



HAL
open science

UTILISATION DES APPROCHES DE L'INDUSTRIE 4.0 ET DE L'INTERNET PHYSIQUE POUR LE DEPLOIEMENT D'ENTREPOTS URBAINS

Aurélie Édouard, Samir Lamouri, Virginie Fortineau, Yves Sallez, Alexandre
Berger

► **To cite this version:**

Aurélie Édouard, Samir Lamouri, Virginie Fortineau, Yves Sallez, Alexandre Berger. UTILISATION DES APPROCHES DE L'INDUSTRIE 4.0 ET DE L'INTERNET PHYSIQUE POUR LE DEPLOIEMENT D'ENTREPOTS URBAINS. 13^{ème} CONFERENCE INTERNATIONALE DE MODELISATION, OPTIMISATION ET SIMULATION (MOSIM2020), 12-14 Nov 2020, AGADIR, Maroc, Nov 2020, AGADIR (virtual), Maroc. hal-03193070

HAL Id: hal-03193070

<https://hal.science/hal-03193070>

Submitted on 8 Apr 2021

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.

UTILISATION DES APPROCHES DE L'INDUSTRIE 4.0 ET DE L'INTERNET PHYSIQUE POUR LE DEPLOIEMENT D'ENTREPOTS URBAINS.

Aurélié Édouard, Samir Lamouri,
Virginie Fortineau

Arts et Métiers

Paris, France LAMIH UMR CNRS 8201

aurelie.edouard@ensam.eu, samir.lamouri@ensam.eu,
virginie.fortineau@ensam.eu

Yves Sallez¹, Alexandre Berger²

¹UPHF, Valenciennes, France LAMIH UMR
CNRS 8201

yves.sallez@uphf.fr

²Le Groupe La Poste, France
alexandre.berger@laposte.fr

RÉSUMÉ : *La logistique urbaine est une branche importante de la « supply chain ». Elle englobe les activités de logistique et de transport dans les zones urbaines. Ce domaine de recherche suscite l'intérêt croissant des chercheurs. Dans cet article, nous abordons un nouveau concept : l'entrepôt urbain. Ce concept logistique orienté client vise à répondre aux défis de la livraison du dernier kilomètre. Pour ce faire, l'utilisation des technologies de l'industrie 4.0, et de l'Internet physique est explorée. Puis une validation des contributions via un projet du groupe La Poste, qui vise à créer un laboratoire expérimental, est proposée.*

MOTS-CLES : *Systèmes urbains, chaînes logistiques, industrie 4.0, systèmes de production de services, livraison du dernier kilomètre, gestion d'entrepôts urbains.*

1 INTRODUCTION

La logistique est présentée comme une branche importante du Supply Chain Management dans la littérature. Elle peut être définie comme « *le processus de planification, de mise en œuvre et de contrôle d'un flux, et de stockage efficace et effectif de biens, 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).

La logistique associée à la consolidation, au transport et à la distribution des marchandises dans les villes est appelée logistique urbaine. Cette notion a été décrite par Taniguchi comme « *le processus d'optimisation des activités de logistique et de transport réalisées par des entreprises privées dans les zones urbaines, tout en tenant compte de l'environnement, de la circulation, des embouteillages et de la consommation d'énergie dans le cadre d'une économie de marché* » (Dolati Neghabadi, Evrard Samuel, and Espinouse 2019).

Parmi les activités logistiques, cet article s'intéresse à la gestion des espaces de stockage urbains (entrepôts), qui sont une des composantes de la logistique urbaine. Un entrepôt est un point de stockage intermédiaire qui permet de lisser la relation entre le temps et la demande, peut assurer la distribution et offrir des services à valeur ajoutée (Higgins, Ferguson, and Kanaroglou 2012). Jusqu'à récemment, ces espaces de stockage de colis étaient situés dans les banlieues extérieures (Dablanc and Rakotonarivo 2010).

Les problèmes liés au changement climatique, la tendance à la croissance des ventes en ligne et la demande de

livraison instantanée ont fait pression pour que l'on adopte des pratiques logistiques permettant de gagner du temps et que l'on mette en place les installations de traitement de commandes dans des endroits stratégiques ayant un accès direct aux marchés de consommation (Kang 2020). Par conséquent, les villes sont confrontées à la réintroduction d'espaces et d'installations logistiques dans les zones urbaines intérieures.

Face aux défis actuels du développement durable, de la rentabilité, de la traçabilité, de la satisfaction des clients et des livraisons du dernier kilomètre, l'objectif de cet article est de présenter un nouveau type d'entrepôt, un entrepôt urbain, et de proposer l'utilisation des approches de l'Industrie 4.0 et de l'Internet physique pour résoudre les problèmes de gestion de ces nouveaux espaces.

La suite du document est organisée comme suit : la section 2 présente un examen des défis de la logistique urbaine en termes d'impact sur les entrepôts et les problèmes à résoudre. La section 3 explique comment les concepts de l'Industrie 4.0 et de l'Internet Physique seront utilisés pour résoudre les problèmes des nouveaux entrepôts urbains qui ont été présentés. La section 4 introduit un cas d'application pour valider les contributions proposées. Enfin, la section 5 propose une discussion et une conclusion.

2 LES DÉFIS DE LA LOGISTIQUE URBAINE

2.1 Logistique urbaine

L'objectif final des efforts de logistique urbaine est d'accroître la prospérité d'une ville tout en atténuant les conséquences négatives telles que la pollution, le trafic et les impacts sur l'environnement.

Comme l'a indiqué (Dablanc and Rakotonarivo 2010) : « la municipalité de Paris a eu tendance à négliger une dimension importante des questions de circulation des marchandises urbaines en région parisienne : la "fuite" vers la banlieue de nombreuses installations logistiques ». Ce phénomène est appelé « étalement logistique » et correspond au déplacement des installations logistiques (entrepôts, transbordements, terminaux intermodaux, etc.) hors des limites d'une ville vers les zones suburbaines. Les zones urbaines intérieures constituent une offre très limitée de terrains commerciaux et industriels disponibles et abordables pour établir et exploiter des installations logistiques. En conséquence, la plupart des installations logistiques sont actuellement situées dans des grappes logistiques à la périphérie des zones métropolitaines, à proximité des réseaux routiers, des principaux aéroports et des ports maritimes.

Ce phénomène a augmenté les distances parcourues par les camions et les fourgonnettes nécessaires à la logistique du dernier kilomètre et a donc également accru les embouteillages et les impacts environnementaux. Compte tenu des enjeux actuels liés au changement climatique et des nouvelles demandes des clients, générées notamment par le commerce électronique (e-commerce), la stratégie de certains acteurs privés consiste à réintroduire ces espaces logistiques au sein des zones urbaines intérieures d'une métropole. De plus, le dernier kilomètre de la chaîne logistique est considéré comme l'une des parties les plus coûteuses, inefficaces et polluantes de la chaîne logistique (Gevaers, Van de Voorde, and Vanelslander 2009).

Le retour de ces espaces dans le centre-ville, et les défis liés aux livraisons du dernier kilomètre incitent les chercheurs et les acteurs de la chaîne logistique à repenser la structure des installations ainsi que leurs méthodologies de gestion afin de les adapter aux défis récents de la logistique urbaine. Il est tout d'abord intéressant de se poser la question : quels sont les enjeux de ces nouveaux entrepôts urbains ?

2.2 Livraisons du dernier kilomètre : un défi logistique pour les villes

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 même » (allant parfois jusqu'à des options de livraison en 1 et 2 heures), la « livraison directe au consommateur ». Cela a occasionné d'importantes contraintes sur le trafic urbain (embouteillages, désagréments et inefficacité), l'environnement (émissions de gaz à effet de serre et gaspillage de ressources), le bien-être (bruit, accidents et santé publique) et la gouvernance (pénurie de terrains et expansion incontrôlée) (Hu et al. 2019); thèmes abordés dans de nombreuses publications. Cette tendance a également un impact sur la gestion des installations logistiques.

La logistique du dernier kilomètre s'effectue à partir d'un point de pénétration de la commande, comme l'entrepôt

urbain présenté ci-dessus, jusqu'au point de destination préféré du destinataire final pour la réception des marchandises (Phuong 2020). Dans ce contexte, l'objectif principal de la logistique et de la gestion de la chaîne logistique reste le même : fournir un bon service (le bon produit au bon moment et au bon endroit) à un faible coût.

Nous nous intéressons à l'impact des enjeux de la logistique du dernier kilomètre sur les fonctionnalités et organisations attendues de l'entrepôt urbain, point de pénétration et élément majeur de cette logistique urbaine, en énonçant dans la prochaine partie les facteurs clés et actions associés à la réussite de la gestion d'un entrepôt urbain.

2.3 Questions relatives aux entrepôts

Les entrepôts remplissent les fonctions de base de réception, de stockage, de préparation des commandes et d'expédition (Yavas and Ozkan-Ozen 2020). Certains sont plus complexes et exercent également des activités de distribution et de valeur ajoutée. Les principales activités à valeur ajoutée sont (Grundey and Rimiené 2007) :

- Gestion logistique totale, contrôle des stocks et suivi ;
- Emballage, étiquetage ;
- Gestion des achats et des fournisseurs ;
- Retour des emballages vides, réparation, logistique inverse ;
- Personnalisation, ajout de pièces et de manuels ;
- Contrôle de la qualité, essais des produits ;
- Installation et instruction, formation sur les produits dans les locaux du client.

Entrepôts classiques	Entrepôts urbains
Grands espaces	Petites surfaces (quelques centaines de m ²)
Situé en banlieue (Distance moyenne du centre-ville : 16 km)	Situé en centre-ville
Circulation rapide des marchandises	Accès direct aux marchés de consommation (derniers kilomètres) — Stock de proximité
Cross docking	Livraison en quelques heures
Utilisation des dispositifs traditionnels de gestion des flux tels que les convoyeurs, les élévateurs à fourche, les AGV...	Peu de clients
Installation standardisée pour l'ensemble de l'installation logistique	Défi d'optimisation de l'impact environnemental des bâtiments et des transports
	Offres personnalisées et sur mesure (espaces modulables, employés formés, veille technologique)

Tableau 1 : Spécifications des entrepôts urbains comparées à celles des entrepôts classiques

Certaines spécifications des entrepôts classiques exploitant les fonctions mentionnées doivent être adaptées à

l'environnement urbain. Le tableau 1 présente une brève comparaison entre les spécifications des entrepôts classiques provenant de (Higgins, Ferguson, and Kanaroglou 2012) et celles des entrepôts urbains (Berg and Zijm 1999).

Pour assurer les fonctions de base et les activités à valeur ajoutée dans le contexte de la logistique urbaine, les entrepôts urbains doivent relever de nombreux défis. (Yavas and Ozkan-Ozen 2020), (Juntao 2016), (Witkowski 2017) et (Shiau and Lee 2010) mettent en évidence six facteurs clés de succès résumés dans la figure 1.

Optimisation : l'optimisation des flux et des processus dans un entrepôt joue un rôle majeur : elle permet de gagner en performance. En effet, le travail sur la chaîne de valeur permet d'identifier et de réduire les déchets, les stocks et les activités de manutention inutiles et la perte d'espace.

Traçabilité : elle permet de connaître l'origine d'un produit et de suivre son cheminement tout au long de la chaîne d'approvisionnement. Elle permet aux clients de suivre la progression de la préparation et de l'expédition de leurs commandes, et de gérer les flux physiques de la logistique inverse, et les objets consignés.

Fiabilité : une organisation et ses systèmes doivent être fiables afin de respecter les délais promis aux clients et

d'éviter les erreurs d'enregistrement (enregistrement manuel). Le respect des délais est un gage de satisfaction des clients, et la qualité des données permet d'éviter des écarts d'inventaire et une perte d'informations dans le système d'information.

Réactivité : il s'agit d'améliorer l'organisation via le système d'information afin de donner la possibilité de regrouper les commandes pour un seul client ou encore gérer efficacement les erreurs de sélections.

Sécurité : il s'agit d'un facteur essentiel pour toute organisation. L'employeur doit assurer la sécurité de ses employés. L'aménagement et l'utilisation des installations doivent respecter certaines règles. Les entreprises doivent s'assurer que l'ergonomie des espaces de travail permettra de prévenir les troubles musculosquelettiques (TMS). L'entreprise doit également assurer la sécurité de ses données.

Flexibilité : la capacité d'une organisation à répondre rapidement aux fluctuations de la demande, tant en termes de volume que de variété (Duclos, Vokurka, and Lummus 2003). Ce facteur comprend la capacité de personnaliser les produits pour répondre aux demandes spécifiques des clients, d'ajuster la capacité pour répondre aux changements de quantités, de lancer des produits nouveaux, de fournir un accès généralisé aux produits et de répondre aux besoins d'un marché cible.

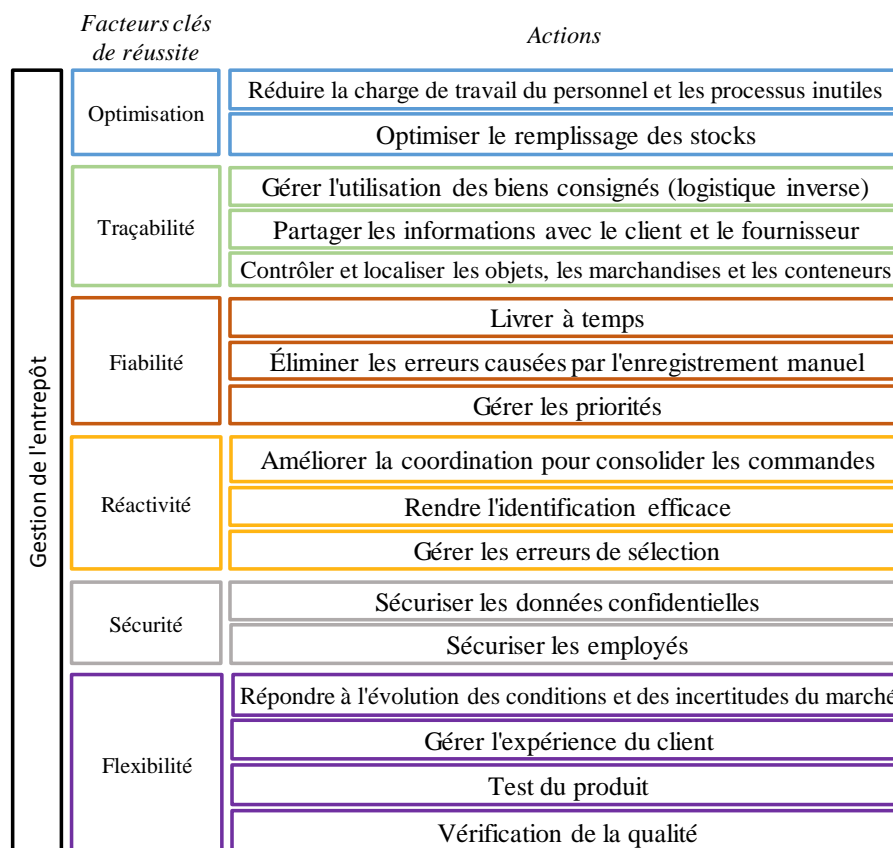


Figure 1 : Facteurs clés de réussite des entrepôts urbains

3 VERS UNE GESTION OPTIMALE DES ENTREPÔTS URBAINS

Comme évoqué précédemment, l'essor actuel du commerce électronique a entraîné une forte demande et une forte pression sur les services logistiques, et a renforcé l'importance de la logistique du dernier kilomètre. De nombreux articles présentent les méthodes et technologies de l'industrie 4.0 comme une opportunité pour répondre aux besoins des clients et contribuer au développement de la logistique et de la gestion de la chaîne logistique. En outre, le paradigme de l'Internet physique (IP) est de plus en plus souvent mentionné pour développer l'« exploitation de réseaux d'approvisionnement interconnectés qui utilisent un ensemble de protocoles collaboratifs, de conteneurs modulaires et d'interfaces intelligents standards, pour accroître l'efficacité et la durabilité » (Pan et al. 2017). À notre avis, le couplage des concepts proposés par l'IP et les technologies de « l'industrie 4.0 » peut contribuer à résoudre les problématiques des nouveaux entrepôts urbains.

3.1 Revue de la littérature sur les technologies de l'Industrie 4.0 pouvant être appliquées aux questions de logistique urbaine

Dans la stratégie de la chaîne logistique, il existe des tensions entre des priorités concurrentes que sont le coût, la flexibilité, la rapidité et la qualité (Olsen and Tomlin 2020). Elle peut également inclure l'objectif de zéro émission, une priorité qui n'a que récemment été prise en considération. Les technologies soutenant l'Industrie 4.0 peuvent améliorer une ou plusieurs de ces priorités, individuellement ou en combinaison les unes aux autres. De nombreuses études, telles que « German Manufacturing 4.0 » (Cerfa 2018), mettent en évidence les technologies clés. Une enquête bibliographique a été menée pour identifier les principales catégories de technologie de l'industrie 4.0 qui sont applicables à la logistique urbaine.

Données massives (DM) : les processus logistiques génèrent une grande quantité de données, provenant de sources diverses récoltées sous différentes formes, tels que celles collectées par les technologies de l'IdO (Internet des Objets). Ces données se doivent d'être traitées rapidement. Leur collecte et évaluation complète aident à soutenir la prise de décision en temps réel. Les données massives permettent d'analyser et de séparer ce qui est important de ce qui ne l'est pas, aidant ainsi à tirer des conclusions et à soutenir un transfert de connaissances plus efficace pour atteindre les objectifs commerciaux (Witkowski 2017).

L'infonuagique ou Cloud Computing (CC) permet le traitement à grande échelle, il est peu coûteux et flexible pour le calcul et le stockage. Le CC permet un accès réseau permanent, la capacité d'augmenter ou de réduire la capacité à volonté et une localisation indépendante des groupements de ressources (Dopico et al. 2016).

Les systèmes cyber-physiques (SCP) contiennent deux composantes fonctionnelles principales : une connectivité avancée, qui assure la collecte de données en temps réel à partir du monde physique et le retour d'informations dans

le cyberspace, et des fonctions intelligentes de gestion, d'analyse et de calcul des données pour construire le cyberspace (Lee, Bagheri, and Kao 2015).

Internet des objets (IdO) : cette technologie rend possible la création d'informations sans observation humaine. Ces informations sont utilisées par d'autres technologies tel que le M2M (Machine-to-Machine) qui permet aux appareils de terrain de communiquer et d'interagir entre eux (Rüßmann 2015). 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. Grâce à l'Internet des objets, il est possible de surveiller le processus de transport des marchandises, des colis et des lettres (Witkowski 2017). Le suivi et le traçage sont devenus plus rapides, plus précis, plus prévisibles et plus sûrs. En cas de retard, les clients peuvent être informés en temps réel.

Simulation et Jumeaux numériques (SJn) : Les données en temps réel sont utilisées pour refléter le monde physique, dans un « jumeau numérique » (modèle virtuel), qui peut représenter des machines, des produits et des personnes (Rüßmann 2015). Ils peuvent être utilisés pour tester, simuler et optimiser l'organisation et, par exemple, réduire le temps entre une commande prélevée et son expédition (Tjahjono et al. 2017).

L'intelligence artificielle (IA) utilise des ordinateurs pour simuler l'intelligence naturelle afin d'interpréter des données externes, d'apprendre à partir de ces données et d'utiliser cet apprentissage pour une analyse descriptive, prédictive ou normative (Tang and Veelenurf 2019).

Dispositifs autonomes/Robots (Da/R) : Les récents progrès en matière de technologie des capteurs et d'intelligence artificielle permettent le développement d'une nouvelle génération de technologies robotiques pouvant être déployées aux côtés de travailleurs humains (Olsen and Tomlin 2020). Ces robots collaboratifs sont appelés « cobots ». Leur déploiement implique l'automatisation de tâches manuelles qui peuvent entraîner des troubles musculo-squelettiques (TMS). De plus, les exosquelettes peuvent aider les travailleurs à atténuer les blessures causées par le levage de lourdes charges dans l'entrepôt (Tang and Veelenurf 2019). De leur côté, les robots mobiles peuvent améliorer la productivité en amenant, par exemple, les produits directement aux employés pour le picking, l'emballage et l'expédition. De plus, les drones peuvent embarquer différents capteurs pour 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 des tâches plus précises que les humains et de manière répétée) ou de l'ergonomie en prévenant les TMS. (Olsen and Tomlin 2020).

Réalité Augmentée (RA) : les systèmes basés sur la réalité augmentée améliorent le monde physique grâce à des informations visuelles ou sensorielles générées numériquement. Ils permettent une variété de services, tels que la sélection de pièces dans un entrepôt, fournissant aux travailleurs des informations en temps réel pour améliorer la prise de décision et les procédures de travail (Rüßmann 2015).

Cybersécurité (Cyb) : De grandes quantités de données étant désormais disponibles via l'IdO, une entreprise

voudra stocker ces données de manière accessible, mais sécurisée. Une solution possible à ce problème de stockage est la blockchain. Il s'agit d'un registre de sécurité distribué. On peut y accéder et y écrire de n'importe où, ces données ne sont pas stockées dans un endroit central et, une fois qu'un bloc est ajouté à la chaîne, il ne peut plus être modifié (Olsen and Tomlin 2020).

Fabrication additive (FA) : également connu sous le nom d'impression 3D, il s'agit d'un processus qui prend une représentation numérique en 3D et produit l'objet physique correspondant (Olsen and Tomlin 2020). L'installation de machines 3D à proximité des entrepôts permettra d'imprimer rapidement à la demande une pièce requise, ce qui réduira les stocks et le transport (Rüßmann 2015). Cette technologie permet également de réduire les déchets tels que les emballages (Taniguchi, Thompson, and Yamada 2016). Elle peut également être utilisée pour produire de petits lots de produits personnalisés.

3.2 Le paradigme de l'Internet physique

Ce paradigme a été introduit pour la première fois par Benoit Montreuil (Benoit and Ballot 2014). L'objectif de l'Internet physique (IP) est de former un réseau logistique mondial ouvert, efficace, durable, résistant, adaptable et flexible, basé sur une interconnectivité physique, numérique et opérationnelle grâce à des normes, des interfaces et des protocoles standardisés au niveau mondial (Maslarić, Nikoličić, and Mirčetić 2016). L'IP exploite de nouveaux conteneurs modulaires (appelées PI conteneurs), ainsi que le développement de nouvelles interfaces de la chaîne logistique : centres logistiques équipés de nouvelles technologies de manutention et de stockage et les réseaux logistiques coopératifs. Les PI-conteneurs permettent d'encapsuler les marchandises dans des conteneurs mobiles verts « intelligents » de norme mondiale, avec des possibilités de communication entre eux en utilisant tous les avantages de l'IdO, ces caractéristiques « intelligentes » permettent d'utiliser pleinement les capacités de stockage et de transitique. Ces unités de charge peuvent se déplacer de manière optimale dans les réseaux logistiques grâce à leur capacité à communiquer entre elles et avec les ressources de transfert situées dans les plateformes logistiques (PI-hubs). De nombreuses études contribuent au développement des concepts associés à l'IP et promettent des solutions intéressantes dans un futur proche. Parmi celles-ci, certains développements concernant la livraison du dernier kilomètre ont été proposés, tels que des études de conception de réseaux de casiers intelligents utilisant des PI conteneurs qui démontrent que les conceptions modulaires peuvent fonctionner aussi bien que les conceptions à configuration fixe, tout en étant plus flexibles (Faugère and Montreuil 2017), (Faugère Louis and Montreuil 2018).

3.3 Nouvelle gestion des entrepôts urbains

Pour (Phuong 2020), les trois principales tendances technologiques pour la logistique du dernier kilomètre sont les données massives, l'Internet des objets et l'intelligence artificielle. Cela s'applique-t-il aux entrepôts urbains ?

Quelles méthodes et technologies de l'industrie 4.0 identifiées dans la partie 3.1 répondent aux problèmes identifiés dans la partie 2.2 ? Les concepts proposés dans le cadre de l'Internet physique peuvent-ils également être utiles ? La figure 2 combine les actions présentées dans la figure 1 avec les groupes technologiques de l'industrie 4.0 et la solution IP.

En effet, pour chaque facteur clé de réussite ont été identifiées les actions à mettre en œuvre. L'objectif du présent article est de montrer que chaque action peut s'appuyer sur les outils de l'industrie 4.0 ou de l'Internet physique. La figure 2 présente les outils favorisant la mise en place de chaque action. Un prochain article visera à décrire plus en détail, grâce à un état de l'art, l'adaptation de chaque outil aux problématiques des entrepôts urbains. Par la suite, les travaux viseront à proposer une méthodologie de gestion des entrepôts urbains via l'implantation des technologies appropriées aux enjeux du dernier kilomètre décrits précédemment.

4 CAS APPLICATIF

Au Vietnam, les prestataires de services postaux traditionnels tels que VN Post, EMS et Viettel Post ont rejoint le secteur des services de distribution rapide (Phuong 2020). De manière similaire, le Groupe La Poste a décidé d'utiliser son maillage national et son réseau de facteurs (plus de 80 000 en France) pour livrer des marchandises sur tout le territoire français. Ce réseau permet une livraison « instantanée » dans les villes, si elle est associée à des moyens logistiques efficaces. Le groupe la Poste a donc envisagé de tirer parti d'un autre de ses atouts, la disponibilité de mètres carrés dans les centres-villes pour créer des entrepôts urbains appelés « City hub » (zones de stockage et points de livraison rapide). La société envisage d'en ouvrir plus de 30 d'ici 2025. Un projet exploratoire a commencé à Paris par la rénovation d'un espace de 600 m², situé dans une zone de forte activité au cœur de la ville. Cet espace vise à créer un laboratoire expérimental afin de maintenir l'avance du Groupe La Poste sur le marché et tenir ses objectifs. L'entreprise doit être en mesure d'offrir les meilleurs services en matière de gestion des stocks, de préparation des commandes, de livraison et de gestion des retours. Ce lieu vise à expérimenter les méthodes et technologies de l'Industrie 4.0 en réponse aux problèmes de la logistique urbaine, et plus précisément au défi de la livraison du dernier kilomètre, afin de développer des entrepôts urbains optimisés. Il permettrait également d'examiner les avantages que le paradigme de l'Internet physique pourrait apporter. Le projet est mené en collaboration avec des start-up et des écoles partenaires afin de s'assurer que les technologies du futur sont maintenues à jour.

De premières offres sont déjà proposées sur cet espace :

- Stockage compensatoire, préparation de commande et expéditions dans des bacs consignés de pièces automobiles pour un client B2B avec plusieurs offres de livraison entre H+2 à J+1 ;
- Préparation de commandes personnalisée avec test des produits (smartphones) pour un client B2C.

Gestion de l'entrepôt	Actions	Groupes technologiques										IP		
		DM	CC	SCP	IdO	SIn	IA	Da/R	RA	Cyb	FA			
	Réduire la charge de travail du personnel et les processus inutiles			x		x	x	x						
	Optimiser le remplissage des stocks	x		x	x								x	x
	Gérer l'utilisation des biens consignés (logistique inverse)	x			x							x		x
	Partager les informations avec le client et le fournisseur		x		x							x		x
	Contrôler et localiser les objets, les marchandises et les conteneurs	x	x	x	x			x	x	x				x
	Livrer à temps				x			x						
	Éliminer les erreurs causées par l'enregistrement manuel				x			x		x				
	Gérer les priorités	x			x									
	Améliorer la coordination pour consolider les commandes	x			x									x
	Rendre l'identification efficace	x			x		x	x	x	x				
	Gérer les erreurs de sélection	x			x									
	Sécuriser les données confidentielles											x		
	Sécuriser les employés				x		x	x	x					
	Répondre à l'évolution des conditions et des incertitudes du marché	x				x		x						x
	Gérer l'expérience du client	x			x								x	
	Test du produit							x	x					
	Vérification de la qualité				x			x	x					

Figure 2 : Actions combinées aux groupes technologiques de l'Industrie 4.0

L'objectif est d'étudier et de tester des solutions sur des cas concrets tels que les offres présentées ci-dessus ou de développer des solutions afin de proposer de nouvelles offres. Tout d'abord, sur les offres existantes telle que pour les pièces automobiles, qui peuvent s'avérer très lourdes, l'utilisation de robots avancés telle que des exosquelettes pourrait être envisagée. De plus, la logistique inverse peut concerner les emballages réutilisables, ainsi que les marchandises endommagées ou les produits conçus pour être reconditionnés. La mise en œuvre de solutions de l'IdO et d'un système WMS basé sur le cloud doit être étudiée pour gérer ce flux.

Ensuite, la personnalisation d'une offre peut se faire à l'aide d'imprimantes 3D en créant des produits personnalisés. Cet outil pourrait également être utilisé pour réduire les niveaux de stock. De plus, la combinaison de l'IdO et des données massives pourrait permettre d'optimiser les stocks dans ces espaces restreints au sein des villes. Comme les offres de personnalisation se traduisent par des contrats courts, la planification de l'espace doit être flexible pour répondre rapidement aux changements de la demande, tant en termes de volume que de variété (Christopher 2000). Par exemple, la société a eu l'occasion en 2017 d'offrir un service personnalisé à la marque Adidas pour la distribution de chaussures de football haut

de gamme personnalisable. L'utilisation d'outils de simulation et les jumeaux numériques pourraient permettre de travailler sur des scénarios avant d'utiliser des robots mobiles pour exécuter les choix de manière fluide et optimisée.

La dernière solution que l'on peut évoquer est l'utilisation du concept de PI conteneurs issus de l'Internet Physique afin de créer un système de colisage adapté aux chariots de La Poste, le CE 30 (figure 3). Ce moyen est équipé d'un système de sécurisation des produits et d'un système de suivi et d'acheminement afin d'en assurer le suivi ainsi que l'optimisation de son parcours. De plus, c'est un outil adapté aux problèmes d'impact environnemental, il est composé de boîtes réutilisables.



Figure 3 : Chariot de La Poste

Tous les éléments cités restent des suggestions. Face à la complexité des travaux, des compromis devront être faits afin de répondre au mieux aux problèmes de ces installations logistiques. Le travail doit commencer par la formalisation des attentes et la hiérarchisation des enjeux, suivie d'une proposition d'outils et de méthodes, d'études de faisabilité puis de tests.

5 CONCLUSION

Dans cet article, il a été montré que, pour relever les défis de la livraison du dernier kilomètre, il pourrait être intéressant de développer de nouveaux entrepôts urbains. Pour répondre aux attentes des clients et aux problèmes de logistique d'une ville, l'utilisation des méthodes et technologies de l'Industrie 4.0, ainsi que des éléments du paradigme de l'Internet Physique, semble être une piste intéressante à suivre.

Cette étude n'étant qu'une première démarche dans l'exploration de solutions pour la gestion des entrepôts urbains, la prochaine étape sera axée sur la validation d'un état de l'art de la combinaison des problèmes de ces installations et des groupes technologiques de l'Industrie 4.0 susceptibles de les résoudre. D'autres recherches porteront sur la proposition de solutions pour aider les gestionnaires d'entrepôts urbains à optimiser leurs installations.

RÉFÉRENCES

- Benoit, Montreuil, and Eric Ballot. 2014. *L'Internet Physique : Le Réseau Des Réseaux Des Prestations Logistiques. Predit*. La Documentation Française.
- Berg, J. P. Van Den, and W. H. M. Zijm. 1999. "Models for Warehouse Management: Classification and Examples." *International Journal of Production Economics* 59(1): 519–28.
- Cerfa, Notes. 2018. *Transformation Numérique de l'Industrie : L'Enjeu Franco-Allemand*.
- Christopher, Martin. 2000. "The Agile Supply Chain." *Industrial Marketing Management* 29(1) : 37–44.
- Dablanc, Laetitia, and Dina Rakotonarivo. 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(3): 6087–96.
- Dolati Neghabadi, Parisa, Karine Evrard Samuel, and Marie Laure Espinouse. 2019. "Systematic Literature Review on City Logistics: Overview, Classification and Analysis." *International Journal of Production Research* 57(3): 865–87.
- Dopico, M. et al. 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*: 407–13.
- Duclos, Leslie K., Robert J. Vokurka, and Rhonda R. Lummus. 2003. "A Conceptual Model of Supply Chain Flexibility." *Industrial Management and Data Systems* 103(5–6): 446–56.
- Faugère, Louis, and Benoit Montreuil. 2017. "Hyperconnected Pickup & Delivery Locker Networks." *In Proceedings of the 4th International Physical Internet Conference* 6(July): 1–14.
- Faugère Louis, and Benoit Montreuil. 2018. "Smart Locker Bank Design Optimization for Urban Omnichannel Logistics: Assessing Monolithic vs. Modular Configurations." *Computers and Industrial Engineering* (xxxx): 1–14.
- Gevaers, Roel, Eddy Van de Voorde, and Thierry Vanelslander. 2009. "Characteristics of Innovations in Last Mile Logistics - Using Best Practices, Case Studies and Making the Link with Green and Sustainable Logistics." *Association for European Transport and contributors* (October): 1–8.
- Grundey, Dainora, and Kristina Rimienė. 2007. "Logistics Centre Concept through Evolution and Definition." *Engineering Economics* 54(4): 87–95.
- Higgins, C., M. Ferguson, and P. Kanaroglou. 2012. "Varieties of Logistics Centers." *Transportation Research Record* (2288) : 9–18.
- Hu, Wanjie et al. 2019. "A Scientometrics Review on City Logistics Literature: Research Trends, Advanced Theory and Practice." *Sustainability (Switzerland)* 11(10): 1–27.
- Juntao, Li. 2016. "Research on Internet of Things Technology Application Status in the Warehouse Operation." *International Journal of Science, Technology and Society* 4(4): 63.
- Kang, Sanggyun. 2020. "Relative Logistics Sprawl: Measuring Changes in the Relative Distribution from Warehouses to Logistics Businesses and the General Population." *Journal of Transport Geography* 83(August 2019): 102636.
- Lee, Jay, Behrad Bagheri, and Hung An Kao. 2015. "A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems." *Manufacturing Letters* 3 : 18–23.
- Maslarić, Marinko, Svetlana Nikoličić, and Dejan Mirčetić. 2016. "Logistics Response to the Industry 4.0: The Physical Internet." *Open Engineering* 6(1) : 511–17.
- Mentzer, John T et al. 2001. "DEFINING SUPPLYCHAIN MANAGEMENT." *Journal of Business* 22(2): 1–25.
- Olsen, Tava Lennon, and Brian Tomlin. 2020. "Industry 4.0: Opportunities and Challenges for Operations Management." *Manufacturing and Service Operations Management* 22(1) : 113–22.
- Pan, Shenle, Eric Ballot, George Q. Huang, and Benoit Montreuil. 2017. "Physical Internet and Interconnected Logistics Services: Research and Applications." *International Journal of Production Research* 55(9): 2603–9.
- Phuong, D T. 2020. "Last-Mile Logistics in Vietnam in Industrial Revolution 4 . 0: Opportunities and Challenges." 115(Insyma): 172–76.
- Rüßmann, Michael ; et al. 2015. "Industry 4.0: Future of Productivity and Growth in Manufacturing."

Boston Consulting (April).

- Shiau, Jiun Yan, and Ming Chang Lee. 2010. "A Warehouse Management System with Sequential Picking for Multi-Container Deliveries." *Computers and Industrial Engineering* 58(3): 382–92.
- Tang, Christopher S., and Lucas P. Veelenturf. 2019. "The Strategic Role of Logistics in the Industry 4.0 Era." *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review* 129(July): 1–11.
- Taniguchi, Eiichi, Russell G. Thompson, and Tadashi Yamada. 2016. "New Opportunities and Challenges for City Logistics." *Transportation Research Procedia* 12(June 2015): 5–13.
- Tjahjono, B., C. Esplugues, E. Ares, and G. Pelaez. 2017. "What Does Industry 4.0 Mean to Supply Chain?" *Procedia Manufacturing* 13 : 1175–82.
- Witkowski, Krzysztof. 2017. "Internet of Things, Big Data, Industry 4.0 - Innovative Solutions in Logistics and Supply Chains Management." *Procedia Engineering* 182: 763–69.
- Yavas, Volkan, and Yesim Deniz Ozkan-Ozen. 2020. "Logistics Centers in the New Industrial Era: A Proposed Framework for Logistics Center 4.0." *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review* 135(September 2019): 101864.