exploré jusqu'à présent. Ce phénomène s'explique par le fait qu'elle est l'activité la plus coûteuse, représentant plus de 50 % du coût total d'exploitation de l'entrepôt (Nagda et al., 2019). En opposition, parmi les cinq macro-processus de l'entreposage, la réception et les expéditions sont les moins étudiés, et parmi les solutions technologiques, l'utilisation de la fabrication additive est peu explorée.

Le Tableau 5 présente un résumé des domaines de recherche qui ont été jusqu'à présent les plus explorés par les chercheurs. D'une certaine manière, elle met en évidence les objectifs de performance de la gestion d'entrepôt qui ont les meilleures chances d'être améliorés grâce à l'Industrie 4.0, pour différents niveaux de capacité. Les domaines sous-exploités à ce jour ou les objectifs de performance de la gestion d'entrepôt qui représentent un potentiel d'amélioration faible ou nul grâce à l'utilisation des outils de l'Industrie 4.0 peuvent être identifiés.

Tableau 5 : Résumé des occurrences du tableau 3

		Données massives	Cloud Computing	Internet des objets	Simulation et jumeaux numériques	Intelligence artificielle	Dispositifs autonomes/Robots	Réalité augmentée	Cybersécurité	Fabrication additive		Surveillance	Contrôle	Optimisation	Autonomie
Réduire le volume des stocks nécessaires				3						2	5	3		2	
Améliore :	<i>La sécurité</i>			6			2		1		9	6	1		2
	<i>L'ergonomie</i>			2	2	2	14	8			28	2		12	14
	<i>La navigation et l'allocation des ressources</i>			2	5	7	1	1			16	2		11	3
	<i>La manutention</i>					2	5				7			1	6
	<i>La traçabilité</i>			1		1	1		1		4	2		1	1
	<i>La flexibilité</i>						1				1				1
	<i>La gestion</i>				10	2					12			11	1
Rendre plus efficace l'utilisation des infrastructures disponibles				1	2	2					5	1		4	
											87				
		0	0	15	19	16	24	9	2	2					
Surveillance				15					1			16			
Contrôle									1				1		
Optimisation					21	12		9		2				44	
Autonomie						4	24								28

Tout d'abord, nous avons observé que l'objectif de performance de la gestion d'entrepôt qui est le plus amélioré par les outils de l'Industrie 4.0 est « l'Ergonomie » (28 occ.). Cela peut s'expliquer par le fait qu'une grande partie de ce sujet concerne la santé des travailleurs et, par conséquent, nous pouvons comprendre pourquoi l'amélioration des conditions de travail des humains est largement couverte. Viennent ensuite la « Navigation et l'allocation des

ressources » (16 occ.), le « Management » (12 occ.) et la « Sécurité » (9 occ.). L'objectif le moins touché est la « Flexibilité » (1 occ.). En effet, nous avons observé que la flexibilité en tant qu'objectif de performance fait face à un réel manque dans la littérature concernant les entrepôts, et ce sujet ne devrait pas être négligé au regard de l'aspect flexibilité que l'Industrie 4.0 est censée apporter et qu'elle est une caractéristique importante dans le contexte urbain objet de cette étude.

Les technologies de l'Industrie 4.0 les plus couramment proposées pour améliorer les objectifs de performance des entrepôts, sont les « dispositifs et robots autonomes » (24 occ.), la « simulation et les jumeaux numériques » (19 occ.), « l'Internet des objets » (15 occ.) et « l'intelligence artificielle » (16 occ.). L'Internet des objets est utilisé principalement pour soutenir la capacité de surveillance (15 occ.), tandis que les « dispositifs et robots autonomes » soutiennent principalement l'autonomie (24 occ.). La « Simulation et les jumeaux numériques » et « l'Intelligence artificielle » sont les outils les plus utilisés dans la catégorie « optimisation » (21 et 12 occ.). Les technologies faiblement représentées sont le « Big Data » (0 occ.), le « Cloud computing » (0 occ.), la « Cybersécurité » (2 occ.) et la « Fabrication additive » (2 occ.). Les solutions telles que le Big Data, le cloud computing et la cybersécurité sont des solutions liées aux données qui sont généralement collectées par les systèmes d'IdO. Par conséquent, on peut comprendre que peu de recherches ait porté spécifiquement sur leur application dans les entrepôts. La majorité de la littérature se concentre plutôt sur les principes généraux du traitement des données.

En ce qui concerne les niveaux de capacité, le niveau « optimisation » est le plus étudié, avec 44 occurrences sur 87. Pour ce niveau de capacité, les articles analysés concernent principalement les objectifs de performance « amélioration de l'ergonomie » (12 occ.), « gestion » (11 occ.) et « navigation et allocation des ressources » (11 occ.). La principale technologie utilisée à ce niveau est, de loin, la « Simulation et les jumeaux numériques » (21 occ.). Le niveau de capacité « autonomie » suit avec 28 articles, 16 pour le niveau de surveillance et 1 pour le niveau de contrôle.

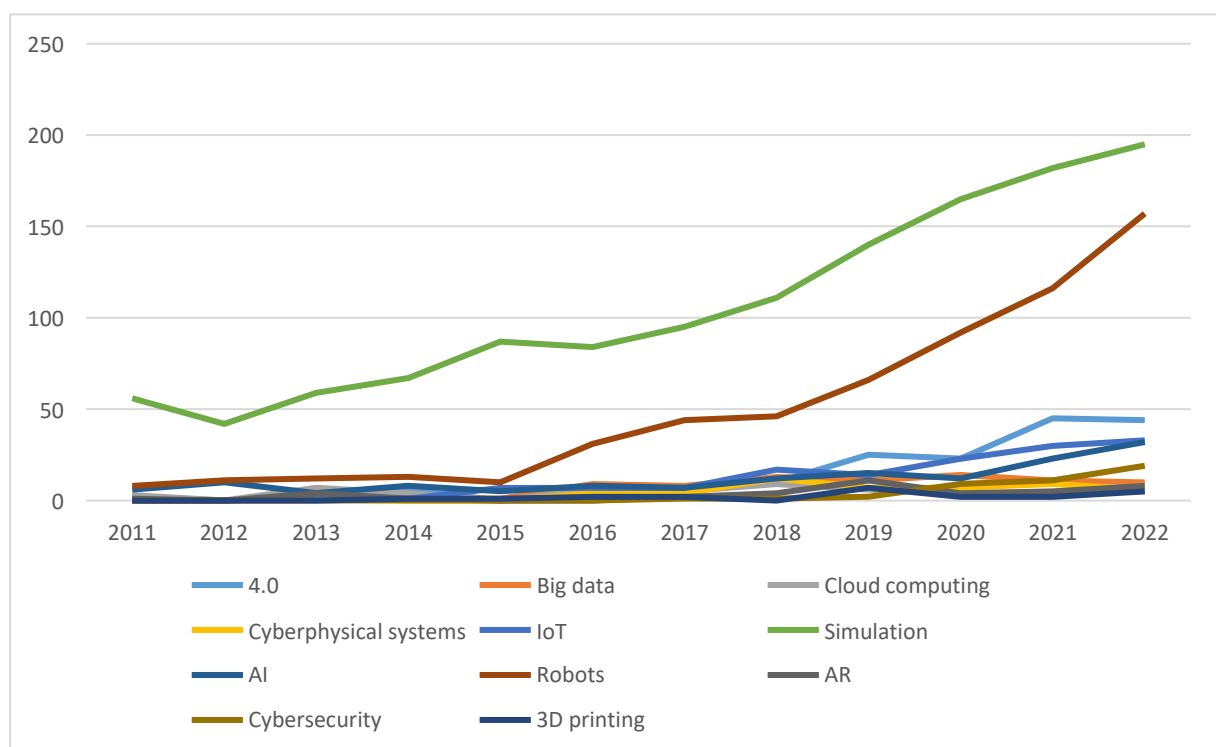
Les résultats de cette étude nous apprennent l'usage qui est fait de chaque solution technologique tirée de l'Industrie 4.0 à chaque niveau du processus d'entreposage. Nous remarquons que les solutions présentées dans les articles n'ont pas le même degré d'avancement dans leur mise en œuvre. De manière générale, l'idée partagée par les auteurs est que les technologies sont combinées pour rendre les solutions encore plus efficaces, ce qui est le principe fondamental qui sous-tend l'Industrie 4.0. Il est courant de trouver des propositions qui mélangent les outils de l'Industrie 4.0, pour atteindre les objectifs de performance. Par

exemple, les robots et les appareils autonomes sont souvent couplés à l'intelligence artificielle qui leur apporte la capacité d'autonomie.

3.2.4.2. ...sur la littérature récente

Pour que les résultats des recherches les plus récentes soient pris en compte, cette section discute de l'activité scientifique sur le sujet étudié observée sur les deux dernières années (2021 et 2022) et vérifie la concordance des résultats avec ceux obtenus lors de la recherche initiale. Le Tableau 6 représente les quantités d'articles scientifiques par combinaison de mots-clés et par année. Nous constatons que l'utilisation des outils tirés de l'Industrie 4.0 est toujours proposée aujourd'hui. Nous observons même une forte croissance de la littérature scientifique dans le domaine. La piste suivie et étudiée au début de ces travaux de recherche est donc confortée par ces résultats.

Tableau 6 : Quantités d'articles selon les combinaisons de mots-clés et par année



Cet état de l'art avait particulièrement pour but de comprendre les outils 4.0 utilisés en entrepôts de distribution traditionnels. Les articles publiés sur les deux dernières années n'ont fait qu'approfondir les éléments déjà étudiés auparavant. Les synthèses présentées ci-dessus sont par conséquent considérées comme à jour.

Afin de synthétiser la connaissance technique acquise lors de cette exploration de la littérature, nous proposons la Figure 12. Elle illustre le positionnement des outils 4.0 au sein des processus d'un entrepôt et s'articule autour de deux axes :

1. Les macro-processus de l'entrepôt ;
2. Le modèle de Le Moigne (Le Moigne, 1977), qui propose de décomposer une organisation en trois systèmes : décisionnel (siège des centres de décision), informationnel et opérationnel (siège des centres de charge) induisant une partie physique et une partie informationnelle.

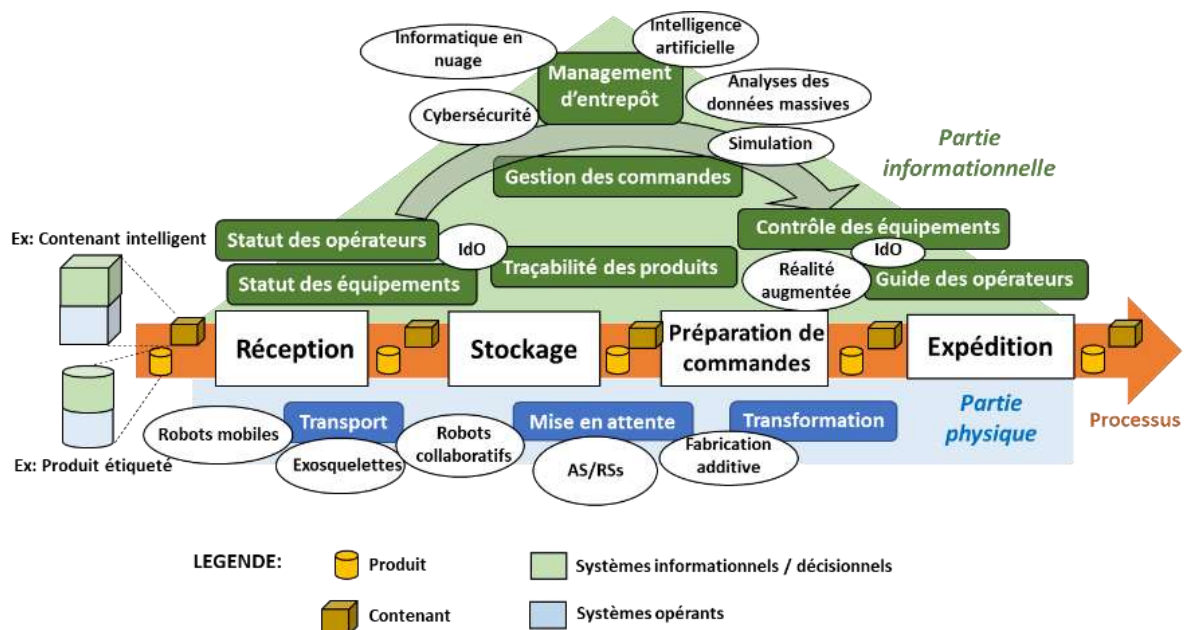


Figure 12 : Positionnement des outils 4.0 dans le processus d'entrepôt

Le positionnement des technologies proposé, au sein des processus d'entrepôt, est tiré de la connaissance acquise grâce à la littérature scientifique étudiée, qui présente majoritairement des applications théoriques des technologies de l'Industrie 4.0. Davantage de publications sur des applications réelles seraient nécessaires pour valider l'utilisabilité des solutions. Cette perspective permettrait de valider l'impact des technologies de l'Industrie 4.0 sur les processus d'entrepôt et assister les gestionnaires de ces installations dans la mise en œuvre des solutions sur le terrain. Pour chaque mise en œuvre d'une technologie 4.0 en faveur d'un objectif de performance et d'un processus d'entrepôt particulier, des indicateurs de performance devraient être mesurés afin de valider son impact.

3.3. Conclusion

Le premier état de l'art présenté dans ce chapitre avait pour but d'explorer le domaine de recherche scientifique des entrepôts urbains. Cette étude nous a confirmé le manque d'un modèle générique avec une définition précise des caractéristiques des entrepôts urbains et justifie le besoin de définir le concept, présenté comme prometteur pour répondre aux enjeux actuels de la société actuelle tel que précisé dans le chapitre 1.

Le second état de l'art avait pour but de nous apprendre les pratiques de gestion des entrepôts traditionnels de distribution employant les technologies tirées de l'Industrie 4.0. En cadrant les résultats avec quatre axes d'analyses (processus, outils 4.0, performance et niveaux de capacité), nous avons constaté que les outils et technologies de l'Industrie 4.0 peuvent être adaptés à chaque étape du processus logistique, et dans toutes ses dimensions : physique, opérationnelle et de contrôle. La question à laquelle les industries sont souvent confrontées est la suivante : quelles technologies pour quelle application ? Grâce à cet état de la littérature, nous avons pu modéliser dans la Figure 12 l'application des outils de l'Industrie 4.0 à chaque processus de l'entrepôt décomposé avec une partie physique et une autre informationnelle. Dans le cadre de cette recherche, nous cherchons à savoir comment adapter cette application aux défis spécifiques des entrepôts urbains.

La littérature scientifique étudiée présente trop peu de cas d'application pour tirer des conclusions à partir des cas empiriques d'application de l'Industrie 4.0 dans les entrepôts. En conséquence, nous n'avons pas d'idée précise sur les formes d'exploitation intéressantes de l'Industrie 4.0 pour les entrepôts urbains ni sur les risques encourus par les industriels en se lançant dans l'exploitation de ce concept. Une telle identification est nécessaire pour assurer une réussite aux industriels et à l'évolution à venir des modes de pilotage industriel. Ainsi, nous nous posons la question : comment adapter les contributions 4.0 pour améliorer les processus dans les entrepôts urbains ?

D'après les résultats de l'état de l'art discutés précédemment, les outils de l'Industrie 4.0 semblent aider à l'optimisation des processus en entrepôt. Cependant, certaines explorations doivent être poursuivies. En outre, il est clairement nécessaire de développer l'aspect clé du développement durable et la flexibilité des processus. Ou encore, il serait pertinent de tester les solutions identifiées dans des applications réelles. Ces cas d'utilisation généralisés contribueront à atteindre un objectif de recherche qui est de concevoir une méthodologie pour la mise en œuvre d'entrepôts urbains en réponse aux contraintes de l'environnement urbain. Pour cela, il convient de préciser les caractéristiques des entrepôts urbains et d'identifier les

solutions d'entreposage 4.0 avec une application pertinente et faisable dans les entrepôts urbains.

Le chapitre suivant vise à répondre à ces objectifs. Dans un premier temps, le modèle d'entrepôts urbains y est défini précisément avec la description de son fonctionnement, de ses caractéristiques et ses différences avec les entrepôts traditionnels. Dans un second temps est proposée une utilisation des outils tirés de l'Industrie 4.0 pour chaque processus d'entrepôts urbains. Ce chapitre mène au chapitre 5 qui expose un cas d'application réalisé avec l'aide de notre partenaire industriel, structuré par une méthodologie d'étude de systèmes intelligents.

Chapitre 4. Contribution à une caractérisation du modèle d'entrepôt urbain 4.0

Malgré la grande connaissance scientifique et industrielle des méthodes de management des entrepôts traditionnels, la définition du modèle économique des entrepôts urbains est complexe et doit prendre en compte les contraintes et défis qui les impactent. Dans un premier temps, ce chapitre définit les caractéristiques des entrepôts urbains, propose un comparatif de ces caractéristiques avec celles des entrepôts traditionnels et décrit les défis spécifiques à relever par ce nouveau type d'installation logistique. Les différences constatées avec un schéma traditionnel d'entrepôt ont mis en évidence la complexité de dupliquer les standards de gestion des entrepôts traditionnels. Par conséquent, il était nécessaire d'étudier le développement des processus internes et des solutions techniques spécifiques aux entrepôts urbains afin de pérenniser le déploiement du modèle, second travail présenté dans ce chapitre. Ce travail étant mené en partenariat avec l'entreprise La Poste, cela a permis d'ancrer ces travaux de recherche dans la pratique et créer une synergie avec le secteur industriel.

4.1. Définition du modèle des entrepôts urbains

Malgré qu'ils fassent partie de la catégorie des entrepôts, les entrepôts urbains ne peuvent être assimilés aux gigantesques entrepôts situés en périphérie des villes. Ils présentent des caractéristiques et doivent répondre à des défis qui leur sont spécifiques. D'après la littérature scientifique étudiée dans le chapitre 2 et les observations faites sur le terrain grâce au partenariat avec La Poste, nous proposons une description des caractéristiques des entrepôts urbains ci-après.

4.1.1. Caractéristiques des entrepôts urbains

Les entrepôts urbains sont localisés dans les centres-villes qu'ils couvrent spécifiquement. Cette localisation leur permet d'offrir des prestations de premier et dernier kilomètre, telles que le

« *ship-from-store* » (organisation de livraison des commandes réalisées en ligne depuis une boutique physique), le ravitaillement des commerces et des organisations voisines et le « *click and collect* » (récupération par le client directement au point de vente des commandes effectuées en ligne). Chacune de ces prestations vise à réduire les coûts et les délais de livraison, cependant, gérée individuellement, nécessite une mise en place opérationnelle qui peut-être complexe pour les parties prenantes concernées. Les entrepôts urbains, généralement exploités par des prestataires 3PL (*Third Party Logistics*), qui assurent de manière externalisée la logistique de ses clients ainsi que les tâches de stockage, de préparation de commandes et de transport des marchandises, ont pour but de prendre en charge ses prestations en mutualisant les ressources (humaines, matérielles, financières). Le prestataire de services 3PL est un intermédiaire, responsable de la manipulation des produits des entreprises clientes et de leur livraison au destinataire final. En s'appuyant sur ces prestataires, les entreprises cherchent à améliorer leur service et la satisfaction de leurs clients.

Du fait de leur localisation et des services qu'ils visent à offrir, les entrepôts urbains présentent les caractéristiques principales listées dans le Tableau 7, dans lequel sont décrits : la typologie des activités (volumes stockés, volumes de commandes traitées, temps de traitement, etc.), les caractéristiques des espaces exploités (localisation, couverture géographique, etc.), les clients, la typologie des commandes (nombre d'articles par commande, délais de traitement et unités de manutention) et des produits (dimensions, poids et dangerosité). Le tableau 7 présente aussi les caractéristiques des entrepôts traditionnels, permettant de comparer les deux types de solutions. Ce comparatif a permis de constater une grande différence et comprendre la nécessité de développer une organisation interne et d'adopter des solutions techniques spécifiques aux entrepôts urbains. Ces différences rendent complexe la duplication des standards de gestion des entrepôts traditionnels, exposés dans le chapitre 3, dans les entrepôts urbains.

Les différences entre toutes ces caractéristiques sont majoritairement dues à leur localisation en zone urbaine. S'intégrant dans les centres-villes qu'ils desservent spécifiquement, les entrepôts urbains font face à des contraintes particulières qui les poussent à relever des défis particuliers qui les distinguent significativement des entrepôts traditionnels. Ces défis sont développés dans la section suivante.

Tableau 7 : Principales caractéristiques de chaque type d'entrepôt.

Caractéristiques	Entrepôts traditionnels	Entrepôts urbains
Typologie des activités		
Volumes stockés (en nb de références)	Des millions	Quelques milliers
Volume de commandes traitées	Elevé	Moyen
Temps de traitement d'une commande	H+, J, J+1, J+2, J+4	H+, J, J+1
Temps de stockage d'un produit	Faible (quelques heures à quelques jours)	Moyen (quelques heures à quelques semaines)
Mode de transports en entrée	Camions (super poids-lourds, poids-lourds, porteurs)	Camions porteurs
Mode de transports en sortie	Camions porteurs, véhicules utilitaires légers (voitures électriques ou thermiques et fourgons électriques ou thermiques)	Véhicules utilitaires légers (voitures et fourgons électriques), vélos-cargos, marche à pied
Nombre de clients	Multiple clients	Quelques clients
Coûts des charges d'exploitation	Moyens	Très élevés
Superficies exploitées	Grands espaces (plusieurs milliers de m ²)	Petits espaces (quelques centaines, voire quelques milliers de m ²)
Typologie de l'espace exploité		
Principaux équipements de stockage	Racks/palletiers, étagères	Etagères
Localisation	A l'extérieur des villes	En centre-ville
Couverture géographique	Périphéries urbaines, banlieues, centre-ville	Centre-ville
Type de construction principal	Neuf	Réhabilité
Typologie des clients		
Cibles	Toutes	Luxe, urgence, niche
Typologies des commandes		
Nb d'articles/commande	De 1 unités à des centaines	1 à 3 unités
Délais de traitement	Moyen, rapide	Rapide, express
Unités de manutention majoritaires	Palettes, cartons/bacs	Produits, cartons/bacs
Typologies des produits		
Dimensions	Petites, moyennes, grandes	Petites, moyennes
Poids	Faibles, moyens, élevés	Faibles, moyens (max 30 kg)
Dangerosité	Possible	Compliqué

4.1.2. Défis des entrepôts urbains

Outre les défis liés aux attentes des consommateurs urbains (délais de traitement plus rapides, services personnalisés, services à valeur ajoutée), le rapport publié par Roland Berger et FM

Logistic (Bréchemier et al., 2020), acteurs majeurs de la supply chain, dresse une liste exhaustive des défis de l'environnement ultra-urbain : rareté et coût élevé de l'espace, perception négative des entrepôts et des flux de transport par les populations voisines, nécessité de modularité pour s'adapter à l'évolution des besoins, impératif respect de l'environnement. Chaque défi est détaillé ci-dessous.

4.1.2.1. Optimisation du foncier

Les villes sont des espaces où l'offre de terrains commerciaux et industriels disponibles et abordables pour établir et exploiter des installations logistiques est limitée (Aljohani and Thompson, 2016; Observatoire Régional de l'Immobilier d'Entreprise en Ile-de-France, 2018). Par conséquent, les espaces généralement disponibles pour cette nouvelle activité doivent être réhabilités et sont donc complexes, car ils étaient initialement destinés à un autre usage. Ils présentent souvent des caractéristiques logistiques « atypiques », différentes des standards observés dans le domaine de l'entreposage, notamment en étant situés en sous-sol ou avec un accès restreint aux camions, ou encore avec des colonnes ou des canalisations mal positionnées et des hauteurs sous plafonds faibles ou élevées. De plus, compte tenu du coût de l'immobilier urbain et de sa disponibilité, les espaces doivent être limités en taille, souvent de quelques centaines à quelques milliers de mètres carrés. Par conséquent, ces contraintes de rareté foncière et de coût élevé des surfaces génèrent une première problématique : la **nécessité d'optimiser l'utilisation des espaces sélectionnés pour mener à bien les activités de l'entrepôt urbain**. Il s'agit de configurer l'espace de stockage et les systèmes qui le gèrent pour qu'il soit le plus dense possible.

4.1.2.2. Modularité et reconfigurabilité

Additionnellement, le modèle économique de l'entrepôt urbain étant encore incertain, notamment en raison du manque de visibilité à long terme sur les attentes des clients (volumes, références, etc.), il est nécessaire de **réfléchir à la modularité et à la reconfigurabilité des installations afin d'anticiper l'évolution de la demande et des besoins**. Les changements survenus suite à la pandémie du COVID 19 l'ont bien montré, les entreprises ne peuvent pas toujours prévoir l'évolution de la demande des consommateurs. Ou encore, le phénomène d'influenceurs sur les réseaux sociaux peut mener à une hausse de la demande du jour au lendemain pour une gamme de produits. La capacité de stockage limitée des entrepôts urbains peut rendre difficile l'adaptation rapide à ces changements imprévisibles de la demande. La

capacité de modularité et de reconfigurabilité de ces espaces apparaît donc comme une seconde problématique spécifique des entrepôts urbains.

4.1.2.3. Durabilité

La perception négative des entrepôts et des flux de transport par les populations voisines, notamment en raison de leur impact négatif sur l'environnement, oblige les acteurs du secteur à développer des systèmes organisationnels ayant un impact faible à neutre sur l'environnement. Par principe, le modèle de l'entrepôt urbain est conçu autour de cet objectif, visant à convaincre les utilisateurs des zones urbaines de s'intégrer sans perturbation, voire d'améliorer leur cadre de vie. En effet, en rapprochant le stock de produits du consommateur final, les livraisons peuvent être effectuées par des moyens légers (véhicules électriques, vélos-cargos, marche), ce qui peut réduire la congestion des villes, la pollution sonore et les émissions de gaz à effet de serre. De plus, l'utilisation de locaux existants évite l'artificialisation des sols, causes premières du changement climatique et de l'érosion de la biodiversité. Cependant, la réponse aux enjeux de verdissement des processus des entrepôts urbains et d'amélioration de la perception des populations riveraines ne se limite pas à la proximité du consommateur final et au concept général. Il s'agit également de penser à la durabilité de chaque composante du modèle. Par exemple, cet exercice implique de repenser la gestion des retours et des déchets, et notamment de trouver une alternative aux emballages à usage unique.

Dans cette section, nous avons montré que la duplication des méthodes de gestion des entrepôts traditionnelle ne peut être systématique et se heurte aux caractéristiques de l'environnement urbain. Nous proposons dans la section suivante l'étude des outils tirés de l'Industrie 4.0 adaptés à l'optimisation des processus des entrepôts urbains.

4.2. Les technologies de l'Industrie 4.0 sur les processus actuels

Cette étude a pour but de mener au développement d'un guide pour la transformation des processus d'entreposage urbain actuel afin qu'ils soient les plus adaptés possible au besoin du marché. Pour parvenir à ce résultat, la première étape a consisté à modéliser les processus actuels de notre partenaire industriel. La seconde étape a visé à proposer l'utilisation de technologies tirées de l'Industrie 4.0 pour optimiser ces processus. Dans un premier temps, la section suivante développe les bénéfices d'une étude par les processus, utilisée ici, pour justifier notre approche.

4.2.1. L'étude par les processus

Employer une approche d'étude par les processus permet de définir, mesurer, surveiller et évaluer chaque activité interne afin de s'assurer qu'elle fonctionne à des performances optimales. Cette approche vise notamment à répondre à des objectifs tels que :

- Proposer de nouveaux services aux clients ;
- Améliorer le service rendu aux clients en adaptant les processus métiers aux besoins et exigences du marché ;
- Augmenter la performance de l'organisation (en simplifiant ou en automatisant leurs activités, en améliorant la qualité...) ;
- Se mettre en conformité afin de respecter les normes, certifications et codes de bonne conduite ;
- Mieux maîtriser ses risques.

Kostas Vergidis, Ashutosh Tiwari et Basim Majeed (Vergidis et al., 2008) ont passé en revue et classés les principales techniques de modélisation des processus d'entreprise en fonction de leurs capacités d'analyse et d'optimisation. Les définitions des processus qui sont rappelées dans cet article sont : « *un ensemble d'activités qui prend un ou plusieurs types d'intrants et crée un résultat qui a de la valeur pour le client* » ou « *la chaîne d'activités dont l'objectif final est la production d'un produit spécifique pour un client ou un marché particulier* ». Les auteurs rappellent que la modélisation des processus métier joue un rôle majeur dans la perception et la compréhension des processus métier et qu'il existe une abondance de techniques de modélisation de processus d'entreprise, avec des approches qui capturent différents aspects d'un processus métier, chacune ayant des avantages et des inconvénients distincts.

Chaque processus a un nom, un gestionnaire et est composé d'un ensemble d'activités et de sous-processus. Parmi les types de processus peuvent se distinguer les processus opérationnels qui interviennent en général en chaîne pour construire le service au client et les processus de management, en charge de piloter l'organisme dans son ensemble, de l'orienter, de l'organiser et de suivre le fonctionnement opérationnel.

L'étude des processus permet d'appréhender le fonctionnement des organisations de manière transversale, en soulignant les interdépendances de type fournisseur à clients intervenant entre les acteurs concernés. L'étude de processus existants en vue de leur amélioration peut s'ordonner en cinq étapes : analyse du processus, critique, recherche de solutions, mise en œuvre des solutions et contrôle des résultats.

Une bonne pratique pour représenter un processus opérationnel consiste à combiner les éléments graphiques comme le logigramme avec des procédures sous forme de texte et/ou

schémas pour décrire avec précision les modes opératoires. L'initiative de gestion des processus d'affaires (BPMI) a développé une notation standard de modélisation de processus appelée « Business Process Modeling Notation » (BPMN) afin d'utiliser un langage graphique d'organigramme capable de représenter un processus d'entreprise sous une forme visuelle intuitive (White, 2004). La représentation BPMN s'appuie sur un set d'éléments graphiques représentant les objets de flux (événement, activité, passerelle), les objets de connexions (flux de séquence, flux de message, association), les bassins de données (« pool » pour distinguer les participants et « lane » en sous-partie des « pool ») et artefacts (objets de données, groupe, annotation).

Cette méthode de représentation a été utilisée pour représenter en détail chaque étape des macro-processus des entrepôts urbains observés chez notre partenaire industriel. Ils sont présentés dans la section suivante.

4.2.2. Modélisation des processus actuels (Version T0)

La Figure 13 montre, en utilisant la méthode BPMN présentée ci-dessus, la combinaison des principaux sous-processus observés chez notre partenaire industriel dans le cas où le client de l'entrepôt urbain est le porteur du WMS, c'est-à-dire que le client assure la gestion de sa base de données et en donne un accès restreint à l'entrepôt urbain afin qu'il réalise les activités qui lui sont confiées. Un entrepôt peut-être aussi porteur de son WMS, il sera donc partagé avec plusieurs clients et la gestion des données sera internalisée. La version représentée est appelée T0, car elle relate les informations de terrain en place au moment de la phase d'observation.

Nous observons que les acteurs externes qui interagissent avec les entrepôts urbains sont ses clients, les clients de ses clients (clients finaux) et les transporteurs qui assurent les transferts de marchandises avec les deux acteurs précédents. L'évènement déclencheur du processus est la passation d'une commande par un client. Chaque sous-processus (cases rouges dans la Figure 13) est détaillé ci-après.

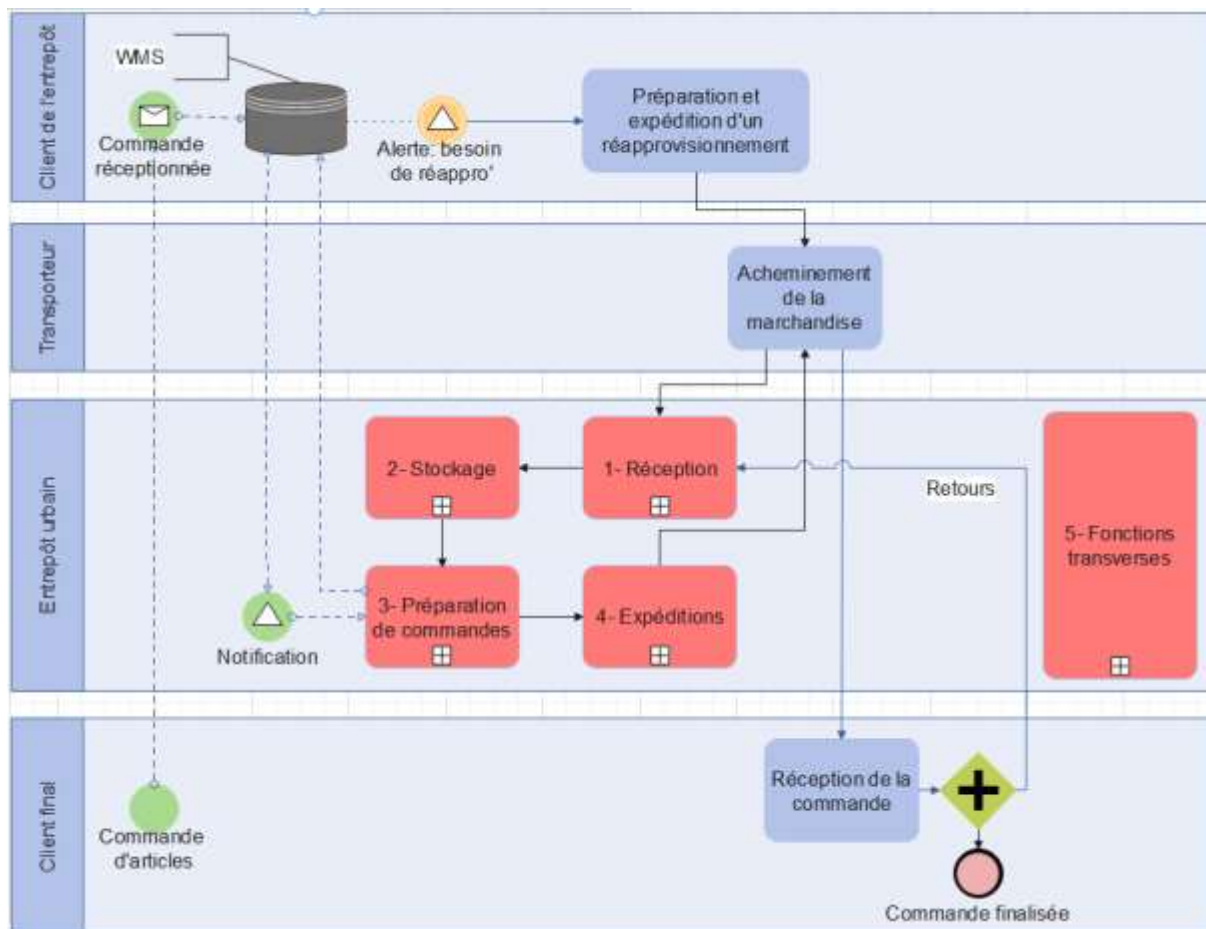


Figure 13 : Processus des entrepôts urbains à T0

4.2.2.1. Réception

La Figure 14 illustre le processus actuel de réception. Les éléments déclencheurs d'une réception sont de trois types : lié à un besoin de réapprovisionnement exprimé lors d'une préparation de commande antérieure, lié à un retour demandé par un client final ou lié à la collecte de produits demandé par un client. Suite à l'un de ces événements, une liste d'attendus de réception est communiquée à l'entrepôt urbain, via email ou le système de gestion (WMS), contenant les quantités par référence devant être réceptionnées. Parallèlement, le client et l'entrepôt urbain conviennent d'une date et d'un créneau avec le transporteur afin que la livraison soit réalisée sans encombre. Et le gestionnaire de l'entrepôt vérifie qu'un protocole de sécurité a bien été signé par le transporteur. Il est obligatoire et à renouveler tous les ans. Le jour durant lequel la livraison a été planifiée, le transporteur prévient de son arrivée quelques minutes avant et se présente au quai de réception de l'établissement destinataire. Le réceptionnaire accueille le transporteur et s'assure du respect des règles de sécurité. Le transporteur doit obligatoirement porter des chaussures de sécurité, arrêter son camion et

déposer ses clés à la réception jusqu'à la fin de la procédure. Le réceptionnaire vérifie ensuite les documents de transport (lettre de voiture, liste de colisage, bon de livraison). Si les informations correspondent bien à ce qui est attendu, la marchandise peut être déchargée. Le réceptionnaire vérifie la marchandise (contrôles qualitatifs et quantitatifs). Dans le cas où des anomalies majeures sont constatées, le réceptionnaire formule des réserves sur les documents de transport, qui seront ensuite transmis au client, et refuse la marchandise. Les documents ne sont signés par aucune des deux parties et le transporteur repart avec la marchandise. Dans le cas où aucune et seules quelques anomalies sont constatées, la marchandise est acceptée et dans le dernier cas, des réserves sont formulées. Les deux parties signent les documents de transport, ce qui acte le transfert de responsabilité. Par la suite, la réception doit être réalisée dans un délai maximum de trois jours, jours fériés non compris. Dépassant ce délai, l'entrepôt n'aura aucun recours si des anomalies sont constatées.

La marchandise réceptionnée est rapatriée dans l'espace de stockage pour être identifiée et rangée. Les agents sont équipés de PDA (*Personal Digital Assistant*) grâce auquel, en scannant les codes-barres des produits, leur sont transmises les données d'identification et d'emplacement. Ces données sont gérées et transmises par le WMS. Le bon de livraison est validé lorsque toutes les pièces ont été rentrées en stock informatiquement, ce qui clôture la réception. Si des pièces sont manquantes, l'information est transmise au client et la réception est mise en attente le temps que le client nous indique la démarche à suivre. Pour finir, si des pièces sont constatées en trop, le client est prévenu et les pièces sont mises de côté pour traitement ultérieur.

4.2.2.2. Stockage

Dans la Figure 15 est représenté le modèle BPMN du processus de stockage. La fin du processus opérationnel de réception présenté ci-dessus pourrait-être détaché et inclus dans le processus de stockage, cependant, nous avons décidé de le représenter ainsi pour clarifier l'enchaînement des étapes. Par conséquent, le processus de stockage tel que représenté est composé de sous-processus de management. Le premier est « gestion des approvisionnements ». Cette activité comprend un ensemble d'actions permettant à l'entreprise de déterminer les besoins (références et leur quantité optimale à stocker) et les moments optimaux de passation de commande (niveau de stock de sécurité). La rentabilité de la société dépend fortement de sa capacité à éliminer le risque de surstockage. Un autre sous-processus du stockage est la « gestion des emplacements ». Il a pour but d'étudier les emplacements des produits afin d'assurer la sécurité des produits et des travailleurs (compatibilité, ergonomie de manutention) et l'optimisation des surfaces utilisées. Un emplacement est l'endroit où un article peut être rangé dans un entrepôt et possède les caractéristiques suivantes : taille (hauteur, largeur, profondeur et, par conséquent, volume), position dans l'entrepôt, l'allée, rayon, l'étagère et le casier, et type d'emplacement (emplacement de stockage en gros, emplacement de prélèvement, emplacement d'inspection, etc.). Une stratégie d'inventaire doit être convenue avec le client afin d'assurer l'exactitude des quantités en stock. Ce troisième processus permet de connaître précisément l'écart entre les références enregistrées dans le système informatique et celles réellement présentes dans l'entrepôt logistique. Il est obligatoire de le réaliser au moins une fois par an pour chacune des références stockées. Il existe deux manières de gérer l'inventaire. L'inventaire tournant consiste à compter les produits par roulement au cours de l'année, par exemple, selon leur emplacement de stockage. Pour l'inventaire périodique, une date précise est définie. Il est souvent associé à une activité de contrôle de stock, qui consiste, sur des périodes plus courtes, à contrôler une partie du stock.

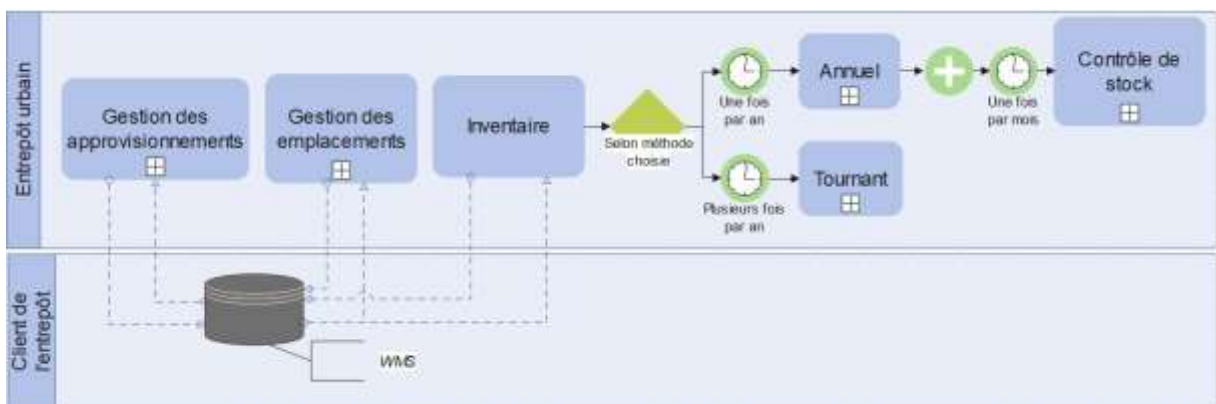


Figure 15 : Processus de stockage T0

4.2.2.3. Préparation de commandes

La Figure 16 illustre le processus actuel de préparation de commandes. L'élément déclencheur est la passation d'une commande par le client final. Le client de l'entrepôt reçoit l'information et elle est transmise à l'entrepôt urbain par le biais du système d'information, qui reçoit une notification. Le préparateur imprime les documents de préparation (bon de préparation, étiquettes produits et étiquettes contenants). En scannant le code-barres présent sur le bon de préparation avec un PDA, l'agent est guidé pour réaliser le prélèvement en stock des articles. Lorsque tous les produits ont été prélevés, ils sont triés, mis en attente si la commande n'est pas complétée ou si le client a demandé une prestation de consolidation des commandes (envoi de plusieurs commandes sous une même expédition, car elles sont à destination du même client final), ou transférés au processus suivant, l'expédition. C'est au moment du prélèvement en stock des produits pour satisfaire les commandes clients que les besoins de réapprovisionnement peuvent avoir lieu si le niveau de stock de sécurité est atteint par exemple.

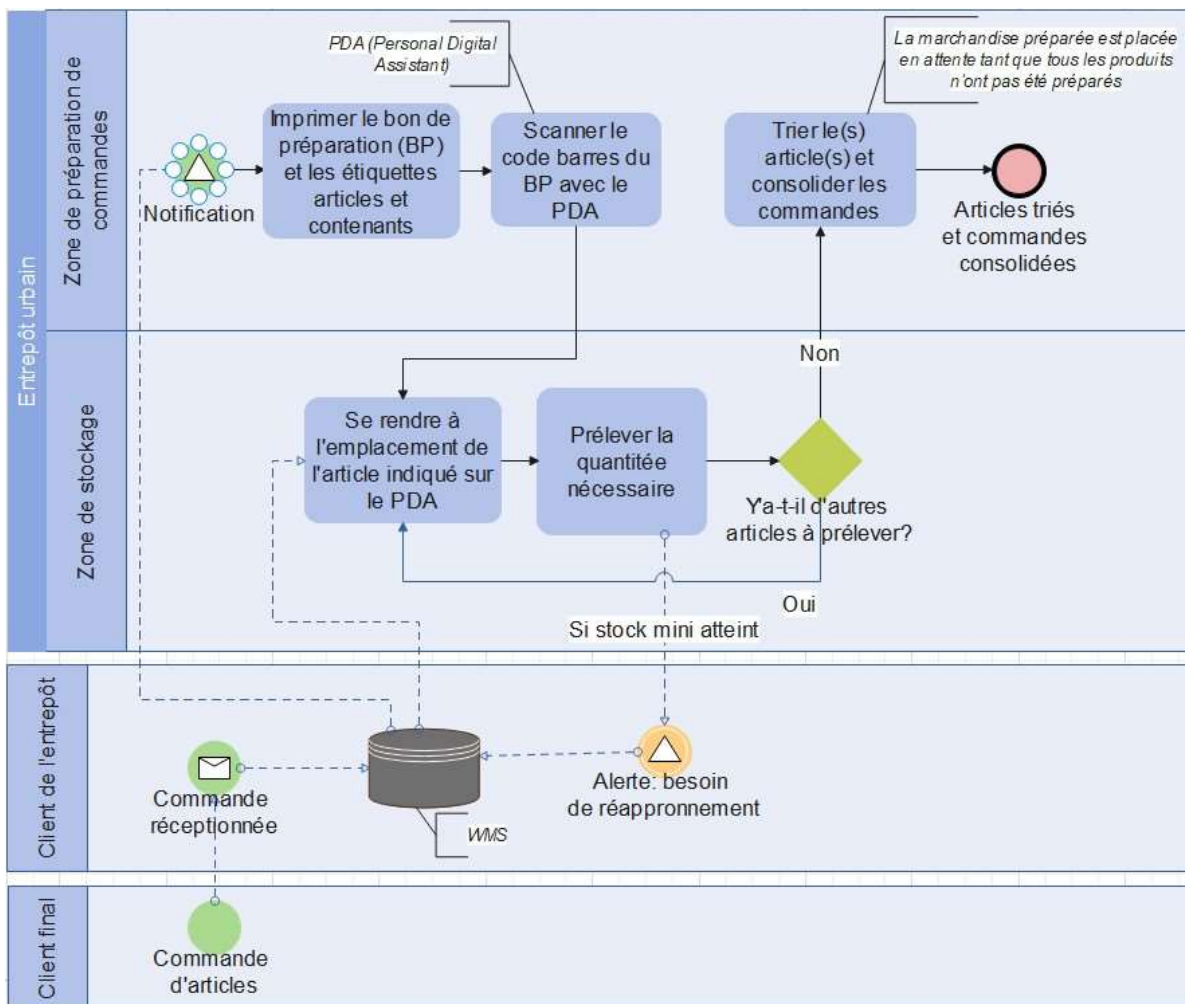


Figure 16 : Processus de préparation de commandes T0

4.2.2.4. Expéditions

Lorsque les articles ont été triés par commande et les commandes consolidées, cela enclenche le processus d'expédition, illustré dans la Figure 17. Pour chaque commande, les bons de livraison sont imprimés. Ils sont ensuite associés à chaque contenant utilisé pour emballer les produits. Lorsque les produits sont emballés, la mise en expédition informatique sur la station chargeur du client permet d'imprimer les étiquettes de transport. Elles sont ensuite apposées sur les contenants correspondants. Les colis préparés sont mis en attente jusqu'à l'heure prévue de collecte, moment auquel la marchandise est remise au transporteur qui doit assurer la livraison au client final. L'entrepôt urbain assure le suivi des expéditions via le système de gestion du transporteur afin de s'assurer qu'aucune anomalie ne se produise. Si une anomalie venait à se présenter, assurer ce suivi permet d'en réduire au minimum l'impact en prévenant le client final et le client de l'entrepôt et en prenant les dispositions nécessaires à la résolution du problème.

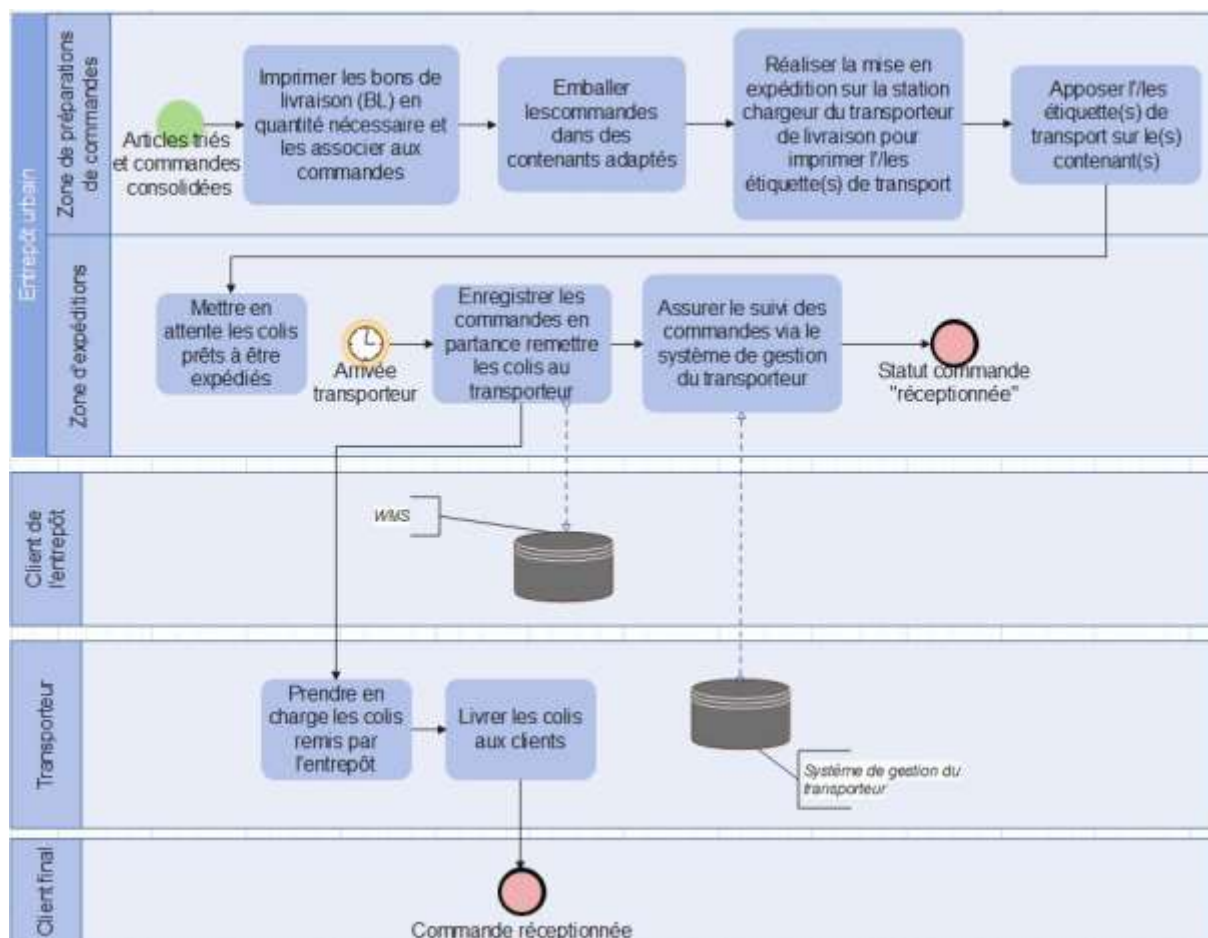


Figure 17 : Processus d'expédition T0

4.2.2.5. *Fonctions transverses*

Le processus des fonctions transverses, représenté dans la Figure 18, est un processus de management composé de plusieurs activités indépendantes nécessitant des prises de décision appuyées par les données collectées sur le terrain. Dans un premier temps, la sécurité et la sûreté en entrepôt comprennent un ensemble de bonnes pratiques visant à aider le personnel à garantir un environnement de travail sécurisé et renforcer les comportements sûrs au sein de l'organisation. Les exploitants des entrepôts ont notamment l'obligation de communiquer :

- les risques encourus par les employés par rapport aux types de produits stockés,
- le plan d'action d'urgence détaillant les actions que les employés doivent entreprendre en cas d'incendie ou d'autres situations d'urgence,
- un plan de prévention des incendies et des issues de secours,
- la liste des équipements de protection à porter selon la situation rencontrée par l'agent.

Ces obligations impliquent de mettre en place des directives pour identifier et maîtriser les risques et éviter tout incident. Cela passe notamment par le renforcement de l'ergonomie sur le lieu de travail, la mise en place de mesures de sécurité incendie appropriées, une tenue de registre sur les contrôles de l'état des installations, etc.

Une deuxième activité du processus des fonctions transverses est la gestion des ressources : matérielles, humaines et financières. Par ressources matérielles, on entend tous les biens dont dispose l'entrepôt et qui ont une existence physique, c'est-à-dire les locaux, les machines, les équipements informatiques, technologiques et de stockage. Il existe sur le marché de nombreuses solutions adaptées aux particularités de chaque entreprise. Le type d'unité de charge et de produit à gérer, les flux de marchandises et d'autres facteurs influencent le choix de ces ressources qui se doivent d'être adaptées à chaque besoin. Dans le cas des entrepôts urbains observés, les locaux utilisés sont d'anciens espaces, libérés suite à l'arrêt d'activités industrielles, non prévues initialement pour une activité d'entreposage. Les équipements utilisés sont des étagères pour le stockage des produits, des rayonnages pour l'entreposage des palettes, des transpalettes et gerbeurs pour la manipulation des palettes, de la signalétique et des équipements de protection individuelle pour la sécurité et des PDAs pour la collecte de données. La mise en place d'un WMS est aussi recommandée pour coordonner toutes les opérations d'un entrepôt. Les ressources humaines regroupent tous les acteurs qui contribuent au fonctionnement des activités de l'organisation. Au sein de l'organisation observée, elles sont de deux types : les agents qui assurent les tâches courantes et le responsable qui assure les tâches de gestion et supervise le travail des agents. Rapporté aux processus, les agents garantissent les processus opérationnels et le responsable, les processus de management. Les ressources

financières représentent la capacité économique d'une entreprise (liquidités, dépenses, revenus, investissements). Réduire les coûts d'exploitation et augmenter les profits sont les objectifs principaux des exploitants des entrepôts. Pour y arriver, ils doivent travailler sur les divers coûts d'un entrepôt urbain et cela passe par l'optimisation des processus.

L'utilisation de ces ressources doit être planifiée afin d'éviter tout dysfonctionnement qui pourrait impacter la satisfaction client. Une bonne planification logistique est essentielle pour optimiser l'ensemble des opérations de l'entrepôt. Elle consiste à établir un plan d'action afin d'utiliser de manière optimale les ressources disponibles en tenant compte du flux de travail des opérateurs, et des entrées et sorties de produits.

S'additionne aux deux précédentes activités la gestion des flux. La chaîne de flux commence de la passation des commandes et se poursuit jusqu'à la livraison de ces mêmes commandes aux clients finaux, se succèdent des flux physiques et des flux d'informations. Cette fonction vise à piloter l'ensemble des activités de l'entrepôt.

Les processus présentés sont analysés dans la section suivante afin de proposer des solutions d'optimisation adaptées.

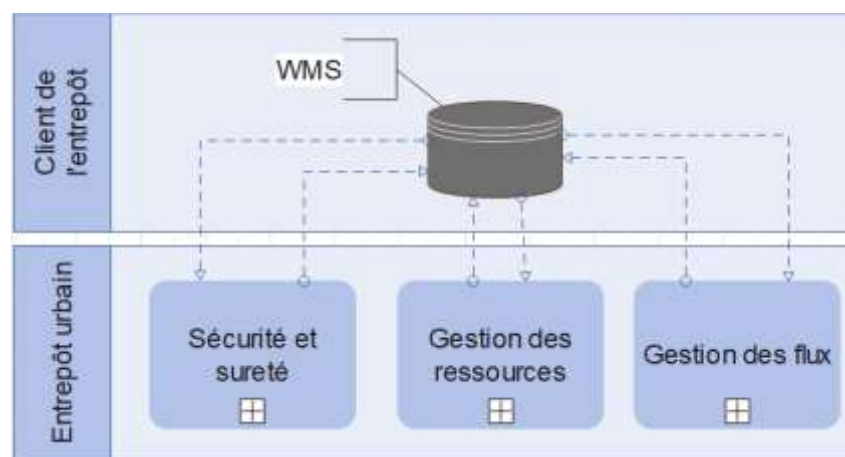


Figure 18 : Processus des fonctions transverses T0

4.2.3. Analyse du processus d'entreposage urbain actuel

Nous avons modélisé le processus actuel (modèle T0), avec ses cinq sous-processus clés : réception, stockage, préparation de commandes, expéditions et fonctions transverses. Nous notons que les acteurs externes interagissant avec l'entrepôt urbain sont les clients de l'entrepôt, les transporteurs et les clients finaux (les clients de nos clients). Selon les processus, des zones physiques de réalisation de l'activité y sont associées. Par exemple, le début du processus de réception est réalisé au niveau du poste assurant la gestion de l'entrepôt, puis il est poursuivi en zone de réception, pour finir en zone de stockage.

Cette cartographie nous a permis de constater que les activités clés de l'entrepôt sont bien mises en pratique. Nous avons convenu que le processus observé peut être proposé comme un standard pour un processus d'entrepôt urbain. Cependant, nous constatons que toutes les tâches pour réaliser ces activités sont réalisées de façon manuelle. Le seul support de prise de décision observé est le système de gestion (WMS) en place, dont les données qu'il comporte peuvent être exploitées par les décideurs. Ce processus révèle un manque d'outils support pour la prise de décisions et l'absence de prise en compte des caractéristiques des entrepôts urbains. Nous l'avons évoqué en première partie de chapitre, pour performer, le modèle des entrepôts urbains doit relever des défis liés à son emplacement. Des propositions d'optimisation doivent être faites pour s'assurer que les processus soient adaptés à l'environnement dans lequel ils sont intégrés. Nous constatons qu'actuellement aucune technologie de l'Industrie 4.0 n'est employée dans les entrepôts urbains étudiés. Nous proposons leur emploi afin de rendre l'organisation plus « intelligente ». Dans la section suivante, nous présentons les technologies qui pourraient être incorporées dans le futur et l'impact de leur emploi sur les processus.

4.2.4. Proposition d'un processus 4.0 (Version Tn)

Cette section propose un modèle revu et amélioré, appelé Tn, intégrant les technologies de l'Industrie 4.0 dans chaque macro-processus initial. Ce modèle est considéré comme le niveau final que l'entrepôt urbain pourrait atteindre après de multiples cycles de mise en œuvre et d'amélioration. Dans la modélisation BPMN proposée, nous avons ajouté une voie nommée "Technologies 4.0", dans laquelle nous avons placé les activités qui s'appuient sur les technologies de l'Industrie 4.0.

Pour déterminer l'étendue des améliorations apportées aux processus 4.0, nous avons considéré les quatre niveaux de capacité de l'Industrie 4.0 introduits dans le chapitre 2 : la surveillance, le contrôle, l'optimisation et l'autonomie. Avec l'intégration des technologies de l'Industrie 4.0 dans le processus, nous avons également considéré les objectifs de performance associés aux entrepôts de distribution, définis aussi dans le chapitre 2, en gardant en mémoire l'importance de répondre prioritairement aux défis des entrepôts urbains, exposés en première partie du chapitre 3. Finalement, la proposition reprend les éléments ayant constitué le cadre d'analyse de l'état de l'art portant sur les technologies de l'Industrie 4.0 employées dans les entrepôts traditionnels. La Figure 12, présentée en conclusion de cet état de l'art, a aussi permis de guider ce travail. On y a fait la distinction entre les technologies s'appliquant sur une partie physique et une autre à un niveau informationnel et décisionnel.

Les descriptions données ci-après par macro-processus des entrepôts urbains identifient les activités qui pourraient être améliorées et les technologies appropriées pour y arriver et déterminent le champ d'application de l'initiative.

4.2.4.1. Réception

La version Tn du premier sous-processus est présentée dans la Figure 19.

A la vue des contraintes physiques, il est difficile d'envisager l'emploi d'équipements de manutention automatiques, tel qu'un réseau de convoyeurs ou des AGV. Utilisés pour acheminer la marchandise vers les diverses zones de l'entrepôt urbain, ces solutions sont connues pour améliorer l'ergonomie et réduire la pénibilité du travail et des temps de manutention dans les entrepôts traditionnels. Cependant, aux vues de leurs caractéristiques physiques, elles ne sont pas proposées dans ce processus de réception revu.

La réception informatique, consistant à enregistrer les données des produits réceptionnés dans le système de gestion, peut quant à elle être soutenue par l'IdO. Lorsqu'elle est mal gérée, elle peut donner lieu à de nombreuses erreurs de stocks, limitant la productivité de l'entrepôt. En positionnant des lecteurs RFID, solution de l'IdO, aux portes d'entrée de l'entrepôt, les données des marchandises les traversants sont automatiquement enregistrés dans le WMS. Pour fonctionner, les produits réceptionnés doivent être équipés d'étiquettes RFID, puces reliées à des antennes miniatures qui contiennent les données et les transmettent via des ondes radio. Ce paramètre implique que l'étiquetage des produits ait été réalisé en amont, au moment de la fabrication par exemple. Cette solution permet un enregistrement très rapide de l'entrée de marchandise, réduisant le temps de mise en vente du produit et une meilleure qualité, dans la mesure où le comptage de la marchandise reçue sera automatisé. Les systèmes de stockage et de prélèvement automatisés (AS/RS), dispositifs autonomes, présentent aussi ces avantages et automatisent le rangement des marchandises dans le stock. Ces systèmes consistent en une variété de systèmes commandés par ordinateur pour placer et récupérer automatiquement des charges à partir d'emplacements de stockage définis. Les systèmes commandés qui les composent se déplacent sur des structures diverses, qui, du fait des contraintes de place des entrepôts urbains, ne pourront pas être toujours utilisées. La réalisation d'études sera nécessaire pour déterminer la faisabilité d'utiliser de tels systèmes selon les caractéristiques techniques de l'entrepôt urbain.

Lors de la réalisation de l'état de l'art présenté dans le chapitre 2, nous avons constaté qu'il existait des solutions novatrices de déballage automatique. Composées d'un système de perception, d'un robot monté sur un bras mobile, d'un cutter personnalisé et d'une stratégie de

planification, nous pensons qu'elles ne sont pas adaptées au contexte, les quantités de flux ne justifiant pas leur usage.

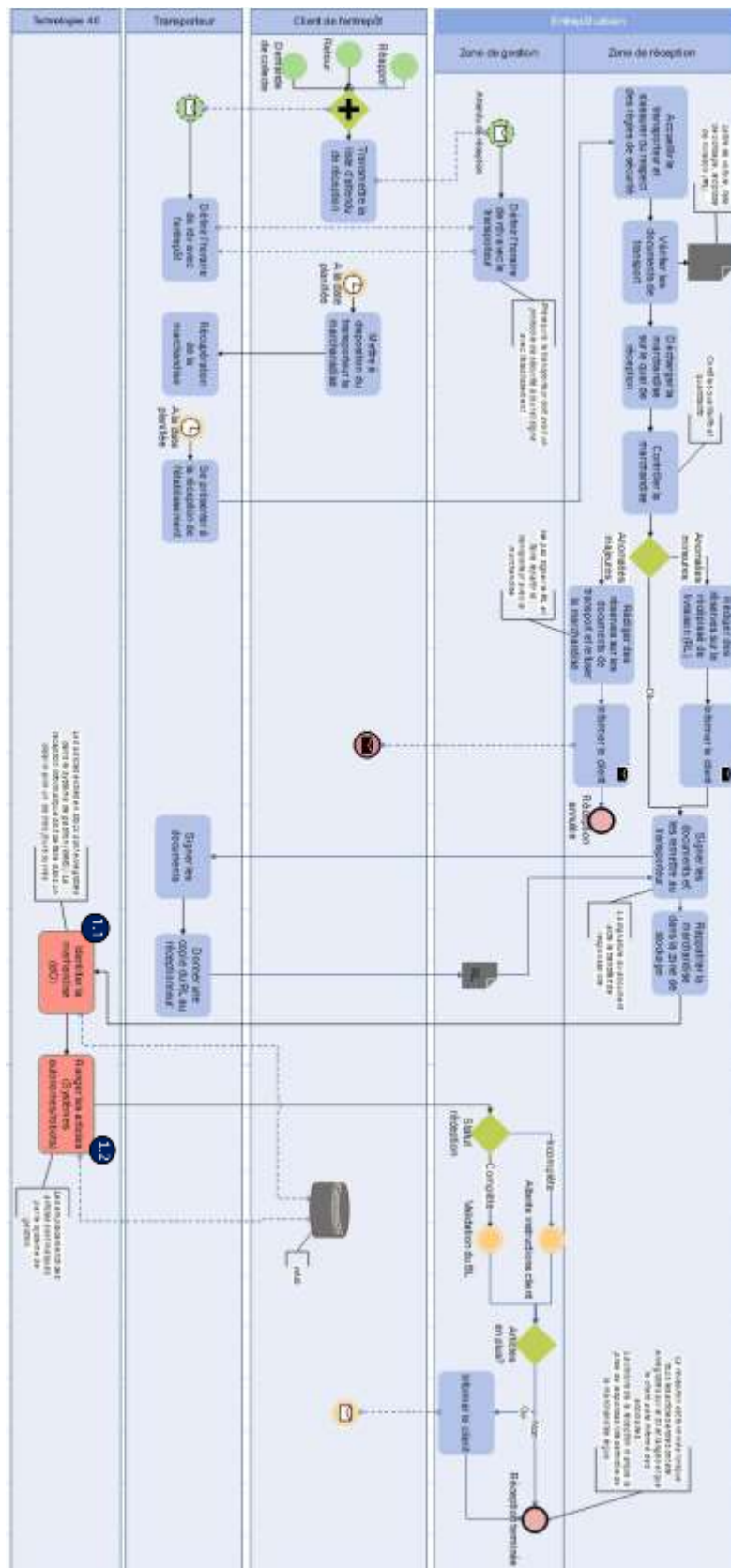


Figure 19 : Processus de réception 4.0 (version Tn)

4.2.4.2. *Stockage*

La version Tn du deuxième sous-processus, le stockage, est présentée à la Figure 20.

Les emplacements peuvent être générés par des techniques d'analyse de données Big Data. Ces solutions permettent d'explorer les données historiques pour déterminer le positionnement des références dans le stockage de l'entrepôt. Sont prises en compte les contraintes de compatibilité des produits, impactant la sécurité des produits et des personnes, leurs caractéristiques physiques (poids, dimensions, volume), étudiées pour une meilleure ergonomie lors de la manipulation des produits, et leur demande, pour associer les références les plus sollicitées ensemble et les disposer au plus proche de la sortie du stock. Les AS/RS prennent eux aussi en compte ces paramètres pour optimiser le rangement au sein du système et gèrent de façon automatique les emplacements. Les techniques de jumeaux numériques sont aussi employées pour accompagner cette activité (Elbouzidi et al., 2022). L'organisation est représentée sous une forme virtuelle à l'aide des données du terrain collectées en temps réel notamment grâce à des technologies de l'IdO, et utilise la simulation, l'apprentissage automatique et le raisonnement pour faciliter la prise de décision.

Le traitement des données historiques est aussi nécessaire pour la gestion des approvisionnements, activité qui permet de définir les niveaux de stock minimum, de sécurité et maximum pour répondre à la demande client tout en évitant le surstockage. L'utilisation de l'IdO capturant les données du terrain en temps réel permet de créer des alertes selon les données rapportées. Par exemple, si le niveau de stock de sécurité est atteint lors du prélèvement de produits d'une référence pour la préparation d'une commande, avec l'IdO, le système de gestion est alerté en direct et crée une alerte de réapprovisionnement. Quant aux inventaires, eux aussi sont améliorés avec l'utilisation de l'IdO. Les solutions d'IdO permettent de supprimer les enregistrements manuels et d'utiliser des systèmes robotisés tels que des drones équipés de lecteurs RFID. Cela réduit les erreurs humaines et supprime les tâches à pénibilité pour les agents. La réalité augmentée est quant à elle employée pour guider les agents dans les tâches d'inventaire en transmettant des informations visuelles sur les emplacements à inventorier. La fabrication additive se présente comme une piste intéressante pour les entrepôts urbains, car cette solution permet de transférer le stockage physique en stockage numérique dans des entrepôts virtuels de données. Les pièces sont produites à la demande et il est seulement nécessaire de stocker les quelques références de matières premières nécessaires pour la production.

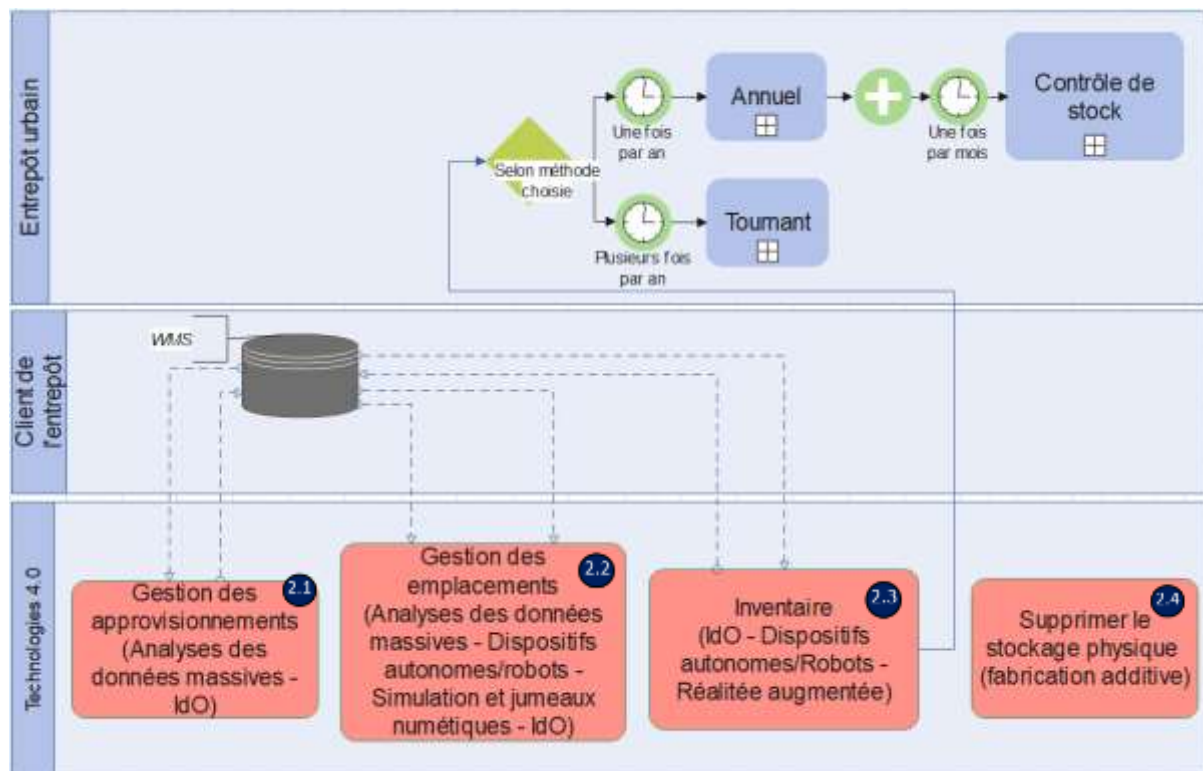


Figure 20 : Processus de stockage 4.0 (version Tn)

4.2.4.3. Préparation de commandes

Dans la Figure 21 est représenté le modèle BPMN du processus de stockage 4.0.

Dans ce processus, l'adoption de l'Intelligence Artificielle, de solutions d'IdO associées à des systèmes de lecture sans fil et de systèmes de réalité augmentée peut améliorer les déplacements et limiter les erreurs, notamment au moment du prélèvement des produits en stock. Le stockage manuel peut être complété par des dispositifs d'assistance au prélèvement tels que le prélèvement vocal ou le « *pick-to-light* », qui facilitent les tâches des opérateurs en leur montrant comment préparer les commandes étape par étape. Additionnellement, les exosquelettes sont conçus pour aider les employés lors des mouvements de levage et de rotation du corps, observables lors des opérations de préparations des commandes. Des dispositifs autonomes tel que les AS/RS, quant à eux, permettent de supprimer la tâche « se rendre à l'emplacement de l'article », car ce sont des systèmes appelés « *goods-to-man* », où la marchandise est livrée au poste de préparation de l'opérateur. L'ajout de robots collaboratifs en sortie de ces systèmes permet d'automatiser le prélèvement des produits dans les bacs qui se présentent au poste de prélèvement. Une fois que tous les produits d'une commande ont été préparés, ils peuvent être transférés vers le processus de stockage. Ce transfert et le tri des commandes sont connus pour être réalisés avec des robots mobiles et collaboratifs dans les

entrepôts traditionnels. Cependant, les caractéristiques physiques des entrepôts urbains limitent très fortement leur usage. Ces solutions ne sont donc pas proposées dans le processus 4.0.

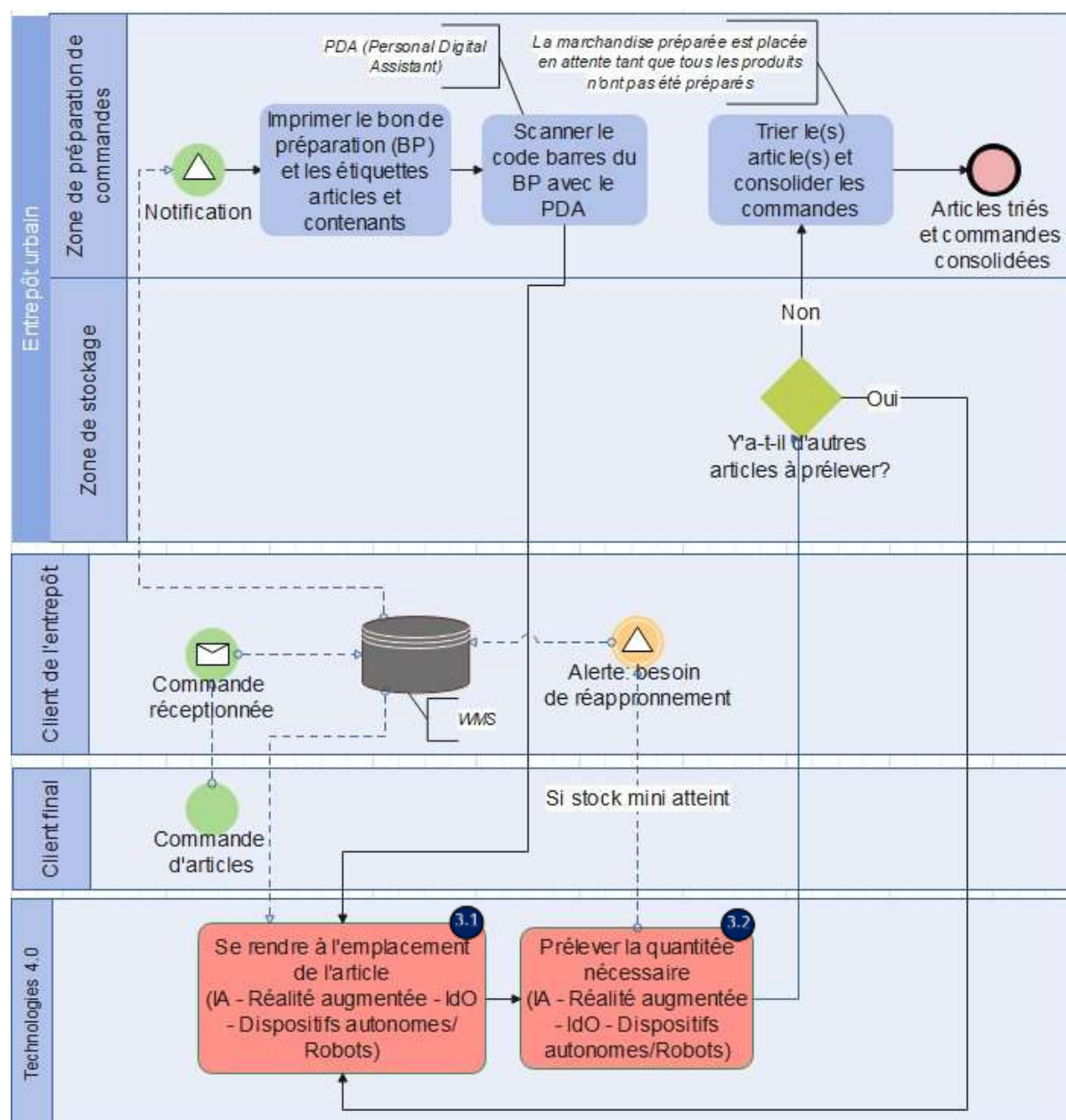


Figure 21 : Processus de préparation de commandes 4.0 (version Tn)

4.2.4.4. Expéditions

Le modèle BPMN de ce sous-processus est présenté à la Figure 22.

Dans le cadre du processus d'expéditions, il n'est pas aisé pour les agents d'identifier l'emballage adéquat pour chaque article ou ensemble d'articles à conditionner. Cependant, réussir à optimiser l'emballage et réduire au maximum le vide dans les colis permet de réaliser des économies considérables, d'accroître la compétitivité tout en respectant l'environnement.

Des applications de dimensionnement peuvent être utilisées pour accompagner cette activité. A partir des données dimensionnelles des produits, enregistrées sur le WMS ou capturées par un système de dimensionnement s'appuyant sur une caméra 2D/3D, est déterminé l'emballage le plus adapté. Dans la perspective de réduire les déchets et de développer des pratiques durables, l'usage d'emballages réutilisables est une autre solution d'emballage qui se démocratise. Ces contenants peuvent être équipés de systèmes d'IdO pour acquérir une capacité de traçabilité des flux, de la température, ou encore des chocs.

Pour l'enregistrement de toutes les sorties de produits de l'entrepôt urbain, comme pour l'enregistrement des données des articles entrées en réception, l'utilisation de l'IdO peut s'avérer utile. La mise à jour en temps réel des niveaux de stock est faite pour chaque référence dès que la commande quitte l'installation logistique au moment d'être remise au transporteur.

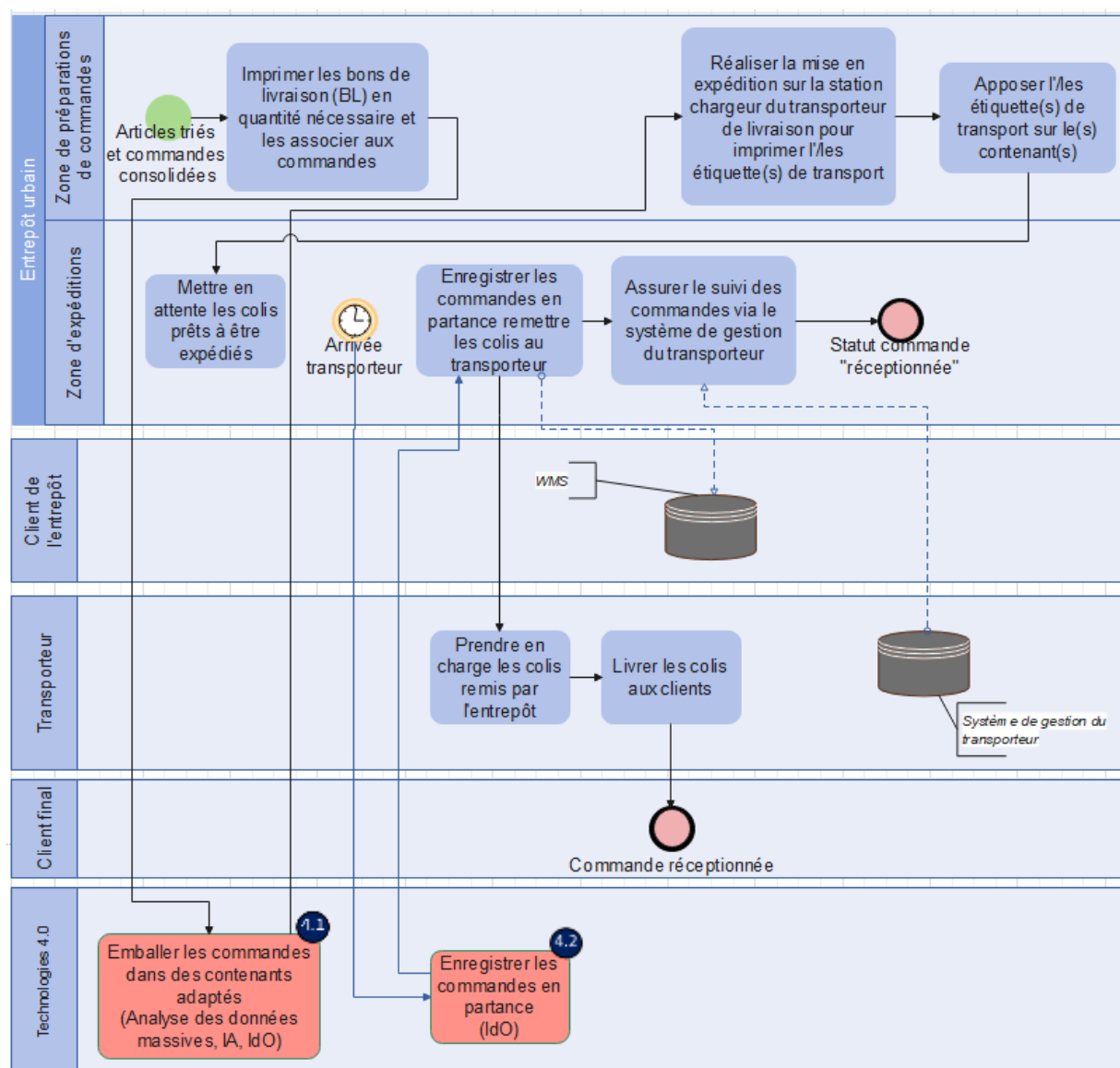


Figure 22 : Processus d'expéditions 4.0 (version Tn)

4.2.4.5. Fonctions transverses

La Figure 23 présente la version Tn du processus des fonctions transverses. Les activités qui le composent permettent d'assurer la gestion globale de l'entrepôt. Les activités qui le composent agissent sur deux niveaux, informationnel ou physique. Le premier niveau repose sur l'analyse des données collectées sur le terrain. Le WMS est le premier pilier de ce processus. Il coordonne toutes les opérations de l'entrepôt, organise les données et facilite les échanges d'informations avec les clients. De plus, il permet de supprimer le papier, réduire les déchets et donne accès à l'information à n'importe quel endroit dans l'entrepôt. Nous l'avons vu dans les processus décrits précédemment, l'IdO est la solution technologique tirée de l'Industrie 4.0 qui facilite la surveillance et la collecte des données du terrain. Grâce à ces données, le système de gestion, aidé de programmes d'analyse des données massives, est généralement conçu pour fournir des tableaux de bord pour chaque activité afin de contrôler la performance de l'entrepôt en tous points pour lesquels la donnée a été collectée. Une fois que les données ont été contrôlées, il est possible d'établir un programme d'exploration et d'études pour optimiser les processus. Ce niveau est possible à atteindre en mettant en place des solutions de simulation et de jumeaux numériques, qui permettent de modéliser des systèmes entiers de façon numérique, d'en modifier les paramètres et d'offrir une vision détaillée de la performance pour chaque scénario. Les données produites avec ces systèmes permettent de guider les gestionnaires dans les prises de décisions stratégiques et d'optimiser notamment la gestion des flux, l'organisation du stockage et l'ergonomie des espaces de travail. Arrivée à ce stade, la dernière étape est de rendre autonomes ces prises de décision. L'intelligence artificielle est connue pour accompagner les systèmes, notamment les robots, dans les prises de décisions intelligentes et effectuer des tâches de manière automatisée et autonome, au niveau physique, ne nécessitant plus l'intervention humaine.

Les solutions de cloud et de cybersécurité chapeautent toutes ces opérations qui gèrent et génèrent de la donnée. Le cloud computing délivre des services via Internet, tels que du stockage de données, de la puissance de calcul, des logiciels, ou encore des outils d'analyse de données (TALHI & FORTINEAU, 2020). Avoir accès à ces services hors Internet nécessite des investissements considérables. Cette solution permet donc de réduire les coûts et de gagner en agilité. Cependant, tout comme le sont les serveurs internes, les plateformes Cloud sont concernées par les cyberattaques. Pour sécuriser les données générées dans l'entrepôt, il faut par conséquent mettre en place des solutions de cybersécurité. L'une des branches de la cybersécurité est notamment connue pour assurer la sécurité des échanges de données entre les

différentes parties de la chaîne d'approvisionnement, c'est la blockchain. Elle crée notamment une chaîne sûre de traçabilité.

Toutes les solutions présentées viennent soit accompagner les décideurs dans les prises de décision, soit outiller les opérations physiques, concernant la sécurité et la sûreté des produits, des installations, des personnes et des données, la gestion des ressources et des flux.

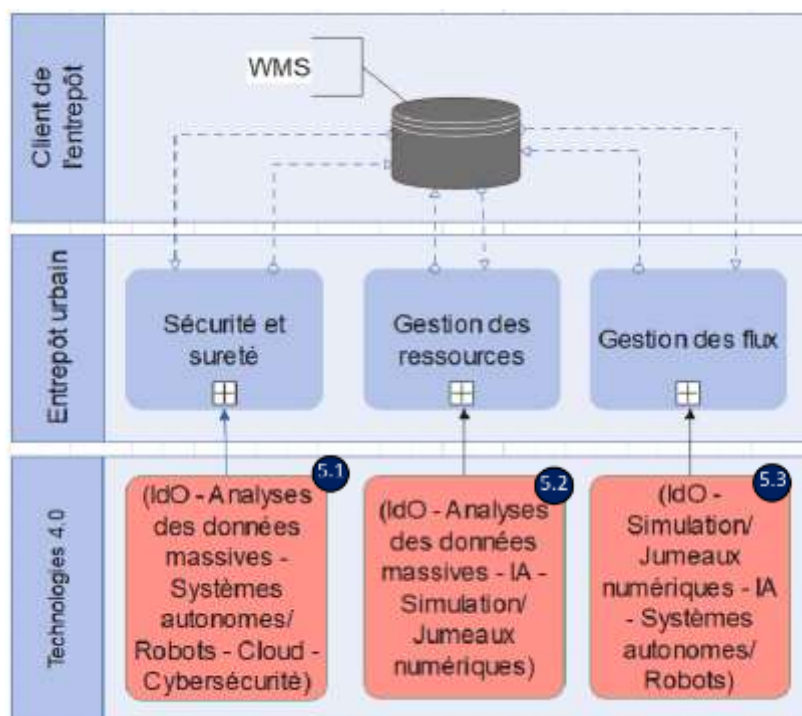


Figure 23 : Processus des fonctions transverses 4.0 (version Tn)

4.2.5. Discussions

Au regard des enjeux des entrepôts urbains, nous avons proposé l'emploi de solutions tirées de l'Industrie 4.0 pour optimiser les processus standards de notre partenaire industriel formalisés lors de l'étape précédente. Pour être pertinente, une solution doit être avantageuse économiquement. Ça peut se traduire notamment par un faible besoin de moyens de mise en œuvre (matériels, humains ou financiers) apportant un niveau plus ou moins important d'améliorations ou par des coûts de mise en œuvre très élevés avec des gains financiers qui les justifient. Pour évaluer la pertinence de la mise en œuvre des propositions faites, nous avons proposé une notation utilisant des « moins » (-) (peu pertinent) et des « plus » (+) (très pertinent). Le Tableau 8 présente les résultats de cette analyse. Cette évaluation prend en compte quatre critères :

- La capacité de mise en œuvre : Mettre en place de nouvelles solutions technologiques requiert la maîtrise de nouvelles compétences et nouvelles expertises. Les opérationnels

doivent monter en compétences et être formés pour évoluer dans un milieu connecté, ce qui consomme du temps et de l'argent. De plus, quelques expertises sont nécessaires pour suivre l'évolution des nouvelles technologies, telles que : des spécialistes en science des données (data science), programmation, Internet des Objets ainsi qu'en Intelligence Artificielle. Si ces compétences ne sont pas déjà au sein des équipes, l'entreprise doit se faire accompagner.

- Le coût estimé d'investissement : La mise en œuvre de telles solutions nécessite ainsi des investissements sur les humains, mais aussi matériels. Les solutions proposées sont associées à des technologies qui nécessitent pour la plupart l'achat de systèmes aux coûts plus ou moins élevés.
- Les gains financiers attendus : Pour chaque proposition est attendu un gain financier, justifiant les moyens mis en œuvre.
- Le niveau de réponse aux défis des entrepôts urbains : Le gain financier sera d'autant plus important qu'il répondra aux défis spécifiques aux entrepôts urbains, car ce sont les premiers points identifiés comme stratégiques dans l'optimisation des processus.

Les scores finaux des propositions peuvent être utilisés comme « feuille de route » pour le déploiement des solutions. En effet, celles avec le plus grand score sont les propositions identifiées comme les plus pertinentes et par conséquent à mettre en œuvre en premier.

Tableau 8 : Évaluation des propositions 4.0

Sous-processus	ID activité	Technologies	Objectifs	Capacité de mise en œuvre	Coûts estimés	Gains estimés	Réponse aux défis	Score
1	1.1	IdO	Identifier la marchandise et enregistrer les mouvements en temps réel	++	+	+	-	++
1	1.2	Dispositifs autonomes/Robots	Automatiser le rangement des articles	+	-	+	+	++
2	2.1	Analyse des données massives	Améliorer la gestion des approvisionnements	+	-	+	++	+++
2	2.2	Analyse des données massives - Simulation et jumeaux numériques	Améliorer la gestion des emplacements	-	+	++	++	++++
2	2.2	Dispositifs autonomes/Robots - IA	Améliorer la gestion des emplacements	+	--	++	+++	++++
2	2.3	Dispositifs autonomes/Robots - IdO - Réalité augmentée	Automatiser ou accompagner l'inventaire	+	+	-	-	-

2	2.4	Fabrication additive	Supprimer le stockage des produits	--	-	+	++	-
3	3.1	IA - Réalité augmentée - IdO	Guider l'agent dans la collecte de produits en stock	+	+	+	-	++
3	3.1	Dispositifs autonomes/Robots	Guider l'agent dans la collecte de produits en stock	+	-	++	+	+++
3	3.2	IA - Réalité augmentée - IdO - Dispositifs autonomes/Robots	Faciliter le prélèvement des produits en stock	+	+	-	-	-
4	4.1	Analyses de données massives - IA - IdO	Sélectionner les contenants les mieux adaptés au profil des commandes	-	+	-	+++	++
4	4.2	IdO	enregistrer les mouvements de marchandise en temps réel	++	+	+	-	++
5	5.1	IdO - Analyse des données massives - Dispositifs autonomes/Robots - Cloud - Cybersécurité	Améliorer la sécurité et la sûreté dans l'entrepôt	-	+	+	+	++
5	5.1	IdO - analyses des données massives - Simulation/Jumeaux numériques - IA	Accompagner les prises de décision liées à la gestion des ressources	-	+	+	+	++
5	5.2	IdO - Simulation/Jumeaux numériques - IA - Dispositifs autonomes/Robots	Améliorer la gestion des flux	-	+	+	+	++

Nous avons constaté que les technologies agissant sur la partie informationnelle sont les moins impactées par les caractéristiques des entrepôts urbains, s'expliquant par le fait que les entrepôts urbains font face à beaucoup de contraintes physiques. Cependant, au regard des scores obtenus, nous identifions que les dispositifs autonomes et robots ont le meilleur score pour leur réponse aux défis des entrepôts urbains. Moins coûteux et moins dangereux que les robots traditionnels, les nouveaux dispositifs autonomes accompagnent ou remplacent les humains dans des tâches sans valeurs ajoutées ou pénibles. Beaucoup plus faciles à gérer, ils offrent de nombreux avantages déjà précédemment évoqués. Dans le cadre des entrepôts urbains, nous avons particulièrement identifié que leur usage pouvait être pertinent pour améliorer les volumes à exploiter. Plus précisément, dans les propositions faites nous avons évoqué les AS/RS qui combinent plusieurs avantages identifiés comme importants pour les entrepôts urbains, dont notamment : optimisation du foncier, modularité et flexibilité, rapidité d'exécution et sécurisation des opérations. Malgré ces avantages, ce sont des solutions dont l'investissement

financier initial est important et qui impliquent donc de réaliser des analyses poussées pour vérifier la pertinence de mettre en œuvre de tels systèmes dans les entrepôts urbains. En effet, la proposition des modèles 4.0 correspond à la première étape de transition vers le 4.0. La perspective de ce travail est de mettre en place ce processus. Pour mettre en place les modèles 4.0, les entreprises doivent dans un premier temps sélectionner les solutions qui leur semblent pertinentes et qu'elles souhaitent déployer, et se faire accompagner pour mener des études approfondies pour chacune d'entre elles.

4.2.6. Conclusion

Notre premier objectif de ce chapitre était de décrire les caractéristiques du modèle des entrepôts urbains. Pour cela, s'appuyant sur les observations de terrain réalisées chez notre partenaire industriel et les informations acquises via l'état de l'art, nous avons proposé une description des caractéristiques principales des entrepôts urbains. Ensuite, notre stratégie a été de les comparer aux entrepôts de distribution traditionnels, dont les processus standardisés ont été répertoriés lors de l'état de l'art, et d'observer leurs différences. Grâce à ce travail, les défis à relever par les entrepôts urbains ont été exposés afin de comprendre la complexité de ce nouveau concept et proposer des solutions d'optimisation adéquates.

Afin d'atteindre ce but, notre deuxième objectif était de proposer un standard pour le processus d'entreposage urbain de notre partenaire industriel. Nous avons modélisé le processus actuel (modèle T0), avec ses cinq sous-processus clés : réception, stockage, préparation de commandes, expéditions et fonctions transverses. Cette cartographie nous a permis de constater que les activités clés de l'entreposage sont bien en pratique dans les entrepôts observés. Nous avons par conséquent convenu que le processus observé peut être proposé comme un standard pour un processus d'entreposage urbain mature. Néanmoins, nous avons constaté que toutes les tâches pour réaliser ces activités sont réalisées de façon manuelle. Le seul support de prise de décision observé est le système de gestion (WMS) en place, dont les données qu'il comporte peuvent être exploitées par les décideurs. Ce processus est comparable aux processus observés dans les entrepôts traditionnels, exposés plus tôt dans ce mémoire, cependant, il révèle un manque d'outils support pour la prise de décisions et l'absence de prise en compte des caractéristiques des entrepôts urbains.

De ce fait, nous avons proposé des sous-processus intégrant des groupes technologiques tirés de l'Industrie 4.0 pour permettre de répondre aux défis que doivent relever ces installations et

particulièrement ceux qui leur sont spécifiques : optimisation du foncier, modularité et reconfigurabilité, et durabilité. Chaque groupe apporte un niveau de capacité et de maturité aux processus. L'IdO, l'infonuagique (cloud) et la cybersécurité sont les groupes technologiques qui ont été incorporés aux activités de surveillance. Le contrôle est atteint notamment avec l'analyse des données massives. Le troisième niveau est en relation avec les activités de support dans la prise de décisions. L'optimisation est rendue possible avec des solutions de simulations et jumeaux numériques. L'intelligence artificielle apporte une capacité d'autonomie, notamment aux dispositifs autonomes et robots.

Avec les modèles T0 et Tn, nous avons pu atteindre les objectifs proposés en début de ce chapitre : la proposition d'un standard pour le processus d'entrepôt urbain et l'association des groupes technologiques 4.0 à ce processus pour répondre aux défis de l'environnement dans lequel il s'intègre. Parmi les propositions présentées, les AS/RS ont été identifiés comme l'une des solutions les plus pertinentes afin de répondre aux enjeux d'optimisation des processus d'entrepôt urbain. Notre partenaire industriel n'a, à ce jour, pas encore engagé une démarche de transformation numérique. Néanmoins, afin de supporter notre objectif de proposer des solutions adaptables au contexte industriel actuel, nous avons mené un cas d'étude sur les AS/RS afin de vérifier leur compatibilité avec les caractéristiques d'un des clients du partenaire industriel. Celui-ci est présenté dans le chapitre 5. Comme le cite Christine Meyer (Meyer, 2001), qui a proposé une méthodologie pour la réalisation d'une étude de cas, utiliser une étude de cas est particulièrement utile pour répondre aux questions "comment" et "pourquoi" des phénomènes contemporains.

Chapitre 5. Cas d'application

Ce chapitre présente un projet réalisé en collaboration avec notre partenaire industriel, objet de l'article de revue suivant : (Edouard et al., 2022), dont le but était d'expérimenter l'une des solutions 4.0 envisageables pour le modèle d'entrepôts urbains. Pour réaliser cette étude, nous avons suivi une méthodologie visant à outiller les concepteurs dans l'identification des technologies pertinentes pour le développement de systèmes intelligents. Celle-ci a permis de guider l'étude et de cadrer les résultats de l'expérimentation menée.

1.1. Présentation de l'étude de cas

Les entrepôts urbains sont particulièrement confrontés au défi de l'utilisation des surfaces exploitées. Parmi le marché très actif des solutions technologiques en logistique, les AS/RS ont été identifiés comme une solution pertinente pour relever ce défi. De manière générale, les AS/RS sont connus et adoptés pour leur capacité à offrir une meilleure ergonomie pour les travailleurs, une meilleure rapidité et traçabilité des flux, garantissant le « zéro erreur » et permettant d'optimiser les surfaces disponibles en densifiant les stocks dans des espaces limités. En effet, avec ces installations, le nombre et la taille des allées de circulation sont considérablement réduits, voire supprimés. De plus, certaines d'entre elles offrent la possibilité de profiter de tous les volumes disponibles (grandes hauteurs). Avec ces systèmes, il est plus facile de tirer parti de « surfaces atypiques » qui ne pouvaient être envisagées jusqu'à présent.

Introduites dans les 1950's, il s'agissait à l'origine de solutions de rayonnage desservies par des chariots mécanisés circulant dans les allées afin de stocker les produits sur des palettes et d'extraire ces produits du stockage afin d'exécuter les commandes de manière automatisée. Bien que ces solutions introduisent l'automatisation et l'informatique dans l'entrepôt, l'intervention et l'action humaine étaient nécessaires pour que ces processus fonctionnent. Désormais, elles combinent les technologies 4.0 (robotique et automatisation, internet des objets, intelligence artificielle et informatique en nuage) afin d'atteindre un niveau « intelligent ». En effet, les améliorations de l'automatisation via des appareils intelligents offrent le moyen de réagir plus rapidement lorsqu'une interruption de processus se produit. Les capteurs (IdO) peuvent être utilisés pour surveiller l'état des systèmes dans un processus de production ou de distribution et envoyer des alertes lorsque les paramètres de performance ne sont pas au rendez-vous. Les

dispositifs de détection intelligents et connectés intégrés à l'AS/RS améliorent les fonctionnalités et offrent une plus grande autonomie globale. La disponibilité des données et les contrôles de sécurité permettent aux opérateurs de prendre de meilleures décisions, plus éclairées.

La maturité des technologies 4.0 a rendu ce type de solution abordable. Inaccessibles jusque dans les années 2010 en raison de leur coût élevé et de leur manque de flexibilité (Roodbergen and Vis, 2009), les AS/RS ont gagné en popularité, offrant des solutions intelligentes qui s'adaptent à un grand nombre d'utilisateurs, grâce à leur flexibilité, à la variété de leurs tailles et à la diversité de leurs budgets. Les publications scientifiques confirment cette tendance. Dans la base de données Scopus, si l'on se réfère aux articles dont les termes « AS/RS » ou « automated storage and retrieval system » sont inclus dans leur titre, leur résumé ou leurs mots-clés, on remarque les tendances suivantes : le premier article a été publié en 1970 ; entre 1970 et 2000, trois articles ont été publiés en moyenne par an contre près de six entre 2000 et 2010, et depuis 2010 cette moyenne a plus que doublé pour atteindre 22 articles publiés en 2021.

La contribution de cette partie est la conception d'un AS/RS et l'évaluation de ses performances et de son impact économique, en combinant les technologies 4.0, au plus haut niveau de l'échelle de maturité 4.0 de Porter et Heppelman (Michael E. Porter and James E. Heppelmann, 2014) : l'autonomie. En d'autres termes, l'objectif est de concevoir un système intelligent de stockage et de déstockage, au sens donné par Walter Fritz et al (Fritz et al., 1989), dans lequel *« un système est un système intelligent autonome, s'il possède les propriétés suivantes : il reçoit des sensations de son environnement et détermine la situation présente, choisit ses propres sous-objectifs guidés par son objectif, construit des plans basés sur son expérience afin d'atteindre son sous-objectif, exécute le plan choisi et peut apprendre indépendamment du temps »*. Ce travail a été réalisé sur un cas client de La Poste pour améliorer la logistique urbaine d'une large gamme d'articles de réparation et d'entretien automobiles. Celui-ci est développé ci-après.

1.2. Le contexte de La Poste et la problématique du client final

À ce jour, huit entrepôts urbains ont été déployés par La Poste en France, lui permettant de livrer environ 30 % du territoire. L'objectif est de couvrir 100 % du territoire avec 25 entrepôts urbains d'ici 2025. Le service consiste à stocker des marchandises en ville pour répondre aux besoins urgents de livraison en proposant des solutions de livraison rapide (en H+, J ou J+1)

opérées par des transporteurs de lettres ou de colis sur des itinéraires partagés ou des transporteurs partenaires, en proximité, à un coût abordable et sans émission de carbone, et avec des services personnalisés de préparation de commandes.

Afin d'améliorer le modèle pour maintenir l'avance de l'entreprise sur le marché et atteindre ses objectifs, l'entrepôt urbain situé dans le huitième arrondissement de Paris, installé au sein d'un établissement de préparation et de distribution du courrier et des colis, a été sélectionné pour être le projet pilote.

Le client de l'étude de cas est un groupe français spécialisé dans la réparation rapide, la maintenance et l'équipement automobile. Il comprend neuf marques. Son objectif en utilisant les services d'entreposage de proximité de La Poste est de disposer d'un stock de pièces détachées à distance, à proximité de l'utilisateur final, afin de réparer les véhicules de ses clients dans des délais très courts sans avoir à se soucier de la gestion de la logistique, dont La Poste assure la disponibilité, la rapidité et la fiabilité des opérations. À partir de son stock national, les entrepôts urbains sont alimentés par des références étudiées pour offrir une grande réactivité aux besoins des garages. Le premier pilote d'espace de stockage de proximité (entrepôt urbain) a été mis en place à Paris en 2019 avec 3600 références stockées, avant d'en ouvrir un second à Lille en 2021, avec 4600 références stockées. Deux sites desservant des points de vente, 113 pour le premier, 40 pour le second.

Les processus actuellement utilisés à La Poste pour gérer ce client sont ceux que l'on trouve traditionnellement dans un entrepôt à gestion manuelle. Cela signifie que les approvisionnements hebdomadaires sont réceptionnés manuellement dans l'entrepôt urbain, le stockage et le prélèvement des articles pour répondre aux commandes du client étant effectuées manuellement. Les commandes sont préparées dans des bacs réutilisables et expédiées selon deux solutions correspondant aux besoins du client : commande clôturée à midi pour une livraison à 15 h le jour même par des tournées dédiées assurées par un transporteur partenaire, ou commande clôturée à 19 h pour une livraison avant 10 h le lendemain par des tournées de facteurs.

L'espace de stockage du client occupe actuellement 150 mètres carrés de surface au sol dans l'entrepôt urbain du huitième arrondissement de Paris, pour une surface totale de 600 mètres carrés. Cet espace présente une hauteur sous plafond élevée (environ 5 m). Par conséquent, des mezzanines ont été mises en place afin de profiter au maximum de l'espace disponible. Par

conséquent, l'espace de stockage effectif pour ce client est d'environ 280 mètres carrés composés d'allées et d'étagères de 2 m de haut. Cependant, malgré cette configuration, l'espace disponible est loin d'être occupé de manière optimale, impliquant des coûts fixes de stockage également loin d'être optimaux.

1.3. Méthodologie

La méthodologie proposée vise à outiller les décideurs dans l'identification des technologies pertinentes à intégrer aux processus d'entreposage afin de construire une organisation intelligente au sein des entrepôts urbains.

Pour réaliser notre étude de cas, nous avons choisi de suivre la méthodologie de Christine Bauer et Anind K. Dey, adaptée à la conception de systèmes intelligents (Bauer and Dey, 2016). La méthodologie de conception proposée par ces chercheurs est composée de 8 étapes pour soutenir les concepteurs de systèmes dans leurs tâches. Cette méthode présente l'avantage d'être très générale et peut par conséquent s'appliquer à plusieurs systèmes utilisant diverses technologies. À travers divers entretiens avec des concepteurs expérimentés, les auteurs ont fait ressortir une liste d'étapes, devant être utilisées comme une « *check-list* », pour guider le processus d'étude. Ces étapes sont représentées dans la Figure 24 et détaillées ci-dessous.

(1) Définir l'objectif du système intelligent.

L'objectif doit être basé sur les besoins de l'entreprise ou de l'utilisateur.

(2) Analyser l'état de l'art

Cet état de l'art permet de caractériser le contexte de l'étude, d'aider à comprendre les solutions trouvées pour des projets similaires et de définir les principaux défis pour atteindre l'objectif.

(3) Définir les exigences fonctionnelles essentielles du système prévu.

La définition des exigences tient compte des besoins des utilisateurs.

(4) Affiner les éléments contextuels.

L'objectif est d'éliminer les options qui ne sont pas pertinentes pour le système considéré tout en évitant une réduction trop radicale.

(5) Évaluer les contraintes.

Cette étape détermine si les éléments contextuels présentés peuvent être pris en compte dans le projet en termes de faisabilité. Les contraintes peuvent être techniques, budgétaires, temporelles, juridiques, éthiques ou physiques.

(6) Effectuer une analyse coûts-avantages.

À ce stade, chaque élément du contexte est évalué en fonction du coût qu'il implique pour obtenir les données requises et de son bénéfice en termes de contribution à la prise en charge par le système intelligent de l'ensemble des fonctionnalités souhaitées. L'analyse est effectuée non seulement en termes monétaires (tangibles), mais aussi en termes non monétaires (intangibles) tels que l'image, la responsabilité sociale, les ventes, etc.

(7) Choisir la technologie.

Le résultat de cette étape est la décision concernant la technologie à utiliser pour prendre en compte les éléments de contexte pertinents pour le système.

(8) Réaliser la mise en œuvre du système intelligent.

Les étapes précédentes conduisent finalement à la mise en œuvre du système intelligent.

La section suivante présente les résultats de l'application de la méthodologie précédente sur l'étude de cas.

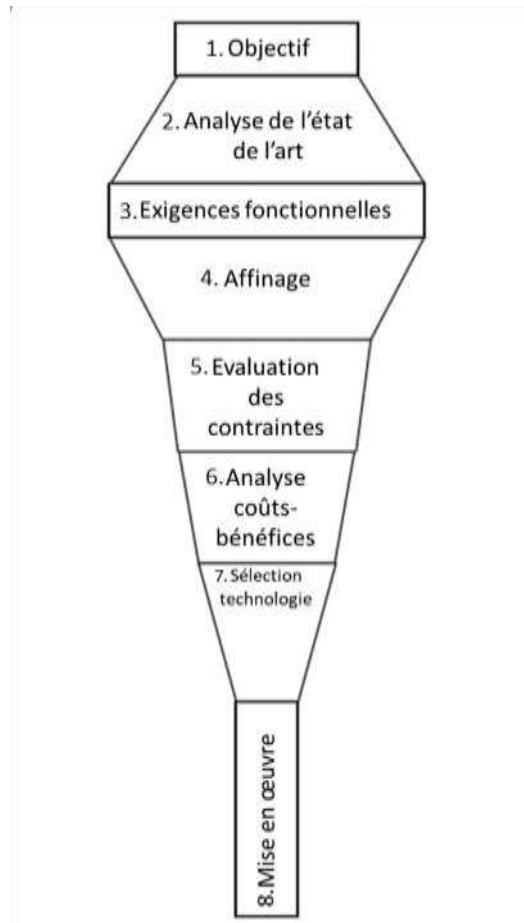


Figure 24 : Étapes du processus d'un système intelligent. Réimprimé avec permission de (Bauer and Dey, 2016).

1.4. Présentation des résultats

Les étapes de la méthodologie sont successivement appliquées et détaillées.

(1) Objectif

Comme exprimé précédemment, l'objectif de cette étude est d'évaluer l'adaptabilité d'une solution AS/RS pour répondre aux défis rencontrés dans les entrepôts urbains. Malgré l'étude d'un cas client spécifique, avec ses propres caractéristiques, ce travail visait à caractériser l'organisation éligible à l'utilisation d'un tel système intelligent et leurs limites d'applicabilité.

(2) Analyse de l'état de l'art

Sur le marché actuel, il existe différentes solutions AS/RS. Selon Adriane Turner (Turner, 2020), qui a récemment effectué une revue de la littérature sur les systèmes AS/RS, il en existe principalement cinq types :

Les systèmes de manutention de palettes (« palettes AS/RS » ou « charges unitaires AS/RS »), utilisés pour stocker et récupérer des produits stockés sur des palettes dans des allées de rayonnage à simple ou double profondeur. Les chariots sont utilisés pour transporter les unités du lieu de stockage à la zone de prélèvement et inversement. Il y a un chariot par allée. Une fois que les produits ont été retirés de la palette, celle-ci doit être remise en place. Ce système est donc idéal pour les stocks à faible débit et à haute densité ou poids élevé. En général, il s'agit de systèmes qui nécessitent la construction d'un bâtiment autour d'eux et qui ne peuvent donc pas être facilement configurés dans un bâtiment existant.

Les systèmes « miniload » sont conçus pour le stockage et la récupération de petits articles rangés dans des bacs ou des tiroirs. Ils fonctionnent de la même manière qu'un AS/RS avec des palettes. Toutefois, les rayonnages peuvent aller jusqu'à quatre profondeurs.

Les systèmes à navettes, avec une ou deux profondeurs de stockage, gérant des boîtes ou des bacs, et avec plus de navettes que d'allées. Ces systèmes ont un débit très élevé.

L'unité AS/RS, l'une des dernières technologies émergentes, a été introduite par la société Autostore, qui en est le seul fabricant. Elle est basée sur cinq composants : une grille en aluminium qui contient des bacs empilés dans lesquels les produits sont stockés et qui sert de rails pour les robots qui se déplacent sur sa surface en conduisant, collectant et livrant les bacs aux postes de travail (ports) où l'exécution des commandes et le réapprovisionnement sont effectués. Enfin, le contrôleur est le « cerveau » du système. Connecté au système de gestion de l'entrepôt, il contrôle la circulation, suit les stocks, commande les robots, planifie et programme les tâches et garde la trace de tout. Ces systèmes offrent une densité de stockage inégalée.

Les AS/RS basés sur des véhicules guidés automatisés (AGV), qui déplacent l'ensemble du système de rayonnage (avec étagères mobiles) ou les palettes vers le poste de travail fixe du préparateur de commandes.

À partir des travaux présentant des données sur ce sujet (France Supply Chain by Aslog, 2021; Modula, 2018; Turner, 2020), les principales caractéristiques de ces solutions ont été formalisées dans le Tableau 9 ci-dessous.

Tableau 9 : Caractéristiques principales des AS/RS

	ASRS à palettes	ASRS « miniload »	ASRS à navettes (« shuttle »)	ASRS à l'unité (Autostore)	ASRS reposant sur des VGAs
Visuel					
Débit	85 cycles/heure/chariot (60 pour ceux à double profondeur)	120 à 200 cycles/h/chariot	500 cycles/h/allée	Vitesse de 1,6 m/s et 30 bacs/heure/robot	
Cadence	Faible (position d'entrée/sortie unique)	Faible (position d'entrée/sortie unique)	Élevée (5x plus élevée que miniload)	Moyenne	Élevée (3 fois plus de lignes de commandes traitées par heure qu'un système de stockage traditionnel)
Poids supportés	230 à 1815 kg	Max. 230 kg	Max. 90 kg	Max. 30 kg	450 à 1360 kg.
Hauteur max	Très haute (max 50 m)	Très haute	Moyenne	Moyenne (max 7 m, entre 4 à 16 hauteurs de bacs)	Très faible (max 2 m)
Typologie des produits	Lourds et encombrants	Petits et poids moyens	Petits et légers	Petits et légers	Petits
Coûts d'installation	Élevés	Élevés	Elevés	Moyens	Faibles
Coûts d'exploitation	Moyens (coûts de maintenance élevés, car fiabilité décriée, mais coûts d'infrastructures réduits, car stockage en hauteur)	Moyens	Moyens	Faibles (forte fiabilité)	Élevés (fiabilité décriée, besoin de m² au sol)
Densité	Moyenne (8x plus élevée qu'un système de stockage traditionnel)	Moyenne	Moyenne	Élevée	Moyenne (suppression des allées de circulation, mais n'utilise pas la hauteur)

Flexibilité du système	Très faible	Faible	Élevée	Élevée	Élevée
Facilité d'installation	Faible	Faible	Moyenne	Élevée	Élevée
Adaptabilité à des structures existantes caractéristiques atypiques	Très faible	Faible	Faible	Moyen	Faible

À ce jour, dans la littérature scientifique, aucune étude n'a confirmé les avantages de ces systèmes à travers une étude de cas et des données qualitatives et quantitatives, confirmant l'intérêt de cette étude exploratoire.

(3) Exigences fonctionnelles

Dans le cas des entrepôts urbains, leurs exigences fonctionnelles sont tirées des principales problématiques de ces installations énumérées ci-dessous :

- Accueillir le maximum de références (nombre, taille et poids) (3),
- S'adapter au changement (2),
- Déplacer les produits avec efficacité et précision (4),
- Répondre aux pics de commandes (10),
- Permettre la réalisation des opérations de stockage et de préparation des commandes pendant toute la durée d'ouverture de l'entrepôt (11),
- Réduire les frais généraux de main-d'œuvre, tout en augmentant les capacités de débit (7),
- Simplifier le stockage des produits tout en améliorant l'organisation des stocks (5),
- Obtenir une densité de stockage plus élevée dans l'empreinte de l'entrepôt (1),
- Améliorer la sécurité de l'entrepôt et des utilisateurs grâce à un flux de matériel optimisé et une meilleure ergonomie (8),
- Suivre le flux de toutes les marchandises (6),
- Fournir une faible consommation d'énergie ou des avantages en matière de durabilité (9).

(4) Affinage

À ce stade, les exigences fonctionnelles ont été listées par niveau de pertinence (voir la numérotation appliquée à chacune d'entre elles ci-dessus) en fonction des enjeux des entrepôts urbains.

(5) Évaluation des contraintes

Les caractéristiques du client sont les premières contraintes à considérer : nombre de références, tailles et poids des articles, rendement (données année 2021) (Tableau 10a). Ensuite, il est nécessaire de considérer les paramètres liés à l'espace choisi pour faire fonctionner le système : mètres carrés, géométrie, résistance de la dalle (Tableau 10 b).

Tableau 10 : Contraintes physiques liées aux caractéristiques du client (10a) et du site sélectionné (10 b).

10a : Contraintes physiques du client	
Nb de références (base articles)	5741
Nb moyen de commandes/mois	762
Nb moyen d'articles/commande	1,3
Poids moyen d'un article (kg)	2
Poids max (kg)	22,54
Poids min (kg)	0,001
Dimensions moyennes (LxlxH) (mm)	248x138x73
Dimensions max (LxlxH) (mm)	980x581x590
Dimensions min (LxlxH) (mm)	10x1x1

10 b : Contraintes physiques du site sélectionné	
Géométrie	
Superficie (m²)	98
Hauteur sous plafond exploitable (m)	5,5
Résistance de dalle (kg/m²)	600

(6) Analyse coûts-bénéfices et choix technologique

Dans le cadre de cette étude, la technologie a été choisie avant l'analyse coûts-bénéfices. Un partenariat entre La Poste, Autostore et l'un de ses intégrateurs français, Adaméo, a été initié en 2021. Spécialisé dans la technologie robotique, Autostore a développé le concept de « stockage

cubique automatisé » (Figure 25), dont les principales caractéristiques ont été présentées lors de l'étape 2.

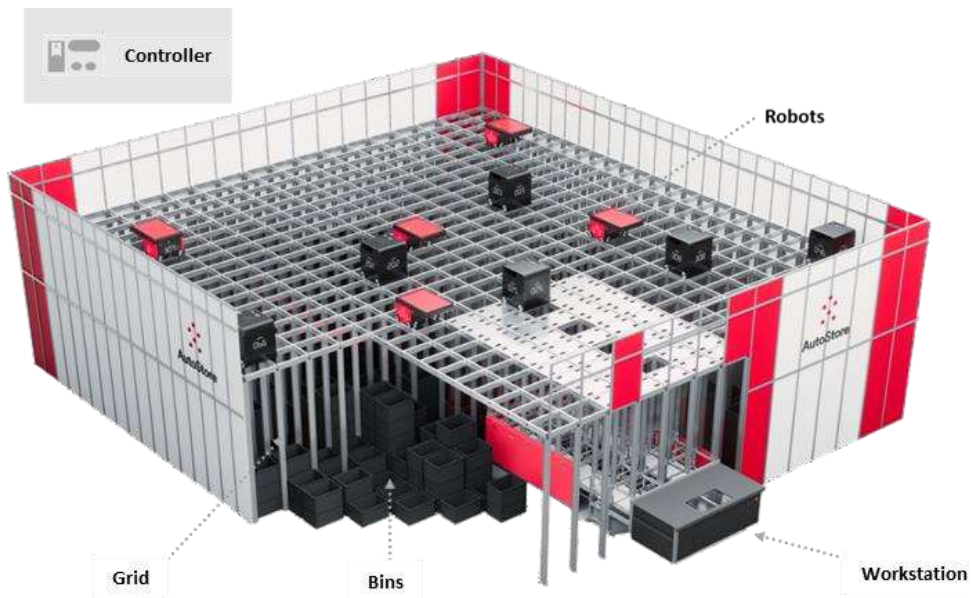


Figure 25 : Exemple d'une grille Autostore

Le partenariat a consisté à mettre en place une démonstration de la solution au sein de l'établissement. Il permet tout d'abord de disposer d'un prototype pour sensibiliser l'écosystème à l'enjeu de la densification des stocks dans les petits espaces existants et de présenter les capacités de ces systèmes. Ceux-ci sont particulièrement attractifs pour les acteurs de la logistique urbaine en raison des avantages qu'ils offrent : haute densité de stockage (peut réduire jusqu'à quatre fois l'espace nécessaire comme représenté sur la Figure 26), facilité d'intégration dans les bâtiments existants, flexibilité d'installation et très faible consommation d'énergie. Ensuite, il permet d'évaluer si ces « Autostores » sont le meilleur type d'AS/RS pour réaliser un processus de stockage/préparation efficace dans les entrepôts urbains, pour un grand nombre de références de produits de taille et de nature différentes. Nous avons évalué la performance et la viabilité économique du système Autostore dans notre entrepôt urbain tout en comparant le modèle actuellement utilisé pour réaliser les services du client avec le modèle envisagé basé sur Autostore.

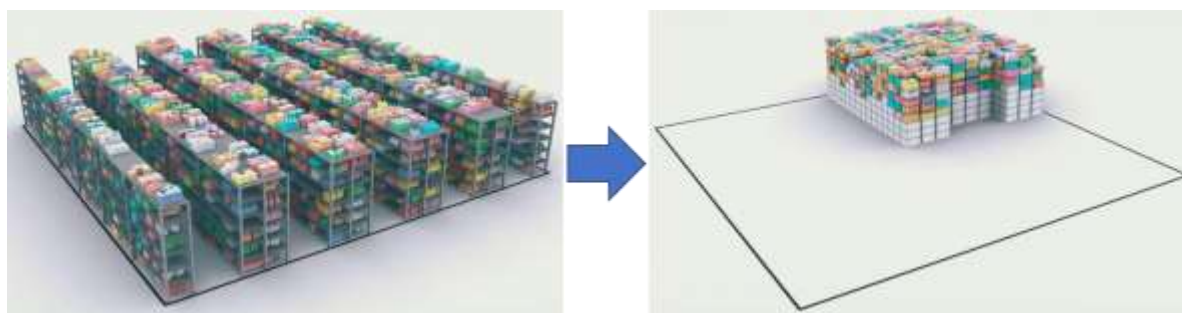


Figure 26 : Représentation de l'économie de place des systèmes Autostore.

Une grille a été modélisée par l'intégrateur de solutions (Adaméo), répondant aux contraintes physiques de l'espace choisi pour exploiter le système. Les caractéristiques initiales de cette grille sont présentées dans le Tableau 11. L'analyse coût-bénéfice a été réalisée sur la base de ces caractéristiques.

Tableau 11 : Les caractéristiques de la grille Autostore modélisées pour La Poste.

Superficie (m ²)	66
Nb d'emplacements de bacs	1600
Coefficient de respiration	15 %
Nb de bacs disponibles	1360
Nb de robots	5
Nb de postes opérateurs	1
Cadence moyenne (bac/h)	103
Dimensions bac extérieures (mm)	550x450x330
Dimensions bac intérieures (mm)	500x400x330
Poids max/bac (kg)	30
Nb de compartimentations possibles/bac	32

Tout d'abord, l'analyse a consisté à vérifier l'adéquation entre les caractéristiques du système et celles des produits du client. Les bacs initialement proposés avaient des dimensions internes de 600 × 400 × 330 mm. En comparant ces données avec les dimensions des 5741 références contenues dans la base de données d'articles du client et en considérant qu'une moyenne de trois articles est stockée par référence, il a été conclu qu'une hauteur de bac de 220 mm, autre option proposée, était plus adaptée afin d'éviter de « stocker de l'air ». En conséquence, le nombre d'emplacements dans le système est passé de 1360 à 2040. Cependant, malgré cette augmentation de capacité, permettant d'accueillir plus de références, 1004 d'entre elles doivent continuer à être gérées en dehors du système, c'est-à-dire manuellement, pour deux raisons. D'une part, parce que ces références présentent des caractéristiques hors gabarit (Tableau 12,

ligne B), ou d'autre part, parce que la capacité maximale du système a été atteinte (Tableau 12, ligne H). Un résumé de ces données est présenté dans le Tableau 12. Suite à ces constatations, le gain d'espace généré par l'utilisation de la grille Autostore a pu être évalué. Le nombre de mètres carrés pour les activités du client est actuellement de 320 (40 pour la zone de traitement, de préparation des commandes et d'expédition, en plus des 280 pour le stockage mentionné ci-dessus). Pour le modèle automatisé, environ 23 mètres carrés seraient nécessaires pour les références à gérer manuellement en dehors du système, 132 (66 mètres carrés au sol multipliés par deux, car la facturation des mètres carrés exploités est basée sur une hauteur de 2 m) pour le système automatisé et environ 30 pour la zone de traitement, de préparation des commandes et de mise en expédition. Le gain observé serait donc de 135 mètres carrés, soit environ 42 % avec le système automatisé.

Tableau 12 : Résultats de l'analyse des caractéristiques physiques de la grille

	Nb de références (base articles)	5741	
A	Nb de bacs disponibles	2040	
B	Nb de réfs hors gabarit	695	
	Nb d'articles stockés/réf	3	2
C	Nb de réfs dans des bacs compartimentés en 8	1464	
D	Nb de réfs dans des bacs compartimentés en 4	663	
E	Nb de réfs dans des bacs compartimentés en 2	1839	
F	Nb de réfs dans des bacs sans compartimentation	595	485
G=C*8+D*4+E*2+F	Nb de bacs nécessaires	2349	
H=G-A	Nb de réfs en excédent	309	
I=B+H	Nb de réfs à gérer hors système automatisé	1004	

La deuxième partie de l'analyse a consisté à modéliser le bilan économique des deux modèles (actuel et automatisé) et à les comparer. Tout d'abord, il a été nécessaire de définir le modèle de rémunération des services fournis par l'automatisme. Le choix a été fait de définir un prix par mouvement de bac (injection ou récupération). Ce prix évolue en fonction du nombre de commandes clients, à partir duquel est calculé le nombre total de mouvements (injection ou récupération), et du nombre d'années d'amortissement de l'investissement (voir Tableau 13). Ce modèle permet à La Poste d'assurer le remboursement de l'investissement et d'impliquer le client dans la réalisation des objectifs annoncés. En effet, le prix par bac est adapté à l'activité. Les clients sont « responsables », en fonction de leurs ventes et de l'optimisation de leurs processus, du prix qu'ils paieront. Plus ils assurent une activité élevée, plus le prix par bac qu'ils paieront sera bas.

Tableau 13 : Exemple d'une matrice « prix au mouvement des bacs ».

Nb de commandes	100	500	762	1000	1500	2000	2500	3000	4000	5000
Nb. de mouvements Nb. d'années d'amortissement	220	1099	1674	2197	3296	4394	5493	6592	8789	10 986
1	228,7 €	46,3 €	30,7 €	23,6 €	16,0 €	12,2 €	9,9 €	8,4 €	6,5 €	5,3 €
2	123,9 €	25,4 €	16,9 €	13,1 €	9,0 €	6,9 €	5,7 €	4,9 €	3,8 €	3,2 €
3	89,0 €	18,4 €	12,3 €	9,6 €	6,6 €	5,2 €	4,3 €	3,7 €	3,0 €	2,5 €
4	71,5 €	14,9 €	10,0 €	7,8 €	5,5 €	4,3 €	3,6 €	3,1 €	2,5 €	2,2 €
5	61,0 €	12,8 €	8,7 €	6,8 €	4,8 €	3,8 €	3,2 €	2,8 €	2,3 €	2,0 €
6	54,1 €	11,4 €	7,8 €	6,1 €	4,3 €	3,4 €	2,9 €	2,5 €	2,1 €	1,8 €
7	49,1 €	10,4 €	7,1 €	5,6 €	4,0 €	3,2 €	2,7 €	2,4 €	2,0 €	1,7 €
8	45,3 €	9,7 €	6,6 €	5,2 €	3,7 €	3,0 €	2,5 €	2,2 €	1,9 €	1,7 €
9	42,4 €	9,1 €	6,2 €	4,9 €	3,5 €	2,8 €	2,4 €	2,1 €	1,8 €	1,6 €
10	40,1 €	8,6 €	5,9 €	4,7 €	3,4 €	2,7 €	2,3 €	2,1 €	1,7 €	1,5 €

La Figure 27 présentée ci-dessous montre les résultats de la comparaison des deux modèles économiques. L'évolution des coûts en fonction du nombre de commandes est représentée. Pour le modèle automatisé, plusieurs courbes sont simulées en fonction du nombre d'années choisi pour amortir l'investissement en matériel. Cette comparaison permet de mettre en évidence les points d'équilibre entre les différents scénarios envisagés pour le système automatisé et le modèle actuel. Par exemple, le point d'équilibre pour les montants facturés au client (situation actuelle et modèle automatisé), pour un amortissement de l'investissement sur 10 ans, se situe à 1400 commandes par mois, soit 1,84 fois l'activité actuelle. De même, pour envisager un modèle automatisé viable avec un amortissement de l'investissement sur 3 ans, le client doit, au minimum, réaliser 5600 commandes par mois, soit multiplier par 7,35 son activité. En outre, pour réaliser un bénéfice de 20 % avec le système automatisé par rapport au modèle actuel, avec un amortissement de l'installation sur 10 ans, l'activité du client doit être d'au moins 3000 commandes par mois, soit environ quatre fois plus que l'activité actuelle. En tout cas, pour tous les scénarios, le modèle actuel reste plus avantageux pour une activité inférieure à 1400 commandes par mois.

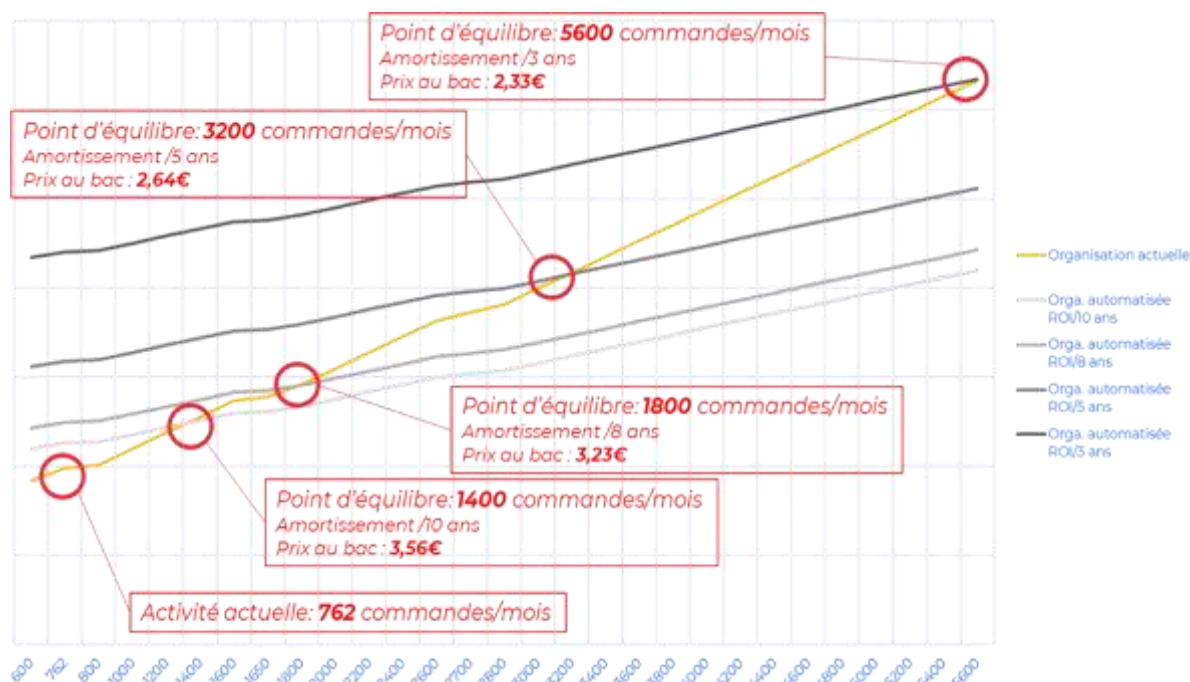


Figure 27 : Évolution des montants facturés au client/mois en fonction du nombre de commandes et du nombre d'années d'amortissement des investissements.

Le taux d'utilisation du système est un autre paramètre analysé dans cette étude. En effet, comme le montre le Tableau 11, la grille modélisée de l'Autostore a un taux de traitement moyen de 103 bacs par heure, ce qui correspond au nombre de bacs présentés à l'opérateur pour effectuer une opération de prélèvement ou d'injection dans le stock par heure. L'entrepôt urbain de La Poste à Paris 8 effectue des prestations pour les clients de 8 h à 19 h. Le système automatisé effectuerait donc les tâches sur la même période (les heures de non-activité sont dédiées à la recharge des robots), ce qui implique une capacité de traitement moyenne de 1133 bacs par jour. La Figure 28 représente le taux d'utilisation du système en fonction du nombre de commandes traitées par mois. Au niveau de 1400 commandes par mois, le minimum qui pourrait être considéré pour valider l'adoption du système automatisé tel que présenté ci-dessus, le taux d'utilisation du système serait de 13 %. Une discussion des résultats de l'étude présentée dans cette section est développée dans la section suivante afin de tirer les premières conclusions sur la pertinence de l'utilisation de ces systèmes automatisés dans les entrepôts urbains.

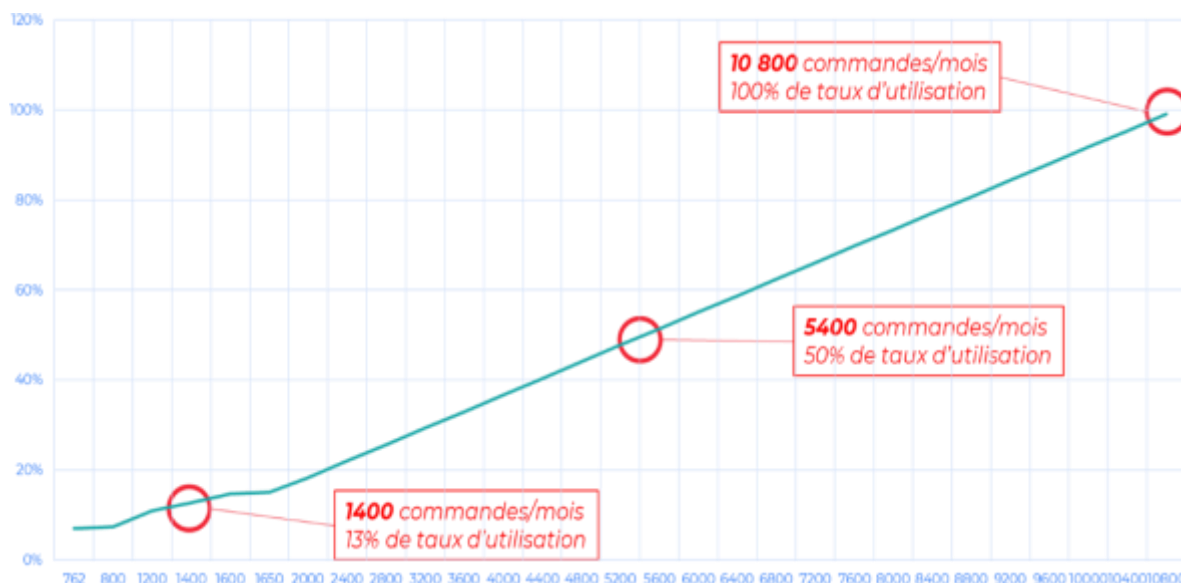


Figure 28 : Taux d'utilisation du système automatisé par le nombre de commandes traitées par mois.

1.5. Discussion

L'étude réalisée sur le cas d'un client utilisant le système de stockage et de déstockage automatisé Autostore nous permet de faire une première évaluation de ces systèmes. La première remarque concerne l'analyse des produits du client par rapport aux caractéristiques de la grille modélisée. La détermination de la meilleure configuration afin d'optimiser le remplissage a permis d'ajouter 680 bacs au système et d'accueillir un plus grand nombre de références. Cette première analyse est donc d'une grande importance lors de l'installation d'un système de stockage et de déstockage automatisé. Une deuxième décision a été prise pour atteindre le même objectif : ne stocker que deux articles pour 485 d'entre eux, car leurs dimensions ou leur poids ne permettraient pas de placer trois articles dans un même bac. Ce choix a permis d'éviter de dédier deux emplacements à la même référence. Choisir de réduire le nombre de pièces stockées par référence implique d'étudier le taux d'utilisation de chacune d'entre elles. En effet, il sera préférable de stocker un plus grand nombre de pièces pour une référence qui est souvent sollicitée. Ce paramètre n'a pas été pris en compte dans cette étude.

Malgré l'optimisation réalisée afin d'intégrer le maximum de références dans le système automatisé, 309 références sur les 485 mentionnées ci-dessus sont en surnombre, la capacité maximale du système ayant été atteinte. Cela implique qu'elles sont traitées manuellement et stockées sur des étagères (modèle actuel) avec les articles hors gabarits, représentant au total

17,5 % des références. Sans contrainte d'espace, le système adapté à la base d'articles (5741 références) et à l'activité du client (trois pièces stockées par référence) aurait nécessité 3938 bacs (soient 4529 emplacements de bacs pour respecter les 15 % de respiration). Dans cette configuration, il resterait 327 références, les plus volumineuses, à gérer manuellement, ne nécessitant que 14 mètres carrés de stockage sur étagères. Un total de 5414 références serait intégré dans la grille automatisée avec une surface au sol d'environ 80 mètres carrés. Environ 10 mètres carrés seraient nécessaires pour la zone de traitement, de préparation des commandes et d'expédition. Cette situation permettrait un gain de plus de 65 % de la surface au sol pour les activités du client, impactant d'autant les coûts fixes liés à la location de l'espace exploité. Cependant, les contraintes de mètres carrés disponibles de l'espace envisagé pour exploiter la solution automatisée ne permettent pas d'atteindre ce niveau d'organisation. Le gain de surface observé avec la grille modélisée est de 42 %.

Outre le gain de place, ce système est très adaptable à la géométrie spécifique de la pièce, qui était difficile à équiper. La grille modélisée permet l'exploitation de toute sa surface et de sa hauteur. Avec ce système, le stock est sécurisé. Les produits ne sont accessibles aux postes opérateurs que lorsqu'ils font l'objet d'une commande. Ce fonctionnement garantit également le « zéro erreur » dans les préparations. Chaque mouvement est enregistré, assurant une meilleure gestion des stocks, sans être équipé d'algorithmes complexes. En effet, par exemple, la gestion des emplacements se fait naturellement, les bacs à faible rotation descendent de manière naturelle en bas de pile, tandis que les références à forte rotation sont positionnées en surface. Cette organisation permet de supprimer les tâches fastidieuses et de libérer de la main-d'œuvre, qui peut être affectée à d'autres tâches.

Cependant, la mise en place d'un tel système nécessite un investissement important en termes de coût, ce qui, en fonction de l'activité, a un fort impact sur le retour sur investissement d'une telle organisation. En effet, dans le cas du modèle présenté dans le cas du client, il est difficile d'imaginer que celui-ci sera inférieur à 10 ans. En effet, l'activité du client doit être portée à au moins 1400 commandes par mois pour mettre en œuvre la solution automatisée. Comme les produits du client remplissent entièrement la grille modélisée, faisant de la grille une solution dédiée à ce client, sa faible activité ne peut être compensée par un autre client. Ce phénomène est également valable pour le faible taux d'utilisation de la machine pour le client étudié.

Pour faire écho aux enjeux environnementaux auxquels sont confrontés les entrepôts urbains, Autostore prône que sa solution ait une faible consommation d'énergie pour que ses robots

puissent accomplir leurs tâches. De plus, elle permet de supprimer l'éclairage et le chauffage de l'espace de stockage. Cependant, aucune donnée sur cet aspect n'a été trouvée lors de cette étude. La solution étudiée dans le cas du client nous permet de comprendre qu'une activité minimale est nécessaire afin de rentabiliser l'investissement impliqué par l'installation d'un tel système ainsi que son taux de traitement des commandes. Par ailleurs, envisager un modèle multiclient pourrait améliorer le taux d'utilisation des machines, compenser la faible activité d'un client par un autre et par conséquent réduire les coûts. Une telle solution semble offrir les performances attendues tout en répondant aux défis des entrepôts urbains tels que l'optimisation des surfaces exploitées, la facilité d'utilisation et d'installation, la modularité, la réduction des tâches pénibles et de la soumission aux TMS (Troubles Musculo Squelettiques) (de la part des opérateurs, et la rapidité de traitement.

1.6. Conclusion

Nous pensons qu'une utilisation méthodique et structurée des technologies 4.0 est une réponse possible aux défis des entrepôts urbains. Afin de démontrer les approches proposées dans le chapitre 4, nous avons mené une étude de cas sur les AS/RS. Leur usage ayant été identifié comme pertinent dans les entrepôts urbains, nous avons pu exploiter les données d'un client de notre partenaire industriel pour mener l'étude. La méthodologie utilisée a permis de sélectionner la solution la plus adaptée au contexte.

Suite à l'analyse des résultats de cette étude, les avantages de densification de la zone de stockage, d'adaptabilité, de modularité, préconisés par le constructeur de la solution étudiée ont été confirmés. Cependant, dans le cas spécifique du client étudié, la grille modélisée nécessite plusieurs modifications. Les tarifs proposés pour ces systèmes nécessitent un nombre minimum de commandes à traiter pour assurer la rentabilité du modèle. De plus, le retour sur investissement des solutions automatisées est généralement de l'ordre de trois ans, ce qui est difficile à envisager dans le cas présenté, étant plutôt sur un ordre de dix ans. Il est donc très important de définir, comme cela a été fait dans cette étude, les composants attendus du système intelligent et d'analyser l'adéquation entre les caractéristiques du client et l'organisation souhaitée. En réponse à ces résultats, la planification de l'étude d'un modèle multiclient est une direction future à envisager. En outre, cette étude de cas est une preuve de concept qui illustre la faisabilité du modèle conçu, bien que des recherches supplémentaires soient nécessaires pour généraliser la méthodologie.

Nous constatons que la méthodologie employée pour mener l'étude propose des étapes générales et pourrait être utilisée pour mener tout type d'étude de cas tel que réalisé. Les autres propositions faites dans le chapitre 4 pourraient être explorées de la même manière.

Conclusion générale et perspectives

Toujours plus vite, toujours moins cher. La montée du e-commerce a fait apparaître de nouveaux réflexes de consommation. Tous les acteurs de la chaîne d'approvisionnement s'accordent sur la demande croissante des clients de disposer de leurs produits le plus rapidement possible ; soit en allant les chercher eux-mêmes dans des drives et points relais, soit en se faisant livrer. Ce besoin d'immédiateté est à l'origine de nouveaux standards de livraison dont la dernière incarnation est l'éclosion d'offres de livraison en moins d'un quart d'heure en centre-ville avec des coursiers. Mais ces tendances s'accordent mal avec des organisations logistiques centralisées, rendant la question du transport problématique, tant d'un point de vue économique qu'environnemental. Les acteurs de la grande distribution réadaptent donc leurs réseaux logistiques pour se rapprocher des consommateurs, avec un nouveau format : l'entrepôt urbain. Ce rapprochement augmente les prix au mètre carré, de par la localité et la rareté des surfaces, tout en complexifiant les supply chains. Cependant, ces coûts peuvent être rattrapés par un transport moins coûteux, une efficacité opérationnelle plus importante et de nouveaux services. Afin de développer ces leviers de croissance, nous avons montré, avec la réalisation d'un état de l'art, qu'il était nécessaire de formaliser les caractéristiques de ces espaces et de comprendre la différence qu'elles présentent avec celles des entrepôts de distribution traditionnels, convenus comme exemple d'organisation pour le déploiement des entrepôts urbains. Dans un deuxième temps, après avoir caractérisé ce nouveau concept, afin de rendre le modèle durable et qu'il s'inscrive dans les pratiques de la logistique urbaine à long terme, nous avons montré qu'il était intéressant de proposer des solutions technologiques tirées de l'Industrie 4.0 pour optimiser les processus des entrepôts urbains. Une étude des processus et des besoins des entrepôts urbains a mené à la proposition de solutions adaptées dont l'une d'elles, les ASRS, a été étudiée dans le cadre d'un cas client.

Ces travaux de recherche s'inscrivent dans un domaine de recherche avec des problématiques d'actualité dans lequel est constaté un vrai besoin d'instruire le modèle d'entrepôts urbains. Les propositions qui y sont faites visent également à faire passer les nouvelles technologies de la fonction R et D (nécessitant des spécialistes) vers les fonctions « métiers ». De nombreuses entreprises lancent des initiatives 4.0 structurées autour d'une technologie plutôt que comme étant une partie intégrante d'un plan stratégique global, visant une meilleure performance industrielle. La mise en œuvre d'un virage 4.0 va bien au-delà du simple choix technologique, elle oblige à évoluer dans l'ensemble de ses activités et de placer les humains au cœur du changement pour s'assurer de maximiser les impacts de cette transformation pour le futur de l'entreprise. En commençant par établir un diagnostic de maturité industrielle et technologique,

nous avons confronté l'existant aux meilleures pratiques du domaine. Avec ces propositions, les entreprises n'introduisent plus de nouvelles technologies pour le fait d'introduire une nouvelle technologie, mais pour gagner en agilité et efficacité. Les décideurs sont guidés dans les choix à prendre pour optimiser les processus des entrepôts urbains. De plus, le cas d'étude proposé illustre la démarche à suivre pour étudier la mise en place d'une solution proposée. Ce faisant, nous avons contribué à rendre ce nouveau modèle d'installation de la chaîne d'approvisionnement plus efficace, plus viable et plus durable sur le plan environnemental.

Une première perspective de recherche serait d'analyser la pertinence des autres propositions dans les entrepôts urbains. Les AS/RS sont principalement utilisés dans le processus de stockage. Ainsi, des travaux futurs pourraient étudier la combinaison parfaite de ces technologies afin d'optimiser tous les processus de l'entrepôt urbain et de promouvoir la durabilité. Cela déboucherait sur une méthodologie et un panel de solutions combinant de manière pertinente et structurée les apports du 4.0 pour optimiser toutes les étapes du processus logistique dans les entrepôts urbains. Il faut préciser cependant que dans le cadre du déploiement des entrepôts urbains, les études doivent être personnalisées, car il n'existe pas de standard unique pour le type de bâtiments dans lesquels ils s'inscrivent. Additionnellement, si l'entrepôt urbain apparaît comme un équipement stratégique, certains sujets peuvent faire barrière à son développement. En tête, la nécessité d'un investissement important, alors que la viabilité économique semble plus fragile qu'un entrepôt traditionnel de distribution, de par le chiffre d'affaires et les volumes plus faibles. Le second sujet à ne pas négliger est le positionnement stratégique de ces centres, qui doivent créer un maillage efficace et qui a déjà fait l'objet de quelques études tel que montré dans l'état de l'art. Un maillage efficace est notamment l'un des maîtres mots de l'Internet Physique. L'objectif de ce concept est d'établir un système logistique mondial ouvert plus résilient, performant et durable par l'interconnexion des réseaux logistiques. Il se traduit par l'exploitation de réseaux d'approvisionnement interconnectés qui utilisent un ensemble de protocoles collaboratifs, de conteneurs modulaires et d'interfaces intelligentes standards, pour accroître l'efficacité et la durabilité ; poursuivant des objectifs économiques, écologiques et sociaux. Dans ce contexte, la place des entrepôts urbains devrait être étudiée.

Bibliographie

- Abdelkrim, M.N., Chekir, H., Zouinkhi, A., Bajic, E., Trab, S., 2018. RFID IoT-enabled warehouse for safety management using product class-based storage and potential fields methods. *International Journal of Embedded Systems* 10, 71–88. <https://doi.org/10.1504/ijes.2018.10010505>
- Agalinos, K., Ponis, S.T., Aretoulaki, E., Plakas, G., Efthymiou, O., 2020. Discrete event simulation and digital twins: Review and challenges for logistics. *Procedia Manufacturing* 51, 1636–1641. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.228>
- Aggeri, F., 2016. La recherche-intervention : fondements et pratiques., in: *À la pointe du management*. Dunod, pp. 79–100. <https://doi.org/10.3917/dunod.barth.2016.01.0079>
- Aguiar, G.T., Oliveira, G.A., Tan, K.H., Kazantsev, N., Setti, D., 2019. Sustainable implementation success factors of AGVs in the Brazilian industry supply chain management. *Procedia Manufacturing* 39, 1577–1586. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.284>
- Aljohani, K., Thompson, R.G., 2016. Impacts of logistics sprawl on the urban environment and logistics: taxonomy and review of literature. *Journal of Transport Geography* 57, 255–263. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.08.009>
- Altarazi, S.A., Ammouri, M.M., 2018. Concurrent manual-order-picking warehouse design: a simulation-based design of experiments approach. *International Journal of Production Research* 56, 7103–7121. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1421780>
- Anderluh, A., Hemmelmayr, V.C., Rüdiger, D., 2020. Analytic hierarchy process for city hub location selection - The Viennese case. *Transportation Research Procedia* 46, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.166>
- Armagan, K., 2020. The fifth mode of transportation: Hyperloop. *Journal of innovative transportation* 1, 1105.
- Arslan, A.N., Klibi, W., Montreuil, B., 2021. Distribution network deployment for omnichannel retailing. *European Journal of Operational Research* 294, 1042–1058. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.04.016>
- ASLOG, FAQ Logistique, 2002. *Sûreté et sécurité : Les deux piliers stratégiques des entreprises qui veulent accroître leur performance* [WWW Document]. URL <https://www.faq-logistique.com/ASLOG-Publications-Surete-Securite-Performance-Intoduction.htm> (accessed 11.23.22).
- Azadeh, K., De Koster, R., Roy, D., 2019. Robotized and automated warehouse systems: Review and recent developments. *Transportation Science* 53, 917–945. <https://doi.org/10.1287/trsc.2018.0873>
- Bahrami, B., Aghezzaf, E.H., Limere, V., 2016. Using Simulation to Improve Performance of a Real World Distribution Center. *IFAC-PapersOnLine* 49, 1874–1879. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.856>
- Baldisseri, A., Siragusa, C., Seghezzi, A., Mangiaracina, R., Tumino, A., 2022. Truck-based drone delivery system: An economic and environmental assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 107, 103296. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103296>
- Barreto, L., Amaral, A., Pereira, T., 2017. Industry 4.0 implications in logistics: an overview. *Procedia Manufacturing* 13, 1245–1252. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.045>
- Bartholdi, J.J., Hackman, S.T., 2019. Warehouse and distribution science - Mathematical models to optimize management of time and space in a warehouse.
- Bauer, C., Dey, A.K., 2016. Considering context in the design of intelligent systems: Current practices and suggestions for improvement. *Journal of Systems and Software* 112, 26–47. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2015.10.041>
- Beamon, B.M., 1999. Designing the green supply chain. *Logistics Information Management* 12, 332–342. <https://doi.org/10.1108/09576059910284159>

- Bechtsis, D., Tsolakis, N., Vlachos, D., Srai, J.S., 2018. Intelligent Autonomous Vehicles in digital supply chains: A framework for integrating innovations towards sustainable value networks. *Journal of Cleaner Production* 181, 60–71. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.173>
- Beul, M., Droeschel, D., Nieuwenhuisen, M., Quenzel, J., Houben, S., Behnke, S., 2018. Fast autonomous flight in warehouses for inventory applications. *IEEE Robotics and Automation Letters* 3, 3121–3128. <https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2849833>
- Bevilacqua, M., Ciarapica, F.E., Antomarioni, S., 2019. Lean principles for organizing items in an automated storage and retrieval system: An association rule mining – Based approach. *Management and Production Engineering Review* 10, 29–36. <https://doi.org/10.24425/mper.2019.128241>
- Boysen, N., Briskorn, D., Emde, S., 2017. Parts-to-picker based order processing in a rack-moving mobile robots environment. *European Journal of Operational Research* 262, 550–562. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.03.053>
- Boysen, N., de Koster, R., Weidinger, F., 2019. Warehousing in the e-commerce era: A survey. *European Journal of Operational Research* 277, 396–411. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.08.023>
- Boysen, N., Fedtke, S., Weidinger, F., 2018. Optimizing automated sorting in warehouses: The minimum order spread sequencing problem. *European Journal of Operational Research* 270, 386–400. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.03.026>
- Bréchemier, D., Schillaci, G., Prévost, X., Migne, C., Ogée, B., 2020. La logistique urbaine face aux défis économiques et environnementaux.
- Bučková, M., Krajčovič, M., Edl, M., 2017. Computer Simulation and Optimization of Transport Distances of Order Picking Processes. *Procedia Engineering* 192, 69–74. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.012>
- Burinskiene, A., Lorenc, A., Lerher, T., 2018. A simulation study for the sustainability and reduction of waste in warehouse logistics. *International Journal of Simulation Modelling* 17, 485–497. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM17\(3\)446](https://doi.org/10.2507/IJSIMM17(3)446)
- Carneiro Freire, S.M., Corban, C., Ehrlich, D., FLORCZYK, A., Kemper, T., Maffenini, L., Melchiorri, M., Pesaresi, M., Schiavina, M., Tommasi, P., 2020. Atlas of the human planet 2019: a compendium of urbanisation dynamics in 239 countries. Publications Office, LU.
- Cempírek, V., Stopka, O., Meško, P., Dočkalíková, I., Tvrdon, L., 2021. Design of distribution centre location for small e-shop consignments using the Clark-Wright method. *Transportation Research Procedia* 53, 224–233. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.029>
- Cirulis, A., Ginters, E., 2013. Augmented reality in logistics. *Procedia Computer Science* 26, 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.12.003>
- Coito, T., Martins, M.S.E., Viegas, J.L., Firme, B., Figueiredo, J., Vieira, S.M., Sousa, J.M.C., 2020. A Middleware Platform for Intelligent Automation: An Industrial Prototype Implementation. *Computers in Industry* 123. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103329>
- Commissariat général au développement durable, 2019. L'activité des entrepôts et des plateformes logistiques en 2016 : une automatisation encore émergente (Statistique publique). Ministère de la transition écologique et solidaire - république française.
- Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations unies, 1987. Our common future - Rapport Brundtland. World Commission on Environment and Development.
- Cour des comptes, 2021. Rapport d'observations de la cour des comptes sur les nouveaux services de proximité de La Poste – Exercices 2014-2019.
- Dablanc, L., Heitz, A., Buldeo Rai, H., Diziain, D., 2022. Response to COVID-19 lockdowns from urban freight stakeholders: An analysis from three surveys in 2020 in France, and policy implications. *Transport Policy* 122, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.04.020>
- Dablanc, L., Rakotonarivo, D., 2010. The impacts of logistics sprawl: How does the location of parcel transport terminals affect the energy efficiency of goods' movements in Paris and what can we

- do about it? *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 2, 6087–6096. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042810010748>
- Danjou, C., Rivest, L., Pellerin, R., 2017. Douze positionnements stratégiques pour l'Industrie 4.0 : entre processus, produit et service, de la surveillance à l'autonomie., in: CIGI 2017 : 12ème Congrès International de Génie Industriel.
- Deloitte Development LLC, 2019. Urban fulfillment centers: Helping to deliver on the expectation of same-day delivery.
- Dictionnaire Larousse [WWW Document], 2022. . Larousse. URL <https://www.larousse.fr> (accessed 11.23.22).
- Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer, 2010. Les entrepôts et les plates-formes logistiques [WWW Document]. URL http://maelig.com/site_Isteli/DGITM_Entrepots_et_plates-formes_logistiques_6p_web.pdf (accessed 10.14.22).
- Dopico, M., Gomez, A., De la Fuente, D., García, N., Rosillo, R., Puche, J., 2016. A vision of industry 4.0 from an artificial intelligence point of view. *Proceedings of the 2016 International Conference on Artificial Intelligence, ICAI 2016 - WORLDCOMP 2016* 407–413.
- D'Souza, F., Costa, J., Pires, J.N., 2020. Development of a solution for adding a collaborative robot to an industrial AGV. *Industrial Robot* 47, 723–735. <https://doi.org/10.1108/IR-01-2020-0004>
- Duc, D.N., Huu, T.T., Nananukul, N., 2020. A dynamic route-planning system based on industry 4.0 technology. *Algorithms* 13. <https://doi.org/10.3390/a13120308>
- Edouard, A., Lamouri, S., Fortineau, V., Sallez, Y., Berger, A., 2020. Utilisation des approches de l'Industrie 4.0 et de l'Internet Physique pour le déploiement d'entrepôts urbains, in: 13ème CONFERENCE INTERNATIONALE DE MOD ELISATION, OPTIMISATION ET SIMULATION (MOSIM2020). Presented at the 13ème CONFERENCE INTERNATIONALE DE MOD ELISATION, OPTIMISATION ET SIMULATION (MOSIM2020), 12-14 Nov 2020, AGADIR, Maroc, AGADIR (virtual), Maroc.
- Edouard, A., Sallez, Y., Fortineau, V., Lamouri, S., Berger, A., 2022. Automated storage and retrieval systems: An attractive solution for an urban warehouse's sustainable development. *Sustainability* 14, 9518. <https://doi.org/10.3390/su14159518>
- Edouard, A., Sallez, Y., Fortineau, V., Lamouri, S., Berger, A., 2021. Survey on a set of features for new urban warehouse management inspired by industry 4.0 and the physical internet, in: Borangiu, T., Trentesaux, D., Leitão, P., Cardin, O., Lamouri, S. (Eds.), *Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future, Studies in Computational Intelligence*. Springer International Publishing, Cham, pp. 449–459. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69373-2_32
- Ekren, B.Y., Sari, Z., Lerher, T., 2015. Warehouse design under class-based storage policy of shuttle-based storage and retrieval system. *IFAC-PapersOnLine* 48, 1152–1154. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.239>
- Elbouzidi, A.D., Bélanger, M.-J., Pellerin, R., Lamouri, S., Valencia, E.T., 2022. The role of AI in warehouse digital twins. Presented at the 34th European Modeling & Simulation Symposium - 19th International Multidisciplinary Modeling & Simulation Multiconference. (IMMM'2022), Rome, Italy. <https://doi.org/10.46354/i3m.2022.emss.024>
- eMarketer, 2021. Global ecommerce forecast 2021.
- Emde, S., Tahirov, N., Gendreau, M., Glock, C.H., 2020. Routing automated lane-guided transport vehicles in a warehouse handling returns. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.11.038>
- Everaere, C., Perrier, P., 1999. La flexibilité dans les organisations industrielles. *Techniques de l'ingénieur Conception et Production*. <https://doi.org/10.51257/a-v1-ag3100>
- Fager, P., Calzavara, M., Sgarbossa, F., 2019. Kit Preparation with Cobot-supported Sorting in Mixed Model Assembly. *IFAC-PapersOnLine* 52, 1878–1883. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.476>

- Fang, W., An, Z., 2020. A scalable wearable AR system for manual order picking based on warehouse floor-related navigation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 109, 2023–2037. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05771-3>
- Fernandes, Baptista, A., Silva, F.J.G., Campilho, R.D.S.G., Pinto, G.F.L., 2019. Intralogistics and industry 4.0: Designing a novel shuttle with picking system. *Procedia Manufacturing* 38, 1801–1832. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.078>
- Fernández-Caramés, T.M., Blanco-Novoa, O., Froiz-Míguez, I., Fraga-Lamas, P., 2019. Towards an Autonomous Industry 4.0 Warehouse: A UAV and Blockchain-Based System for Inventory and Traceability Applications in Big Data-Driven Supply Chain Management. *Sensors* 19, 1–31. <https://doi.org/10.3390/s19102394>
- Fevad, 2022. Fevad, la fédération du e-commerce et de la vente à distance. [WWW Document]. URL <https://www.fevad.com/> (accessed 10.12.22).
- Fevad, Mediamétrie, 2021. Communiqué de presse - Baromètre trimestriel de l'audience du e-commerce en France – Bilan de l'année 2020 [WWW Document]. URL <https://www.mediametrie.fr/fr/barometre-trimestriel-de-laudience-du-e-commerce-en-france-bilan-de-lannee-2020> (accessed 10.12.22).
- France Supply Chain by Aslog, 2021. Guide de l'intralogistique en France 2020 - 2021 - Mécanisation, automatisation, robotisation, ASLOG. ed. Paris.
- Fritz, W., García Martínez, R., Blanqué, J.R., Adobbati, R., Rama, A., Sarno, M., 1989. The autonomous intelligent system. *Robotics and Autonomous Systems* 5, 109–125. [https://doi.org/10.1016/0921-8890\(89\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0921-8890(89)90004-3)
- Gabellieri, C., Palleschi, A., Mannucci, A., Pierallini, M., Stefanini, E., Catalano, M.G., Caporale, D., Settimi, A., Stoyanov, T., Magnusson, M., Garabini, M., Pallottino, L., 2019. Towards an Autonomous Unwrapping System for Intralogistics. *IEEE Robotics and Automation Letters* 4, 4603–4610. <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2934710>
- Gao, X., Zhang, H., 2022. An efficient learning framework for multiproduct inventory systems with customer choices. *Production & Oper Manag* 31, 2492–2516. <https://doi.org/10.1111/poms.13693>
- G.S.N. Visser, J., 2018. The development of underground freight transport: An overview. *Journal Tunnelling and Underground Space Technology* 80, 123–127. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.06.006>
- Güller, M., Hegmanns, T., 2014. Simulation-based performance analysis of a miniload multishuttle order picking system. *Procedia CIRP* 17, 475–480. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.041>
- Halawa, F., Dauod, H., Lee, I.G., Li, Y., Yoon, S.W., Chung, S.H., 2020. Introduction of a real time location system to enhance the warehouse safety and operational efficiency. *International Journal of Production Economics* 224. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107541>
- Ham, A., 2019. Drone-Based Material Transfer System in a Robotic Mobile Fulfillment Center. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 17, 957–965. <https://doi.org/10.1109/TASE.2019.2952523>
- Hanson, R., Medbo, L., Johansson, M.I., 2018. Performance Characteristics of Robotic Mobile Fulfillment Systems in Order Picking Applications. *IFAC-PapersOnLine* 51, 1493–1498. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.290>
- He, Z., Navneet, K., van Dam, W., Van Mieghem, P., 2021. Robustness assessment of multimodal freight transport networks. *Reliability Engineering & System Safety* 207, 107315. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107315>
- Heitz, A., 2021. The logistics dualization in question: Evidence from the Paris metropolitan area. *Cities* 119, 103407. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103407>
- Honig, W., Kiesel, S., Tinka, A., Durham, J.W., Ayanian, N., 2019. Persistent and Robust Execution of MAPF Schedules in Warehouses. *IEEE Robotics and Automation Letters* 4, 1125–1131. <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2894217>
- Huang, G.Q., Chen, M.Z.Q., Pan, J., 2015. Robotics in ecommerce logistics. *HKIE Transactions* 22, 68–77. <https://doi.org/10.1080/1023697X.2015.1043960>

- Huang, Z., Huang, W., Guo, F., 2020. Integrated sustainable planning of micro-hub network with mixed routing strategy. *Computers & Industrial Engineering* 149, 106872. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106872>
- Hübner, A., Holzapfel, A., Kuhn, H., 2016. Distribution systems in omni-channel retailing. *Bus Res* 9, 255–296. <https://doi.org/10.1007/s40685-016-0034-7>
- Iwan, S., Kijewska, K., Lemke, J., 2016. Analysis of parcel lockers' efficiency as the last mile delivery solution – The results of the research in Poland. *Transportation Research Procedia* 12, 644–655. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.018>
- Jain, P., Pasman, H.J., Waldram, S.P., Rogers, W.J., Mannan, M.S., 2017. Did we learn about risk control since Seveso? Yes, we surely did, but is it enough? An historical brief and problem analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 49, 5–17. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.09.023>
- Janjevic, M., Winkenbach, M., 2020. Characterizing urban last-mile distribution strategies in mature and emerging e-commerce markets. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 133, 164–196. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.01.003>
- Jean-Daniel, D.K., Weisz, J.-D., 2018. Transformation numérique de l'industrie : l'enjeu franco-allemand, Notes du Cerfa.
- Jiang, P., Ishihara, Y., Sugiyama, N., Oaki, J., Tokura, S., Sugahara, A., Ogawa, A., 2020. Depth image-based deep learning of grasp planning for textureless planar-faced objects in vision-guided robotic bin-picking. *Sensors* 20. <https://doi.org/10.3390/s20030706>
- Jin, R., Simchi-Levi, D., Wang, L., Wang, X., Yang, S., 2019. Shrinking the upper confidence bound: A dynamic product selection problem for urban warehouses. *arXiv:1903.07844 [cs, math]*.
- JLL, 2020. Urban infill: the route to delivery solutions (Industrial research).
- Jönsson, S., Lukka, K., 2005. Doing interventionist research in management accounting. *Göteborg Research Institute* 47.
- Kashurnikov, S.N., Sevalnev, V. V., Truntsevsky, Y. V., Cherepanova, E. V., Berestneva, O.G., 2019. E-commerce in supply chain management: Its introduction and prospects in the light industry. *International Journal of Supply Chain Management* 8, 727–732.
- Keung, K.L., Lee, C.K.M., Ji, P., Ng, K.K.H., 2020. Cloud-Based Cyber-Physical Robotic Mobile Fulfillment Systems: A Case Study of Collision Avoidance. *IEEE Access* 8, 89318–89336. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2992475>
- Khanzode, V., Shah, B., 2017. A comprehensive review of warehouse operational issues. *International Journal of Logistics Systems and Management* 26. <https://doi.org/10.1504/ijlsm.2017.10002597>
- Kim, J., Park, D., 2016. Internet-of-Things Based Approach for Warehouse Management System. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering* 11, 159–166. <https://doi.org/10.14257/ijmue.2016.11.10.15>
- Kochan, A., 2016. Growth in e-commerce boosts innovation in the warehouse robot market Robert Bogue. *Industrial Robot: An International Journal* 43.
- La Poste, 2021. Plan stratégique La Poste 2030, engagée pour vous (Dossier de presse).
- Lagin, M., Håkansson, J., Nordström, C., Nyberg, R.G., Öberg, C., 2022. Last-mile logistics of perishable products: a review of effectiveness and efficiency measures used in empirical research. *IJRDM* 50, 116–139. <https://doi.org/10.1108/IJRDM-02-2021-0080>
- Lagorio, A., Pinto, R., Golini, R., 2016. Research in urban logistics: a systematic literature review. *IJPDLM* 46, 908–931. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-01-2016-0008>
- Lamb, J.S., Wirasinghe, S.C., Waters, N.M., 2022. Planning delivery-by-drone micro-fulfilment centres. *Transportmetrica A: Transport Science* 1–32. <https://doi.org/10.1080/23249935.2022.2107729>
- Le Moigne, J.-L., 1977. La théorie du système général: Théorie de la modélisation. Presses universitaires de France.
- Lee, C.K.M., Lv, Y., Ng, K.K.H., Ho, W., Choy, K.L., 2017. Design and application of internet of things-based warehouse management system for smart logistics. *International Journal of Production Research* 56, 2753–2768. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1394592>

- Lee, J.A., Chang, Y.S., Karwowski, W., 2020. Assessment of working postures and physical loading in advanced order picking tasks: A case study of human interaction with automated warehouse goods-to-picker systems. *Work* 67, 855–866. <https://doi.org/10.3233/WOR-203337>
- Lefèvre, T., 2013. Les activités humaines, leurs impacts, la crise environnementale globale et les crises humaines. *Planète viable*. URL <https://planeteviable.org/> (accessed 9.22.22).
- Leng, J., Yan, D., Liu, Q., Zhang, H., Zhao, G., Wei, L., Zhang, D., Yu, A., Chen, X., 2019. Digital twin-driven joint optimisation of packing and storage assignment in large-scale automated high-rise warehouse product-service system. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 1–18. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1667032>
- Lerher, T., 2017. Design of Experiments for Identifying the Throughput Performance of Shuttle-Based Storage and Retrieval Systems. *Procedia Engineering* 187, 324–334. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.382>
- Li, A., Hansen, M., Zou, B., 2022. Traffic management and resource allocation for UAV-based parcel delivery in low-altitude urban space. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 143, 103808. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103808>
- Lin, R., Huang, H., Li, M., 2020. An automated guided logistics robot for pallet transportation. *Assembly Automation* 41, 45–54. <https://doi.org/10.1108/AA-04-2020-0052>
- López, A.R., Cáceres, D.S., 2020. Defining the concept of city hub in urban consolidation schemes: A case study in the city of Gothenburg (Master's thesis in Supply Chain Management). Chalmers - University of technology, Gothenburg, Sweden.
- Lu, S., Xu, C., Zhong, R.Y., Wang, L., 2018. A passive RFID tag-based locating and navigating approach for automated guided vehicle. *Computers and Industrial Engineering* 125, 628–636. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.026>
- Mahroof, K., 2019. A human-centric perspective exploring the readiness towards smart warehousing: The case of a large retail distribution warehouse. *International Journal of Information Management* 45, 176–190. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2018.11.008>
- Mavri, M., 2015. Redesigning a Production Chain Based on 3D Printing Technology. *Knowledge and Process Management* 22, 141–147. <https://doi.org/10.1002/kpm.1466>
- Mentzer, J.T., DeWitt, W., Keebler, J.S., Min, S., Nix, N.W., Smith, C.D., Zacharia, Z.G., 2001. Defining supply chain management. *Journal of Business Logistics* 22, 1–25. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00001.x>
- Merini, C., Ponté, P., 2008. La recherche-intervention comme mode d'interrogation des pratiques. *Savoirs* n° 16, 77–95. <https://doi.org/10.3917/savo.016.0077>
- Merschformann, M., Lamballais, T., de Koster, M.B.M., Suhl, L., 2019. Decision rules for robotic mobile fulfillment systems. *Operations Research Perspectives* 6. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2019.100128>
- Meryem, O., Saad, L.E., Mohamed, K., Fouad, J., 2019. Review of good practices in urban freight transportation and benchmarking city logistics schemes, in: 2019 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA). Presented at the 2019 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA), IEEE, Montreuil - Paris, France, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/LOGISTIQUA.2019.8907328>
- Meyer, C.B., 2001. A case in case study methodology. *Field Methods* 13, 329–352. <https://doi.org/10.1177/1525822X0101300402>
- Michael E. Porter and James E. Heppelmann, 2014. How Smart, Connected Products are Transforming Competition. *Harvard Business Review* 1–23.
- Millstein, M.A., Bilir, C., Campbell, J.F., 2022. The effect of optimizing warehouse locations on omnichannel designs. *European Journal of Operational Research* 301, 576–590. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.10.061>
- Modula, 2018. Comparaison des systèmes de stockage automatiques: différences, avantages et désavantages [WWW Document]. URL <https://www.modula.eu/blog/fr/comparaison-des-systemes-de-stockage-automatiques-differences-avantages-et-desavantages/> (accessed 3.4.22).

- Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S., Barbaray, R., 2018. The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International Journal of Production Research* 56, 1118–1136. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1372647>
- Mohanraj, K., Vijayalakshmi, S., Balaji, N., Chithrakkannan, R., Karthikeyan, R., 2019. Smart warehouse monitoring using IoT. *International Journal of Engineering and Advanced Technology* 8, 3597–3600. <https://doi.org/10.35940/ijeat.F9355.088619>
- Moncef, B., Akeb, H., Fourot, J.-C., Durand, B., 2018. La livraison collaborative des consommateurs connectés, nouvel enjeu de la logistique urbaine. *DM* 91, 97–113. <https://doi.org/10.7193/DM.091.97.113>
- Mostafa, N., Hamdy, W., Alawady, H., 2019. Impacts of internet of things on supply chains: A framework for warehousing. *Social Sciences* 8. <https://doi.org/10.3390/socsci8030084>
- Mourtzis, D., Samothrakis, V., Zogopoulos, V., Vlachou, E., 2019. Warehouse Design and Operation using Augmented Reality technology: A Papermaking Industry Case Study. *Procedia CIRP* 79, 574–579. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.097>
- Nagda, M.K., Sinha, S., Poovammal, E., 2019. An augmented reality assisted order picking system using IoT. *International Journal of Recent Technology and Engineering* 8, 744–749. <https://doi.org/10.35940/ijrte.C3991.098319>
- Nikitas, A., Kougias, I., Alyavina, E., Njaya Tchouamou, E., 2017. How can autonomous and connected vehicles, electromobility, BRT, Hyperloop, shared use mobility and mobility-as-a-service shape transport futures for the context of smart cities? *Urban Science* 1, 36. <https://doi.org/10.3390/urbansci1040036>
- Ning, Z., Lei, L., Saipeng, Z., Lodewijks, G., 2016. An efficient simulation model for rack design in multi-elevator shuttle-based storage and retrieval system. *Simulation Modelling Practice and Theory* 67, 100–116. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.03.007>
- Nolz, P.C., Absi, N., Cattaruzza, D., Feillet, D., 2020. Two-echelon distribution with a single capacitated city hub. *EURO Journal on Transportation and Logistics* 9, 100015. <https://doi.org/10.1016/j.ejtl.2020.100015>
- Observatoire Régional de l'Immobilier d'Entreprise en Ile-de-France, 2018. La logistique urbaine, un enjeu stratégique pour le territoire francilien - Note semestrielle de l'ORIE.
- Olsen, T.L., Tomlin, B., 2020. Industry 4.0: Opportunities and challenges for operations management. *Manufacturing and Service Operations Management* 22, 113–122. <https://doi.org/10.1287/msom.2019.0796>
- Onstein, A.T.C., Bharadwaj, I., Tavasszy, L.A., van Damme, D.A., el Makhoulfi, A., 2021. From XXS to XXL: Towards a typology of distribution centre facilities. *Journal of Transport Geography* 94, 103128. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103128>
- ONU, 2022. Objectifs de développement durable [WWW Document]. URL <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/> (accessed 10.18.22).
- ONU, 2019. 9.7 billion on Earth by 2050, but growth rate slowing, says new UN population report.
- Pan, S., 2010. Contribution à la définition et à l'évaluation de la mutualisation de chaînes logistiques pour réduire les émissions de CO2 du transport: application au cas de la grande distribution (Gestion et management). École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Piardi, L., Kalempa, V.C., Limeira, M., de Oliveira, A.S., Leitão, P., 2019. ARENA –augmented reality to enhanced experimentation in smart warehouses. *Sensors* 19, 1–15. <https://doi.org/10.3390/s19194308>
- Plakas, G., Ponis, S.T., Agalinos, K., Aretoulaki, E., Gayalis, S.P., 2020. Augmented reality in manufacturing and logistics: Lessons learnt from a real-life industrial application. *Procedia Manufacturing* 51, 1629–1635. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.227>
- Poon, T.C., Choy, K.L., Chan, F.T.S., Ho, G.T.S., Gunasekaran, A., Lau, H.C.W., Chow, H.K.H., 2011. A real-time warehouse operations planning system for small batch replenishment problems in production environment. *Expert Systems with Applications* 38, 8524–8537. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.01.053>

- Qu, X., Zeng, Z., Wang, K., Wang, S., 2022. Replacing urban trucks via ground–air cooperation. *Communications in Transportation Research* 2, 100080. <https://doi.org/10.1016/j.commtr.2022.100080>
- Radivojević, G., Milosavljević, L., 2019. The concept of logistics 4.0. Presented at the 4th Logistics International Conference, Belgrade, Serbia, p. 10.
- Rai, H.B., Kang, S., Sakai, T., Tejada, C., Yuan, Q. (Jack), Conway, A., Dablanc, L., 2022. 'Proximity logistics': Characterizing the development of logistics facilities in dense, mixed-use urban areas around the world 21. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.10.007>
- Readdy, P.J., Gunasekaran, A., Spalanzani, A., 2015. Bottom-up approach based on Internet of Things for order fulfillment in a collaborative warehousing environment. *International Journal of Production Economics* 159, 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.02.017>
- Remondino, M., 2020. Augmented reality in logistics: Qualitative analysis for a managerial perspective. *International Journal of Logistics Systems and Management* 36, 1–5. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2020.107218>
- Ren, M., Fan, Z., Wu, J., Zhou, L., Du, Z., 2019. Design and optimization of Underground Logistics Transportation networks. *IEEE Access* 7, 83384–83395. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924438>
- Rhiat, A., Aggoun, A., Lachere, R., 2020. Combining Mobile Robotics and Packing for Optimal deliveries. *Procedia Manufacturing* 44, 536–542. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.258>
- Roodbergen, K.J., Vis, I.F., 2009. A survey of literature on automated storage and retrieval systems. *European journal of operational research* 194, 343–362. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.ejor.2008.01.038>
- Rosin, F., Forget, P., Lamouri, S., Pellerin, R., 2020. Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles. *International Journal of Production Research* 58, 1644–1661. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1672902>
- Rouwenhorst, B., Reuter, B., Stockrahm, V., Van Houtum, G.J., Mantel, R.J., Zijm, W.H.M., 2000. Warehouse design and control: Framework and literature review. *European Journal of Operational Research* 122, 515–533. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00020-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00020-X)
- Rusmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., Harnisch, M., 2015. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. The Boston Consulting Group 1–20.
- Satish, A., Karthikeyan, V., Srinivasareddy, P.S., Raja, A., 2020. A survey on latest developments and applications in supply chain management using IoT. *Journal of Critical Reviews* 7, 1170–1179. <https://doi.org/10.31838/jcr.07.08.244>
- Schwerdtfeger, B., Reif, R., Günthner, W.A., Klinker, G., 2011. Pick-by-vision: There is something to pick at the end of the augmented tunnel. *Virtual Reality* 15, 213–223. <https://doi.org/10.1007/s10055-011-0187-9>
- Settey, T., Gnap, J., Beňová, D., Pavličko, M., Blažeková, O., 2021. The growth of e-commerce due to COVID-19 and the need for urban logistics centers using electric vehicles: Bratislava case study. *Sustainability* 13, 5357. <https://doi.org/10.3390/su13105357>
- Shin, M., Paik, W., Kim, B., Hwang, S., 2019. An IoT Platform with Monitoring Robot Applying. *Sensors* 19, 1–13. <https://doi.org/10.3390/s19112525>
- Smith, D., Srinivas, S., 2019. A simulation-based evaluation of warehouse check-in strategies for improving inbound logistics operations. *Simulation Modelling Practice and Theory* 94, 303–320. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.03.004>
- Song, J.M., Sung, J., Park, T., 2019. Applications of Blockchain to Improve Supply Chain Traceability. *Procedia Computer Science* 162, 119–122. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.11.266>
- Stolaroff, J.K., Samaras, C., O'Neill, E.R., Lubers, A., Mitchell, A.S., Ceperley, D., 2018. Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery. *Nat Commun* 9, 409. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02411-5>

- Stoltz, M.H., Giannikas, V., McFarlane, D., Strachan, J., Um, J., Srinivasan, R., 2017. Augmented Reality in Warehouse Operations: Opportunities and Barriers. *IFAC-PapersOnLine* 50, 12979–12984. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1807>
- Su, T.S., Lee, S.S., Hsu, W.H., Fu, S.H., 2019. A fuzzy-based approach to improve the human pick-to-light efficiency incorporated with robots behavior in an intelligent distribution center. *Procedia Manufacturing* 38, 776–783. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.105>
- TALHI, A., FORTINEAU, V., HUET, J.-C., LAMOURI, S., 2020. A methodology for cloud manufacturing architecture in the context of industry 4.0. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* 62, 271–284. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2020.131849>
- Tang, C.S., Veelenturf, L.P., 2019. The strategic role of logistics in the industry 4.0 era. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 129, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.06.004>
- Taniguchi, E., Thompson, R.G., 2002. Modeling city logistics. *Transportation Research Record* 1790, 45–51. <https://doi.org/10.3141/1790-06>
- Taniguchi, E., Thompson, R.G., Yamada, T., 2016. New Opportunities and Challenges for City Logistics. *Transportation Research Procedia* 12, 5–13. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.004>
- Tejesh, B.S.S., Neeraja, S., 2018. Warehouse inventory management system using IoT and open source framework. *Alexandria Engineering Journal* 57, 3817–3823. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.02.003>
- Tjahjono, B., Esplugues, C., Ares, E., Pelaez, G., 2017. What does Industry 4.0 mean to Supply Chain? *Procedia Manufacturing* 13, 1175–1182. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.191>
- Trab, S., Bajic, E., Zouinkhi, A., Abdelkrim, M.N., Chekir, H., Ltaief, R.H., 2015a. Product Allocation Planning with Safety Compatibility Constraints in IoT-based Warehouse. *Procedia Computer Science* 73, 290–297. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.033>
- Trab, S., Bajic, E., Zouinkhi, A., Abdelkrim, M.N., Chekir, H., Ltaief, R.H., 2015b. Product Allocation Planning with Safety Compatibility Constraints in IoT-based Warehouse. *Procedia Computer Science* 73, 290–297. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.033>
- Trab, S., Bajic, E., Zouinkhi, A., Thomas, A., Abdelkrim, M.N., Chekir, H., Ltaief, R.H., 2017. A communicating object's approach for smart logistics and safety issues in warehouses. *Concurrent Engineering Research and Applications* 53–67. <https://doi.org/10.1177/1063293X16672508>
- Trab, S., Zouinkhi, A., Bajic, E., Abdelkrim, M.N., Chekir, H., 2018. IoT-based risk monitoring system for safety management in warehouses. *International Journal of Information and Communication Technology* 13, 424–438. <https://doi.org/10.1504/IJICT.2018.095032>
- Turner, A., 2020. Evaluation of automated storage and retrieval in a distribution center (Master thesis). MIT Sloan School of Management Department of Mechanical Engineering, University of California Santa Barbara.
- Vergidis, K., Tiwari, A., Majeed, B., 2008. Business process analysis and optimization: Beyond reengineering. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C* 38, 69–82. <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2007.905812>
- Voxlog, 2021. Micro-fulfillment center : nouveau maillon stratégique pour la supply chain ? [WWW Document]. Voxlog. URL https://www.voxlog.fr/dossier/203_1/micro-fulfillment-center-nouveau-maillon-strategique-pour-la-supply-chain (accessed 11.7.22).
- Wang, K., 2016. Logistics 4.0 solution - New challenges and opportunities, in: *Proceedings of the 6th International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation*. Presented at the 6th International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation, Atlantis Press, Manchester, UK. <https://doi.org/10.2991/iwama-16.2016.13>
- Wang, T., Singh, M., Süer, G., 2019. Evaluation of alternative labor levels to minimize average flowtime at distribution centers. *Procedia Manufacturing* 39, 1482–1492. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.300>

- Wang, Y., Man, K.L., Lee, K., Hughes, D., Guan, S.U., Wong, P., 2020. Application of wireless sensor network based on hierarchical edge computing structure in rapid response system. *Electronics (Switzerland)* 9, 1–12. <https://doi.org/10.3390/electronics9071176>
- Wen, J., He, L., Zhu, F., 2018. Swarm Robotics Control and Communications: Imminent Challenges for Next Generation Smart Logistics. *IEEE Communications Magazine* 56, 102–107. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700544>
- White, S.A., 2004. Introduction to BPMN. Ibm Cooperation.
- Winkelhaus, S., Grosse, E.H., 2020. Logistics 4.0: a systematic review towards a new logistics system. *International Journal of Production Research* 58, 18–43. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1612964>
- Witkowski, K., 2017. Internet of Things, Big Data, Industry 4.0 - Innovative Solutions in Logistics and Supply Chains Management. *Procedia Engineering* 182, 763–769. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.197>
- Wu, W., Cheung, C., Lo, S.Y., Zhong, R.Y., Huang, G.Q., 2020a. An iot-enabled real-time logistics system for a third party company: A case study. *Procedia Manufacturing* 49, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.06.005>
- Wu, W., Cheung, C., Lo, S.Y., Zhong, R.Y., Huang, G.Q., 2020b. An iot-enabled real-time logistics system for a third party company: A case study. *Procedia Manufacturing* 49, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.06.005>
- Xie, L., Thieme, N., Krenzler, R., Li, H., 2021. Introducing split orders and optimizing operational policies in robotic mobile fulfillment systems. *European Journal of Operational Research* 288, 80–97. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.05.032>
- Yang, Q., Lian, Y., Xie, W., 2020. Hierarchical planning for multiple AGVs in warehouse based on global vision. *Simulation Modelling Practice and Theory* 104. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2020.102124>
- Zhao, K., Zhu, M., Xiao, B., Yang, X., Gong, C., Wu, J., 2020. Joint RFID and UWB Technologies in Intelligent Warehousing Management System. *IEEE Internet of Things Journal* 7, 11640–11655. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2998484>
- Zhou, L., Yang, X., Chen, L., You, S., Li, F., Cao, Y., 2020. Effective storage location assignment model based on a genetic simulation annealing algorithm. *International Journal of Wireless and Mobile Computing* 19, 9–17. <https://doi.org/10.1504/IJWMC.2020.109237>
- Zou, B., Xu, X., Gong, Y., De Koster, R., 2016. Modeling parallel movement of lifts and vehicles in tier-captive vehicle-based warehousing systems. *European Journal of Operational Research* 254, 51–67. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.039>
- Zuniga, C.A., Olivares-Benitez, E., Tenahua, A.M., Mujica, M.A., 2015. A methodology to solve the Order Batching Problem. *IFAC-PapersOnLine* 48, 1380–1386. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.279>

AuréliE EDOUARD

Contribution à un modèle durable de logistique urbaine par le développement de l'entrepôt urbain 4.0

Résumé

Les questions de développement durable font l'objet d'une prise de conscience croissante. Les acteurs de la chaîne logistique sont de plus en plus conscients de cette situation, d'autant plus que les pressions réglementaires, sociales et sociétales dans ce domaine sont de plus en plus nombreuses. Cette situation n'est pas sans conséquence sur les pratiques des entreprises. Ainsi, le modèle d'entrepôt urbain s'impose comme l'une des solutions étudiées dans le contexte de la logistique urbaine, domaine de recherche en émergence, qui aborde le développement durable des pratiques de gestion des flux de marchandises dans les centres-villes. Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un contrat de recherche Cifre réalisée en partenariat avec l'entreprise La Poste qui cherche à développer un réseau national d'entrepôts urbains dans le cadre de prestations de services de logistique de proximité.

Ce travail apporte deux contributions principales. D'une part, l'absence d'un modèle générique a nécessité de définir le concept d'entrepôt urbain et de préciser les composantes du modèle (caractéristiques, contraintes et défis). D'autre part, pour optimiser les processus internes de ces nouvelles installations logistiques, une proposition de nouveaux outils, tirés de l'Industrie 4.0, a été réalisée. Son objectif étant d'améliorer la satisfaction des clients à moindres coûts, en intégrant les contraintes du terrain et répondant à des problématiques actuelles.

Le travail a été réalisé en plusieurs étapes. Tout d'abord, deux états de l'art ont exploré la littérature scientifique, d'une part, sur les entrepôts urbains, et d'autre part, sur les pratiques 4.0 observées en entrepôts de distribution traditionnels, analysées en tant que perspective intéressante pour l'amélioration des processus des entrepôts urbains. Ensuite, appuyées par les données d'observations du terrain et les conclusions des états de l'art, les composantes du modèle des entrepôts urbains ont été définies afin de relever les contraintes et les enjeux de ces installations, impactant leur développement sous une forme durable. La définition de ces composantes a mené à la proposition d'une amélioration des processus par l'emploi des outils adaptés tirés de l'Industrie 4.0. Pour finir, un cas d'étude a été mené, avec des données réelles d'un client et l'application d'une méthodologie de conception de systèmes intelligents, sur l'application d'un des outils 4.0 proposé. Les systèmes étudiés sont les systèmes de stockage et de prélèvement automatique, dont l'emploi a été identifié pertinent pour relever les défis d'optimisation du foncier, de modularité et reconfigurabilité et de durabilité des entrepôts urbains. Cette étude a permis d'observer les conséquences de la mise en place d'un tel système sur la performance de ces installations.

Mots-clés : Développement durable, Logistique urbaine, Entrepôts urbains, Gestion des entrepôts, Industrie 4.0, Logistique 4.0

Résumé en anglais

There is a growing awareness of sustainable development issues. Supply chain actors are increasingly aware of this situation, especially as regulatory, social and societal pressures in this area are growing. This situation is not without consequences for business practices. Thus, the urban warehouse model is one of the solutions studied in the context of urban logistics, an emerging research field that addresses the sustainable development of goods flow management practices in city centers. This thesis is part of a Cifre research contract carried out in partnership with La Poste, the French post office company, which is seeking to develop a national network of urban warehouses as part of local logistics services.

This work provides two main contributions. On the one hand, the lack of a generic model required defining the concept of urban warehouse and specifying the components of the model (characteristics, constraints and challenges). On the other hand, in order to optimize the internal processes of these new logistic facilities, a proposal of new tools, drawn from Industry 4.0, was made. Its objective is to improve customer satisfaction at lower costs, by integrating the constraints of the field and responding to current issues.

The work was carried out in several stages. First, two state of the art studies explored the scientific literature, on the one hand, on urban warehouses, and on the other hand, on 4.0 practices observed in traditional distribution warehouses, analyzed as an interesting perspective for the improvement of urban warehouse processes. Then, based on the field observation data and the conclusions of the state of the art, the components of the urban warehouse model were defined in order to identify the constraints and challenges of these facilities, impacting their development in a sustainable way. The definition of these components led to the proposal of a process improvement by using adapted tools from Industry 4.0. Finally, a case study was conducted, with real data of a customer and the application of a methodology of intelligent systems design, on the application of one of the proposed 4.0 tools. The systems studied were automated storage and retrieval systems, which were identified as relevant to address the challenges of land optimization, modularity and reconfigurability and sustainability of urban warehouses. This study allowed us to observe the consequences of the implementation of such a system on the performance of these facilities.

Keywords: Sustainable development, Urban logistics, Urban warehouses, Warehouse management, Industry 4.0, Logistics 4.0