

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

INTÉGRATION DE DONNÉES CONTEXTUELLES À UN JUMEAU NUMÉRIQUE
PERMETTANT D'OPTIMISER LE POSITIONNEMENT DE L'INVENTAIRE

MARIE-JANE BÉLANGER

Département de Génie Industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie Industriel

Décembre 2022

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

INTÉGRATION DE DONNÉES CONTEXTUELLES À UN JUMEAU NUMÉRIQUE
PERMETTANT D'OPTIMISER LE POSITIONNEMENT DE L'INVENTAIRE

présenté par Marie-Jane BÉLANGER :

en vue de l'obtention du diplôme de : *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

[Tapez (M. ou Mme)] [Tapez NOM et prénom], président

M. Robert PELLERIN, membre et directeur de recherche

M. Samir LAMOURI, membre et codirecteur de recherche

[Tapez (M. ou Mme)] [Tapez NOM et prénom], membre

DÉDICACE

À mom et pops!

REMERCIEMENTS

[Tapez ici vos remerciements, s'il y a lieu.]

RÉSUMÉ

[Tapez ici votre résumé en français.]

ABSTRACT

[Tapez ici votre résumé en anglais.]

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES FIGURES.....	X
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XI
LISTE DES ANNEXES	XII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	3
2.1 Introduction	3
2.2 Présentation des concepts.....	3
2.2.1 Description générale.....	3
2.2.2 Utilité.....	4
2.2.3 Données requises	5
2.2.4 Capacités	6
2.3 Stratégie de recherche de la revue	12
2.4 Analyse de la littérature.....	14
2.4.1 Description générale.....	14
2.4.2 Utilité.....	16
2.4.3 Données requises	17
2.4.4 Capacités	18

2.5	Analyse critique.....	20
2.6	Conclusion.....	23
CHAPITRE 3	MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE.....	24
3.1	[Tapez le titre de la sous-section]	24
3.1.1	[Tapez le titre de la sous-section]	24
CHAPITRE 4	[TAPEZ LE TITRE]	25
4.1	[Tapez le titre de la sous-section]	25
CHAPITRE 5	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	26
BIBLIOGRAPHIE	27
ANNEXES	31

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Classification des paramètres (adapté de Jones et al., 2020)	5
Tableau 2.2 : Sources des paramètres (adapté de Kaiblinger & Woschank, 2022)	5
Tableau 2.3 : Éléments du <i>context-awareness</i> (adapté d'Hribernik et al., 2021)	7
Tableau 2.4 : Classification des données contextuelles (adapté de Rosenberger & Gerhard, 2018)	8
Tableau 2.5 : Analyse de la pertinence des approches (adapté de Strang & Linnhoff-Popien, 2004)	9
Tableau 2.6 : Éléments d'autonomie (adapté d'Hribernik et al., 2021).....	11
Tableau 2.7 : Éléments d'adaptabilité (adapté d'Hribernik et al., 2021)	12
Tableau 2.8: Mots-clés de la revue de littérature	12
Tableau 2.9: Publications retenues	14
Tableau 2.10 : Classification générale des articles	15
Tableau 2.11 : Utilité des jumeaux numériques	17
Tableau 2.12 : Informations sur les données	18
Tableau 2.13 : Analyse des opportunités liées au context-awareness.....	19
Tableau 2.14 : Analyse des opportunités liées à l'autonomie	19
Tableau 2.15 : Analyse des opportunités liées à l'adaptabilité	20
Tableau 2.16 : Écarts de recherche liés aux généralités (adapté d'Hribernik et al., 2021).....	21
Tableau 2.17 : Écarts de recherche liés au context-awareness (adapté d'Hribernik et al., 2021)...	21
Tableau 2.18 : Écarts de recherche liés à l'autonomie (adapté d'Hribernik et al., 2021).....	21
Tableau 2.19 : Écarts de recherche liés à l'adaptabilité (adapté d'Hribernik et al., 2021)	22
Tableau 2.20 : Analyse des écarts	23

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Modèle, ombre et jumeau numérique (adapté de Fuller et al., 2020)	4
Figure 2.2 : Classification des données contextuelles (adapté d'Alexopoulos et al., 2016)	8
Figure 2.3 : Architecture du système de traitement et de distribution de l'IC (adapté d'Alexopoulos et al., 2016)	10
Figure 2.4 : Méthodologie de recherche	13
Figure 2.5 : Modèle de contexte (adapté de Sahlab et al., 2021)	23

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AGV	Automated Guided Vehicule
ASC	Automated Stacking Cane
BIM	Building Information Modelling
CPS	Cyber Physical System
HMS	Holonic Manufacturing System
IC	Information contextuelle
IdO	Internet des objets
IMU	Inertial Motion capture Units
JN	Jumeau Numérique
MAS	Multi-Agent Systems
MES	Manufacturing Execution System
OFR	Order Fulfillment and Replenishment
PI	Physical Internet
RH	Resource Humaine
RV	Réalité Virtuelle
SKU	Stock Keeping Unit
TIS	Total Inbound Synchronization
UML	Unified Modelling Language
VV&A	Vérification, Validation et Accréditation
WMS	Warehouse Management System
3PL	Third-Party Logistics

LISTE DES ANNEXES

Dans Word 2007-2013 : Dans l'onglet Références, dans Légendes, choisir « Insérer une table des illustrations » une fois vos figures insérées. Dans le menu déroulant « Légende », sélectionner « Annexe ».

Annexe A - Titre de la première annexe	31
Annexe B - Titre de la deuxième annexe	32

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Plusieurs entreprises manufacturières cherchent à accroître l'efficacité de leur processus d'entreposage. Cela s'explique principalement par le coût élevé des opérations d'entreposage qui peut représenter 40% du coût total de la production (Leng et al., 2019). L'entreposage comprend principalement six types d'opérations soit la réception, le stockage, le ramassage, le triage, l'emballage et l'expédition (Baruffaldi et al., 2019). L'opération qui consiste à retrouver les produits de l'entrepôt afin de compléter une commande client est le ramassage. Il s'agit de l'opération la plus coûteuse du processus (De Koster et al., 2007) et équivaut entre 60 à 70% des coûts d'entreposage (Chen, T.-L. et al., 2015). Ainsi, la réduction du temps de ramassage permettrait aux entreprises d'en retirer un gain financier. Pour y parvenir, l'utilisation d'une stratégie de positionnement de l'inventaire s'avère fort utile. En fait, une stratégie de positionnement adéquate permet d'accélérer non seulement le ramassage, mais également le dépôt des produits dans l'entrepôt (Bertolini, Mezzogori, et al., 2019).

Définir une stratégie appropriée pour positionner l'inventaire lors du stockage peut être complexe. Entre autres, plusieurs facteurs doivent être considérés pour l'affectation des stocks tels que la taille et la disposition du système de stockage, le système de manutention utilisé ainsi que la méthode de préparation des commandes (Chan & Chan, 2011). La variabilité des caractéristiques des produits et leurs besoins en espace viennent également complexifier le positionnement de l'inventaire en plus d'impacter les conditions requises lors de l'entreposage (Chan & Chan, 2011). Bien entendu, la saisonnalité de la demande et le taux de roulement d'un produit impactent la performance d'un entrepôt en ce qui concerne les opérations de stockage et de ramassage (Accorsi et al., 2018). De plus, dans la majorité des entreprises, le positionnement de l'inventaire se fait manuellement et les employés ne disposent d'aucun protocole formel. Toutefois, l'imprévisibilité des exigences et des interactions liées au processus d'entreposage implique qu'un nombre important de décisions soit prises et soit régulièrement révisées (Alvarez et al., 2001; Kauke et al., 2021). Malgré la grande complexité des systèmes de préparation des commandes, la prise de décision est variable et dynamique ce qui rend impossible d'estimer les conséquences des décisions humaines (Kauke et al., 2021). Somme toute, plusieurs paramètres doivent être pris en considération lors du positionnement de l'inventaire. Cependant, aucune information n'est mentionnée dans la littérature sur la fréquence à laquelle un paramètre doit être investigué (Kauke et al., 2021).

Il est évident que ce processus n'est pas optimal d'où l'intérêt de créer un environnement qui permettra de contrôler les facteurs pertinents à l'entrepotage. Les technologies de l'Industrie 4.0 offrent plusieurs solutions pour pallier ses difficultés. Concrètement, « l'Industrie 4.0 est une stratégie qui s'appuie sur le numérique et la connectivité ubiquitaire, grâce à différentes technologies, afin de transformer les processus, les produits et les services par une prise de décision en temps réel et décentralisée permettant l'apparition de nouvelles capacités pour les systèmes, en coopération avec les humains, pour aller de la surveillance à l'autonomie » (Danjou et al., 2017). Notamment, la technologie du jumeau numérique (JN) est un concept de l'Industrie 4.0 qui est relativement nouveau. Brièvement, un JN correspond à une représentation virtuelle en temps réel d'un système physique qui aide à l'optimisation de ce système (Qi et al., 2018; Tao & Zhang, 2017). Il s'agit d'un domaine de recherche en forte demande en raison du potentiel considérable pour le secteur manufacturier. Le suivi en temps réel, la prise de décisions ainsi que l'optimisation et l'évaluation du processus sont quelques exemples d'applications des JNs (Liu et al., 2021).

Ce projet de recherche s'attaque à cette problématique en cherchant à améliorer la prise de décision pour l'entrepotage grâce à la technologie de JN. Pour atteindre cet objectif, ce travail sera mené en quatre parties. D'abord, une revue de littérature portant sur les JNs et l'entrepotage permettra de faire ressortir les opportunités de recherche. Ensuite, les objectifs spécifiques de ce mémoire et la méthodologie de recherche seront présentés. Par la suite, notre modèle de conception de JN en entrepotage sera exposé au chapitre 4. Le chapitre suivant présentera nos résultats expérimentaux. Finalement, des recommandations seront émises dans la conclusion.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Cette revue de littérature se décompose en quatre parties. La première partie explique le concept de JN de façon générique avant d'aborder ses utilisations possibles, les données requises et ses niveaux de capacité. Deuxièmement, une stratégie de recherche littéraire portant sur les JNs en entreposage est présentée. Les travaux scientifiques résultant de cette stratégie sont ensuite analysés dans la troisième partie. L'analyse est effectuée en fonction des mêmes angles qu'abordés lors de la présentation du concept de JN. Finalement, la quatrième partie critique les travaux selon les points clés identifiés dans l'état de l'art mené par Hribernik et al. (2021). Il est important de préciser que cet article est le point central de cette revue de littérature.

2.2 Présentation des concepts

2.2.1 Description générale

De façon générale, un JN peut être défini comme une représentation virtuelle complète et dynamique d'un système physique ou d'un processus (Julien & Martin, 2021). Pour préciser davantage ce concept, Hribernik et al. (2021) ont identifié les composantes principales d'un JN : l'état du système (données et représentation de l'état réel), le design du système (paramètres, informations et modèles statiques) et le comportement du système (modèles décrivant le comportement de leur homologue physique, analyse, simulation et prédiction). Toutefois, il n'existe pas de définition formelle dans la littérature ce qui entraîne une confusion au niveau de la maturité du JN (Fuller et al., 2020). Tel que représenté par la figure 2.1, les trois niveaux de maturité se distinguent principalement par le flux de données circulant entre le système physique et le modèle virtuel.

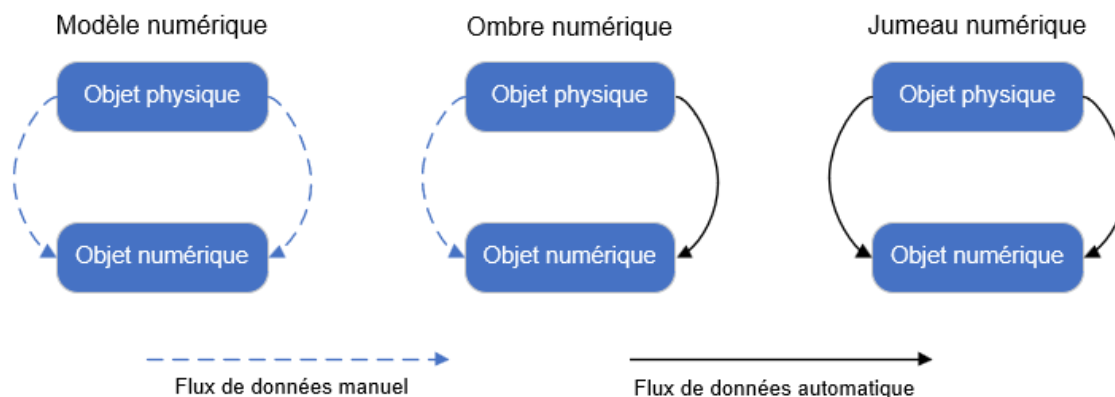


Figure 2.1 : Modèle, ombre et jumeau numérique (adapté de Fuller et al., 2020)

Le modèle numérique est une réplique statique d'un système physique. Ce niveau se caractérise par un échange manuel de données entre le système physique et le modèle virtuel. Le deuxième niveau est une ombre numérique. Le flux de données unidirectionnel du système physique vers le modèle virtuel permet de représenter le comportement exact du système physique. Quant au JN, un échange bidirectionnel complet et automatique des données est possible entre les deux entités. Cela implique qu'une modification du système physique entraînera le changement du modèle virtuel et vice versa (Fuller et al., 2020).

Une autre propriété caractérisant le JN est le niveau de fidélité du modèle virtuel à répliquer avec précision l'entité physique (Jones et al., 2020). En fait, un niveau élevé signifie que les entités physique et virtuelles sont parfaitement alignées permettant ainsi d'obtenir une simulation de même qu'une optimisation plus précises (Jones et al., 2020). La confiance à l'égard des résultats s'en voit alors améliorée. Pour s'assurer d'un niveau élevé de fidélité, la vérification, validation et accréditation (VV&A) du modèle peut être effectuée (Tao et al., 2019). Plus spécifiquement, la VV&A du modèle, qui inclut des méthodes statistiques et dynamiques, permet « d'analyser si et dans quelle mesure, l'exactitude, la tolérance, la disponibilité et le résultat de fonctionnement répondent aux exigences » (Qi et al., 2021). Bref, la validation du modèle est essentielle pour dégager des conclusions avec confiance.

2.2.2 Utilité

La seconde perspective abordée du JN est son utilité. Tel que mentionné en introduction, un JN peut être utilisé dans plusieurs cas d'application répondant à des besoins différents. Un JN est utilisé principalement pour trois raisons, soit exécuter des simulations, faire des prévisions et/ou

prendre des décisions qui impacteront l'entité physique concernée (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Il n'est pas nécessaire pour un JN de simuler tous les aspects du système physique. En fait, l'utilisation prévue du JN doit déterminer les aspects importants du système physique à simuler (Zhang et al., 2021). L'utilité du JN impacte donc également le processus de collecte de données ce qui sera abordé à la prochaine section (VanDerHorn & Mahadevan, 2021).

2.2.3 Données requises

Selon la définition d'un JN, plusieurs données provenant de l'entité physique, aussi appelées entrée (*input*), doivent être transmises au modèle virtuel. En effet, répliquer virtuellement un système physique est généralement une tâche très complexe qui exige une quantité massive de données (Semeraro et al., 2021). L'utilisation prévue d'un JN impacte également les données nécessaires pour la modélisation. La littérature propose tout de même quelques méthodes pour décrire l'information requise. Notamment, Jones et al. (2020) ont parvenu à classifier les données nécessaires en 10 types de paramètres d'entrée (voir tableau 2.1). Quant à Kaiblinger et Woschank (2022), ils proposent de caractériser les données en fonction de leurs provenances (voir tableau 2.2). Ces deux méthodes de regroupement seront utilisées dans la section 2.4.3 pour analyser les données utilisées dans les JNs pour l'entreposage.

Tableau 2.1 : Classification des paramètres (adapté de Jones et al., 2020)

Types	Description
Forme	Structure géométrique de l'entité
Fonctionnalité	Le mouvement et/ou le but de l'entité
Santé	État réel de l'entité par rapport à son état idéal
Localisation	Position géographique de l'entité
Processus	Les activités dans lesquelles l'entité est engagée
Temps	Il s'agit à la fois du temps nécessaire à l'achèvement d'une activité et de la date/heure à laquelle une activité a lieu
État	État actuel mesuré de tous les paramètres de l'entité et de l'environnement
Performance	Le fonctionnement mesuré de l'entité par rapport à son fonctionnement optimal
Environnement	L'environnement physique et virtuel dans lequel l'entité existe
Divers qualitatif	Informations qualitatives et donc généralement non mesurables par les capteurs traditionnels de l'Internet des objets

Tableau 2.2 : Sources des paramètres (adapté de Kaiblinger & Woschank, 2022)

Sources	Description
Données historiques	Données stockées
Données de l'espace physique	Attributs statiques et données de condition dynamique
Données des services fournis	Données recueillies lors de l'exécution des services
Données du modèle virtuel	Résultats de simulation
Connaissances d'expert	Experts d'un domaine
Données prétraitées	Données ayant été nettoyées, fusionnées et interprétées

D'autre part, bien que l'interconnexion entre l'espace physique et virtuel soit nécessaire, la synchronisation des données est d'autant plus importante. Ceci réfère à la fréquence à laquelle les informations sont échangées entre eux. Bien sûr, un JN capable de mises à jour en temps réel est idéal puisque cela permet aux entités d'agir de manière presque synchrone (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). À noter qu'une telle fréquence de synchronisation n'est pas nécessaire pour la plupart des cas d'utilisation. En plus, cela vient alourdir la charge de traitement des données (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Cependant, les auteurs ne précisent pas la fréquence de synchronisation adéquate selon la donnée ni le cas d'application. Puisque la précision des données impacte la fidélité du modèle, cet élément sera abordé lors de l'analyse critique de la section 2.4.3.

D'autre part, la qualité des données représente un défi considérable lors de l'implantation d'un JN. Pourtant, ce facteur est déterminant à son bon fonctionnement. Concrètement, les enjeux pour les entreprises sont les suivants : « incertitudes quant à la qualité et à la fiabilité des données; difficulté à assurer la validité des données; difficulté à assurer la gouvernance, la propriété et la gestion des données; impossibilité de mesurer directement toutes les données pertinentes pour le JN » (Perno et al., 2022). Les articles de la revue de littérature seront analysés sous cet angle afin d'appuyer la recherche en ce sens.

2.2.4 Capacités

Les trois propriétés principales d'un JN sont la prise en compte du contexte (*context-awareness*), l'autonomie et l'adaptabilité (Hribernik et al., 2021). Chacune de ses propriétés procure de nouvelles fonctionnalités lors de l'exploitation d'un JN. En fait, l'état de l'art mené par Hribernik et al. (2021) fait ressortir non seulement la pertinence d'intégrer ses capacités à un JN, mais également les défis lors de l'implantation. Cette section vise à définir ces 3 propriétés et leurs utilités pour un JN. Celles-ci ont été regroupées selon les 3 composantes d'un JN (état, design, comportement) abordées dans la section 2.2.1. Les éléments des tableaux 2.3 à 2.5 seront également repris pour la section 2.4.4.

2.2.4.1 *Context-awareness*

D'abord, Alexopoulos et al. (2016) définissent le contexte comme étant « toute information permettant de caractériser la situation d'une entité ». L'inclusion des données du contexte, en plus des données intrinsèques au processus simulé, est un atout considérable pour l'exploitation d'un

JN. Cette capacité permet entre autres de personnaliser le comportement du système en fonction du contexte spécifique dans lequel il s'exécute afin de le rendre plus efficace ou plus pertinent (Hribernik et al., 2021). La pertinence de modéliser le contexte, au niveau de l'état du système, est d'organiser les ICs en définissant par exemple les types de contexte pertinents, les relations et les dépendances entre les ICs (Hribernik et al., 2021). Pour ce qui est des fonctionnalités liées au composant du design du système, le JN doit être capable de comprendre le contexte pour le refléter correctement dans ses modèles de conception et sa configuration (Hribernik et al., 2021). En rapport avec le troisième composant du JN, celui-ci doit incorporer des modèles de contexte, de tâches, de processus, d'objectifs et d'opérations (Hribernik et al., 2021). Le tableau 2.3 regroupe les fonctionnalités qu'offre la prise en compte du contexte au JN.

Tableau 2.3 : Éléments du *context-awareness* (adapté d'Hribernik et al., 2021)

Opportunités – Context-Awareness		
État du système	Identifier les contextes pertinents	O1
	Traiter les IC	O2
	Incorporer les IC	O3
	Fournir des IC	O4
	Sélection de sources de données tenant compte du contexte	O5
	Inclure des sources de données tierces	O6
Design du système	Configuration des contreparties physiques en fonction du contexte	O7
	Comprendre le contexte et le refléter dans les modèles de conception	O8
	Soutenir l'adaptabilité de la conception et de la configuration	O9
Comportement du système	Intégrer des modèles de contexte riches	O10
	Inclure des modèles de contexte physique, logique et externe	O11
	Inclure des modèles de tâches, d'objectifs et d'opérations	O12

La prise en compte du contexte dans un JN est un élément d'intérêt pour la communauté scientifique. Ainsi, une classification des données contextuelles peut être effectuée de différentes manières. La première approche présentée est celle proposée par Alexopoulos et al. (2016) (voir figure 2.2). Essentiellement, cette approche classe en deux groupes (externes ou internes) les données du contexte. Les données externes forment trois entités et chacune peut être décrite par des attributs variés.

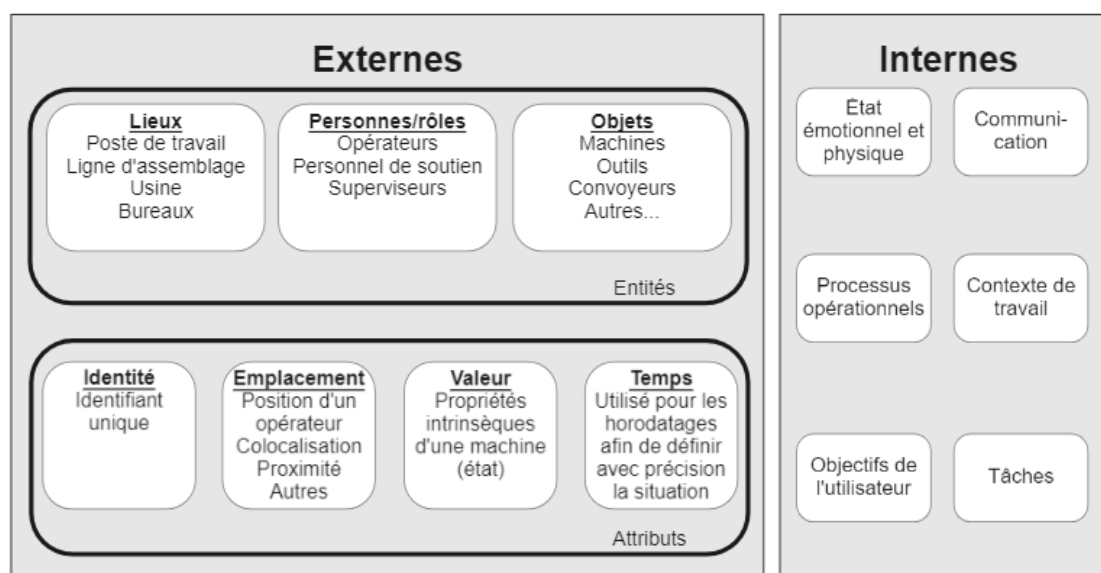


Figure 2.2 : Classification des données contextuelles (adapté d'Alexopoulos et al., 2016)

Néanmoins, les cas industriels bénéficieraient davantage d'une classification plus spécifique comme celle proposée par Rosenberger et Gerhard (2018) (voir tableau 2.4). Les auteurs décrivent de façon approfondie chaque type de contexte (information personnelle, condition personnelle, localisation, ...) et leurs caractéristiques.

Tableau 2.4 : Classification des données contextuelles (adapté de Rosenberger & Gerhard, 2018)

Catégorie contextuelle	Type de contexte	Source des données	Type de base	Durabilité	Changement	Utilisation
Usager	Information personnelle	Externe	Physique	Statique	-	Élevé
	Condition personnelle	Capteur	Physique	Dynamique	Continu	Faible
	Localisation	Capteur	Physique	Dynamique	Continu	Élevé
	Tâche	Externe	Virtuel	Dynamique	Immédiat	Élevé
Environnement	Date et heure	Interne	Virtuel	Dynamique	Continu	Élevé
	Ressource	Externe	Physique	Dépendant	Continu	Moyen
	État des ressources	Capteur	Physique	Dynamique	Dépendant	Moyen
	Condition physique	Capteur	Physique	Dynamique	Dépendant	Moyen
Système	Logiciel	Interne	Virtuel	Dépendant	Immédiat	Faible
	Appareil	Interne et externe	Dépendant	Dépendant	Dépendant	Faible
	Réseau	Interne	Dépendant	Dépendant	Dépendant	Faible
	Serveur	Interne	Dépendant	Dépendant	Dépendant	Faible
Récupération d'information	Contenu	Interne	Virtuel	Dynamique	Immédiat	Moyen
	Recherche	Interne	Virtuel	Dynamique	Immédiat	Moyen
Reconnaissance de forme	Donnée historique	Interne	Virtuel	Statique	-	Moyen
	Forme	Interne	Virtuel	Dynamique	Immédiat	Moyen

Après la classification des données du contexte, il est nécessaire de les modéliser. Pour ce faire, l'article de Strang et Linnhoff-Popien (2004) précise les 6 approches de modélisation les plus pertinentes. Le tableau 2.5 présente les résultats de leur analyse. En résumé, le modèle orienté objet et le modèle ontologique répondent le mieux aux critères suivants : l'ajout d'IC peut être traité de manière distribuée (d) dans le système; la validation (v) est possible; la qualité de l'information

(qua) est assurée; l'ambiguïté (am) des données est gérée correctement; une compréhension partagée des données (com) est possible entre les entités; l'applicabilité (app) à différents environnements est atteinte (Strang & Linnhoff-Popien, 2004).

Tableau 2.5 : Analyse de la pertinence des approches (adapté de Strang & Linnhoff-Popien, 2004)

Approches	Critères					
	d	v	qua	am	com	app
Modèle de valeurs-clés	-	-	Ø	Ø	Ø	+
Modèle de balisage de schéma	+	++	-	-	+	++
Modèle graphique (UML)	Ø	-	+	-	+	+
Modèle orienté objet	++	+	+	+	+	+
Modèle basé sur la logique	++	-	-	-	++	Ø
Modèle ontologique	++	++	+	+	+++	+

D'un point de vue plus général, une modélisation des facteurs d'influence externes intégrée au JN permet une meilleure compréhension du fonctionnement de l'entité physique (Sahlab et al., 2021). Autrement dit, la prise en compte du contexte permet d'améliorer la gestion de l'atelier en fournissant les bonnes informations, aux bonnes personnes, au bon moment (Alexopoulos et al., 2016). Ainsi, afin d'accroître la visibilité et la connaissance du contexte dans un environnement de fabrication, Alexopoulos et al. (2016) propose une architecture basée sur le cloud computing pour le traitement et la distribution des ICs (voir figure 2.3). Ces auteurs ont soit dit en passant utilisé un modèle ontologique pour la modélisation du contexte. Pour les besoins du projet, uniquement les deux couches d'intérêt, soit la couche d'agrégation et la couche de sensibilisation au contexte, seront décrites. Commençons par énumérer les modules de la première couche mentionnée ainsi que leurs rôles (Alexopoulos et al., 2016) :

- Traitement d'événements complexe : Construire des événements complexes à partir d'événements simples et déclencher des alertes lorsque des situations critiques se produisent.
- Moteur de contexte : Construire et mettre à jour des données contextuelles.
- Constructeur de contexte : Identifier tout changement dans le contexte et mettre à jour le référentiel de contexte.
- Serveur de contexte : Accéder aux données contextuelles et fournir une fonctionnalité d'écoute/notification afin que les services et applications clients soient informés lors de changement dans les données contextuelles.

- Accès aux données : Héberger une base de données contenant les informations pertinentes.

En ce qui concerne la couche de sensibilisation au contexte, elle remplit trois principaux objectifs qui sont de « traiter les demandes de services provenant des applications », « d’informer les applications de tout changement dans le contexte de fabrication » ainsi que de « fournir aux applications des alertes et des notifications » (Alexopoulos et al., 2016).

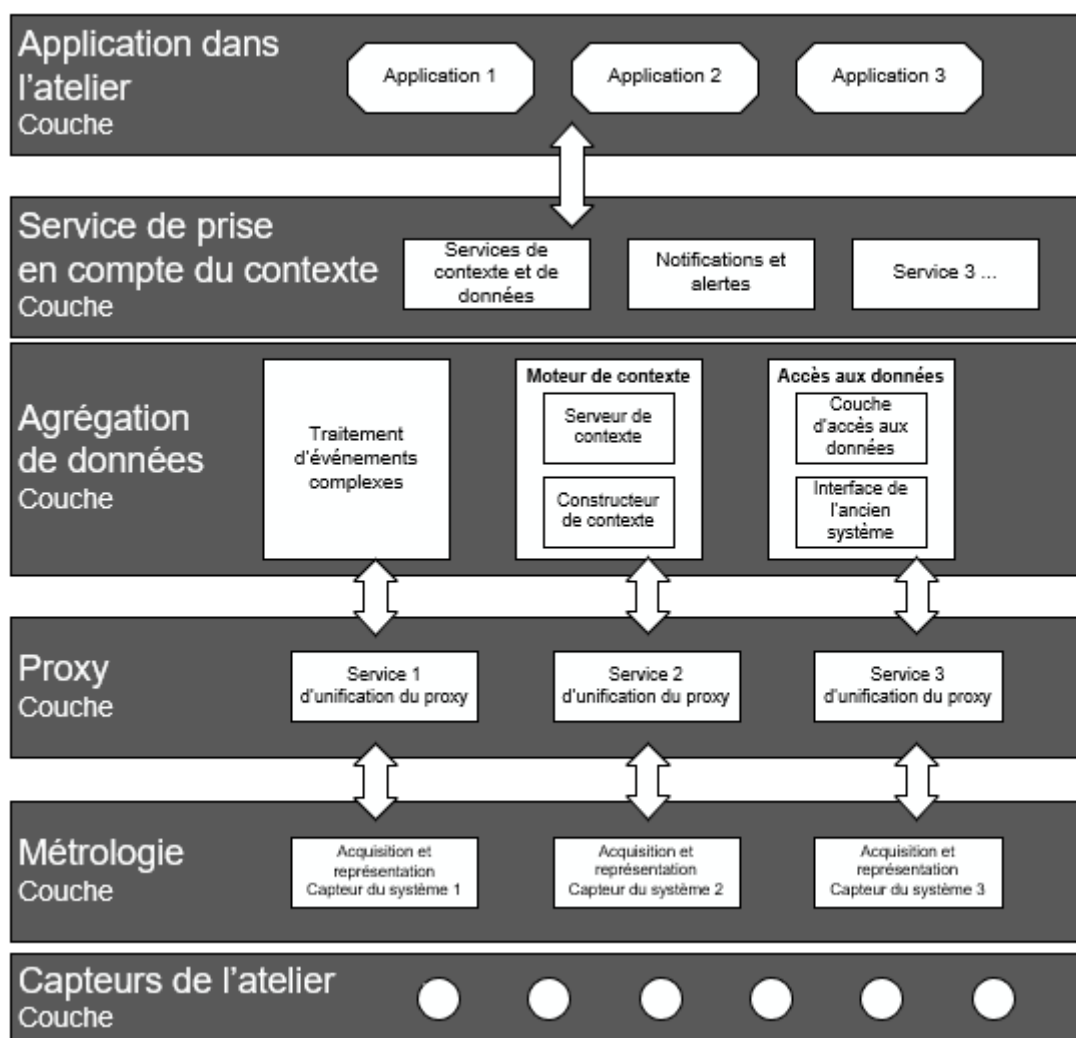


Figure 2.3 : Architecture du système de traitement et de distribution de l'IC (adapté d'Alexopoulos et al., 2016)

2.2.4.2 Autonomie

L'autonomie peut être définie comme « la capacité d'agir avec un certain degré d'indépendance et d'assumer la responsabilité de ses propres ressources et de son comportement » (Steiner, 2008). Plusieurs avantages découlent de cette capacité lors de l'exploitation du JN (voir tableau 2.6). En

résumé, le composant d'état du système permet de relier les entités physique et virtuelle ce qui correspond à la condition requise pour réaliser des entités autonomes (Hribernik et al., 2021). Quant au design du système, les JNs pourraient prendre des décisions de manière autonome à l'égard de la conception et de la configuration de l'entité (Klein et al., 2019). En ce qui concerne le composant du comportement, celui-ci procure au JN des capacités avancées de simulation et d'analyse. Un système alimenté par des données en temps réel jumelé à une sensibilisation au contexte augmente la précision des prédictions permettant ainsi d'améliorer la prise de décision autonome (Rosen et al., 2015).

Tableau 2.6 : Éléments d'autonomie (adapté d'Hribernik et al., 2021)

Opportunités – Autonomie		
État du système	Soutien contextuel pour le contrôle autonome	O13
	Contrôle autonome	O14
	Entités autonomes en réseau	O15
Design du système	Boucle de rétroaction vers la conception	O16
	Boucle de rétroaction vers la configuration	O17
	Boucle de rétroaction vers la maintenance	O18
Comportement du système	Simulations avancées et multi-modèles pour la prise de décision autonome	O19
	Sélection, intégration et exécution autonomes et adaptées au contexte	O20

2.2.4.3 Adaptabilité

Enfin, l'adaptabilité est la capacité de modifier le comportement d'une entité lors d'imprévus pour atteindre un objectif (Hribernik et al., 2021). Cette capacité offre plusieurs fonctionnalités au JN (voir tableau 2.7). Notamment, l'une d'elles est l'optimisation et la modification des paramètres de contrôle de l'entité physique en fonction de la connaissance de son état actuel (Tao et al., 2019). En ce qui concerne le design du système, « il peut être nécessaire de modifier la configuration de la contrepartie physique et, par conséquent, son JN en fonction du contexte, ce qui oblige le JN à sélectionner, modifier et configurer les modèles de manière appropriée en fonction de la situation qu'ils représentent chaque fois que des changements se produisent » (Hribernik et al., 2021). Au niveau du comportement, l'apprentissage automatique peut être utilisé par le JN pour ajuster le comportement du système (Madni et al., 2019).

Tableau 2.7 : Éléments d'adaptabilité (adapté d'Hribernik et al., 2021)

Opportunités – Adaptabilité		
État du système	Adaptation des sources de données en fonction du contexte	O21
	Adaptabilité des paramètres de contrôle	O22
	Adaptabilité de la configuration de contrôle	O23
Design du système	Modèles adaptatifs de systèmes complexes	O24
	Adaptabilité des modèles de conception et de configuration	O25
Comportement du système	Ajustement et optimisation des systèmes en temps réel	O26
	Adaptabilité des modèles en fonction du contexte	O27
	Adaptabilité des modèles de comportement en fonction du contexte	O28
	Modèles auto-conscients et auto-modifiants	O29

2.3 Stratégie de recherche de la revue

Afin d'obtenir un portrait actuel de l'état des connaissances scientifiques sur les JNs en entreposage, une revue de littérature systématique a été menée dans la base de données Scopus. Cette revue a également été l'occasion de faire le lien entre les fonctionnalités proposées par Hribernik et al. (2021) et celles dont disposent les JNs pour des opérations d'entreposage. Bien évidemment, ce projet de recherche comprend les deux concepts clés suivants : JN (technologie) et entreposage (domaine d'application). Des mots-clés ont été identifiés pour chacun de ces concepts (voir tableau 2.8).

Tableau 2.8: Mots-clés de la revue de littérature

Concepts	Jumeau Numérique	Entreposage
Mots clés	"digital twin"	warehous* "material handling" stor*

La requête suivante a donc été construite pour mener la recherche dans Scopus :

Requête: TITLE-ABS-KEY-AUTH(("Digital Twin") AND (stor OR "material handling" OR warehous*)) AND LANGUAGE(english) AND (EXCLUDE(SUBJAREA, "ENER")) AND (EXCLUDE(SUBJAREA, "BIOC"))*

Bien entendu, des critères d'inclusions et d'exclusions, tels que la langue et le domaine d'application, ont été appliqués lors de la recherche afin de trier les articles ressortis. Notamment, les publications appliquées au domaine de l'énergie, de la biochimie et de la biologie moléculaire ont été exclues. Aussi, uniquement les publications écrites en anglais ont été retenues. Ceci a permis de réduire le nombre de publications de 467 à 357 résultats dans la base de données Scopus. Une lecture des titres et résumés a permis d'exclure 332 publications diminuant le nombre de résultats

à 25. En fait, cette étape a permis d'éliminer les publications qui ne correspondent pas à la portée de la recherche. Ensuite, les publications utilisant le concept de jumeau numérique uniquement comme mot-clé, exemple de fait ou expression citée ont pu être exclues grâce à la lecture complète des articles. Ainsi, en suivant la stratégie de recherche présentée à la figure 2.4, 19 publications ont été retenues pour l'analyse (voir tableau 2.9). Parmi celles-ci, il y a 13 articles de revue académique, 5 articles de conférence et 1 chapitre de livre. Ces publications font ressortir plusieurs résultats intéressants. Notamment, Gao et al. (2022) montre qu'un jumeau numérique d'un d'entrepôt automatisé aide les opérateurs à prendre des décisions d'optimisation. En plus, un système de préparation des commandes est l'un des cas d'application qui peut grandement bénéficier du potentiel d'un jumeau numérique (Kauke et al., 2021)

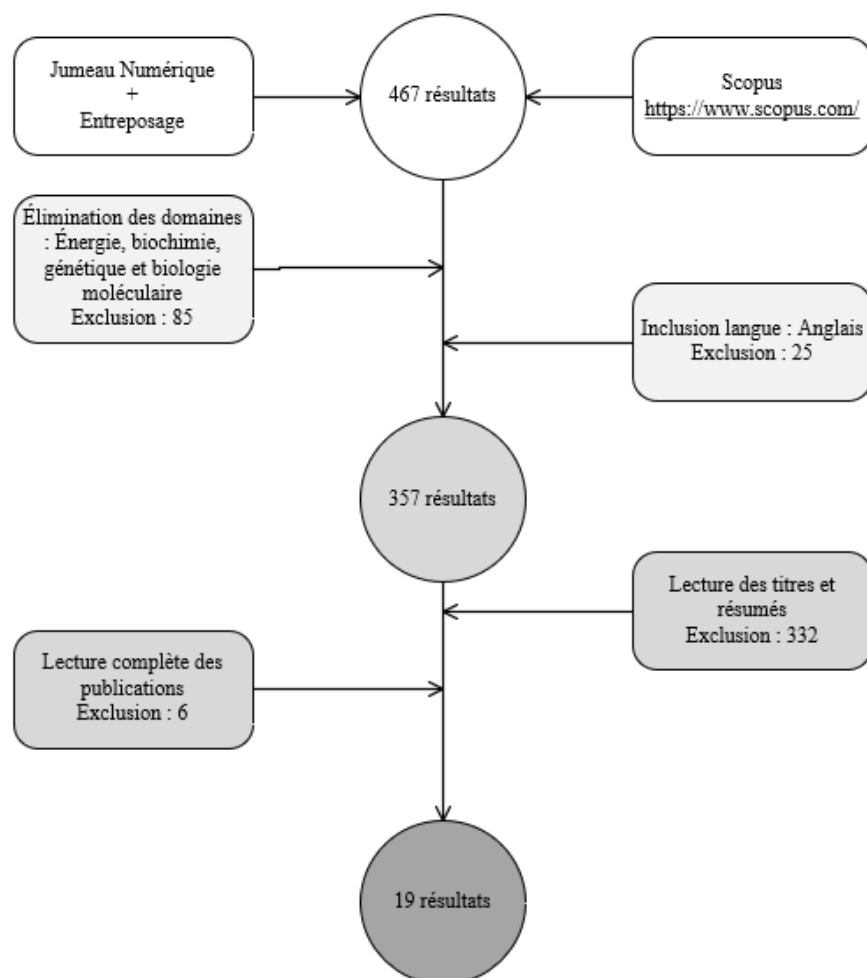


Figure 2.4 : Méthodologie de recherche

Tableau 2.9: Publications retenues

	Auteurs	Publications
1	Bányai et al. (2019)	Smart Cyber-Physical Manufacturing: Extended and Real-Time Optimization of Logistics Resources in Matrix Production
2	Baruffaldi et al. (2019)	Warehouse management system customization and information availability in 3pl companies
3	Bertolini, Esposito, et al. (2019)	Optimizing Retrieving Performance of an Automated Warehouse for Unconventional Stock Keeping Units
4	Braglia et al. (2019)	Using RFID technology and Discrete-Events, Agent-Based simulation tools to build Digital-Twins of large warehouses
5	Bučková et al. (2019)	Designing of logistics systems with using of computer simulation and emulation
6	Chen, S. et al. (2020)	A Warehouse Management System with UAV Based on Digital Twin and 5G Technologies
7	Coelho et al. (2021)	Simulation-based decision support tool for in-house logistics: the basis for a digital twin
8	De Luca et Osello (2021)	BIM and Mixed Reality for the New Management of Storage Area
9	Fedotov et al. (2020)	The digital twin of a warehouse robot for Industry 4.0
10	Gao et al. (2022)	Design of digital twin applications in automated storage yard scheduling
11	Glatt et al. (2021)	Modeling and implementation of a digital twin of material flows based on physics simulation
12	Kauke et al. (2021)	Digital Twins in Order Picking Systems for Operational Decision Support
13	Leng et al. (2019)	Digital twin-driven joint optimization of packing and storage assignment in large-scale automated high-rise warehouse product-service system
14	Leung et al. (2022)	From traditional warehouses to Physical Internet hubs: A digital twin-based inbound synchronization framework for PI-order management
15	Sahlab et al. (2021)	A Tier-based Model for Realizing Context-Awareness of Digital Twins
16	Sapronov et al. (2018)	Tuning hybrid distributed storage system digital twins by reinforcement learning
17	Sharotry et al. (2022)	A Digital Twin Framework for Real-Time Analysis and Feedback of Repetitive Work in the Manual Material Handling Industry
18	Wang et al. (2020)	A proactive material handling method for CPS enabled shop-floor
19	Zhao, Z. et al. (2021)	IoT and digital twin enabled smart tracking for safety management

2.4 Analyse de la littérature

2.4.1 Description générale

Une première classification générale des apports a été faite selon la méthode proposée par le Prof. Ivan Hofsjager (*CAP7002-Stratégie de recherche à la maîtrise en génie (Module 1)*, 2022) (voir tableau 2.10). Cet auteur définit trois types de méthode de recherche (quantitative, qualitative et mixte) et propose une classification des contributions en trois catégories (observation, modèle et recette). On constate que la majorité des publications sont des études de cas. Aussi, très peu d'auteurs intègrent des données qualitatives obtenues par observation, entrevue ou questionnaire. En fait, uniquement l'article de Sharotry et al. (2020) évalue la fatigue perçue des opérateurs grâce à un questionnaire (Échelle de Borg) et seuls les articles de Baruffaldi et al. (2019) et Coelho et al. (2021) utilisent certaines données recueillies par des observations sur le terrain. En ce qui concerne la contribution des articles, elle se classe soit dans la catégorie modèle (description, graphes, etc...) ou la catégorie recette (algorithme, procédures, processus, etc...). Différents niveaux de maturité sont présents dans les articles. Un écart est perçu entre le niveau de maturité prévu et réel du jumeau dans l'article de Leng et al. (2019). Les publications ne mentionnant aucun modèle de simulation ne seront pas analysées selon les 3 autres perspectives d'intérêt du JN. Enfin, seulement un article

présente une validation du modèle effectuée par des analyses statistiques inférentielles (Coelho et al., 2021). Tout compte fait, l'accent est mis davantage sur la validation du cadre ou de l'algorithme proposé que sur la validation du JN (Baruffaldi et al., 2019; Bertolini, Esposito, et al., 2019).

Tableau 2.10 : Classification générale des articles

	Auteurs	Types de publication	Types de recherche	Objectif	Catégorie	Maturité	Validation du jumeau
1	Bányai et al. (2019)	Article de revue académique	Appliquée et quantitative	Optimiser la manutention dans un environnement de production cyber-physique	Modèle mathématique et algorithme d'optimisation heuristique pour l'approvisionnement des cellules de production	NA	NA
2	Baruffaldi et al. (2019)	Article de revue académique	Étude de cas et mixte	Aider les gestionnaires de 3PL à décider de la personnalisation appropriée d'un WMS	Cadre conceptuel d'un outil d'aide à la décision pour la personnalisation d'un WMS	Ombre numérique	NP
3	Bertolini, Esposito, et al. (2019)	Article de revue académique	Étude de cas et quantitative	Optimiser la performance de récupération (missions / heure) de pièces métalliques dans un entrepôt automatisé	Algorithme méta-heuristique basé sur la procédure de recuit simulé qui indique dans quel paquet prendre les items à récupérer pour compléter les commandes	Modèle numérique	NP
4	Braglia et al. (2019)	Article de conférence	Étude pilote et quantitative	Présenter les résultats d'un JN d'entrepôt pilote	Modèle de simulation modulaire d'événements discrets, à base d'agents et combiné à des systèmes RFID	Jumeau numérique	NP
5	Bučková et al. (2019)	Article de revue académique	Étude pilote et quantitative	Décrire la conception d'un système logistique en utilisant la simulation et l'émulation	Méthodologie de réalisation de l'interconnexion entre la simulation et l'émulation	Ombre numérique	NP
6	Chen, S. et al. (2020)	Article de conférence	Appliquée et quantitative	Présenter un système de gestion d'entrepôt avec drone basé sur un JN et la technologie 5G	Architecture conceptuelle d'un entrepôt intelligent	Jumeau numérique	NP
7	Coelho et al. (2021)	Article de revue académique	Revue de littérature et mixte	Identifier et valider un outil d'aide à la décision basé sur la simulation pour les opérations logistiques internes	Architecture d'un JN pour des systèmes de logistique interne basé sur la simulation	Modèle numérique	Analyse statistique inférentielle
8	De Luca et Osello (2021)	Chapitre de livre	Étude de cas et quantitative	Reproduire un entrepôt virtuel par le biais de la modélisation numérique paramétrique	Modèle d'entrepôt virtuel pour une gestion de l'espace de stockage incluant la réalité mixte et le BIM	Ombre numérique	NP
9	Fedotov et al. (2020)	Article de conférence	Appliquée et quantitative	Décrire les paramètres structurels et dynamique d'un robot empileur	Modèle mathématique des paramètres structurels et dynamiques d'un robot empileur	NA	NA
10	Gao et al. (2022)	Article de revue académique	Étude de cas et quantitative	Meilleure planification d'un parc de stockage lorsqu'un scénario incertain se produit	Cadre de planification d'un parc de stockage automatisé basé sur un JN	Jumeau numérique	NP
11	Glatt et al. (2021)	Article de revue académique	Étude de cas et quantitative	Prédire, surveiller et diagnostiquer les flux de matériaux grâce à un JN d'un système de manutention	Méthodologie de conception d'un JN pour le flux de matériaux basé sur la simulation physique	Jumeau numérique	NP
12	Kauke et al. (2021)	Compte-rendu de conférence	Appliquée et quantitative	Soutenir le contrôle opérationnel dans les systèmes de préparation des commandes	Cadre conceptuel d'un JN pour un système de préparation des commandes	Jumeau numérique	NP
13	Leng et al. (2019)	Article de revue académique	Étude de cas et quantitative	Proposer une nouvelle approche d'optimisation conjointe pour l'entrepôt automatisé	Algorithme de correspondance collocation et algorithme d'optimisation de l'emballage basé sur la technique de superposition	Ombre numérique	NP
14	Leung et al. (2022)	Article de revue académique	Appliquée et quantitative	Introduire des stratégies de synchronisation dans les centres de distribution basées sur le paradigme de l'IP	Cadre de synchronisation entrante basé sur les JNs Système d'inférence neuro-flou pour prédire l'arrivée des commandes	Jumeau numérique	NP
15	Sahlab et al. (2021)	Article de conférence	Appliquée et quantitative	Accroître la prise en compte d'informations contextuelles dans les JNs	Modèle contextuel à niveau basé sur un graphe	NA	NA

16	Sapronov et al. (2018)	Article de revue académique	Appliquée et quantitative	Identifier une stratégie optimale des paramètres du simulateur pour obtenir la meilleure ressemblance avec le système réel de stockage	Réseau neuronal entraîné permettant d'ajuster les paramètres d'un JN pour un système de stockage	NA	NA
17	Sharotry et al. (2022)	Article de revue académique	Étude de cas et mixte	Présenter un concept et un prototype de JN pour représenter les opérateurs dans l'industrie de la manutention	Cadre conceptuel d'un JN pour analyser la fatigue des travailleurs dans les opérations de manutention/levage	Jumeau numérique	NP
18	Wang et al. (2020)	Article de revue académique	Étude de cas et quantitative	Réduire les temps d'inactivité des équipements de production	Méthode de manutention proactive pour les ateliers équipés de CPS.	Jumeau numérique	NP
19	Zhao, Z. et al. (2021)	Article de revue académique	Étude de cas et quantitative	Accroître la réactivité des secours en cas d'incident dans des entrepôts réfrigérés	Cadre de suivi basé sur l'IdO et les JNs (iSafeTrack) Algorithmes de détection des comportements immobiles anormaux et de positionnement intérieur	Jumeau numérique	NP

NP = non précisé, NA = non applicable;

Catégories : Modèle = Gris foncé, Recette = Gris pâle

2.4.2 Utilité

Tel que démontré dans le tableau 2.11, les JNs peuvent être utilisés pour plusieurs applications au niveau de l'entrepôt. Par exemple, un JN peut veiller à la sécurité des opérateurs de manutention (Sharotry et al., 2022; Zhao, G. et al., 2019), optimiser le positionnement de l'inventaire (De Luca & Osello, 2021; Leng et al., 2019) et même servir à tester un algorithme pour la préparation des commandes (Bertolini, Esposito, et al., 2019). On remarque également que certains modèles visent principalement à simuler et qu'aucune décision n'est prise (Baruffaldi et al., 2019; Bertolini, Esposito, et al., 2019; Bučková et al., 2019; Coelho et al., 2021) alors que dans d'autres articles un modèle prédictif prenant des décisions est présenté (Glatt et al., 2021; Kauke et al., 2021; Leung et al., 2022; Wang et al., 2020).

Tableau 2.11 : Utilité des jumeaux numériques

	Auteurs	Objectif du JN	Utilité du JN	Output
2	Baruffaldi et al. (2019)	Aider les gestionnaires de 3PL à décider de la personnalisation appropriée d'un WMS	Simulation Aide à la décision	L'analyse des résultats de la simulation permet d'identifier la meilleure stratégie d'affectation du positionnement de l'inventaire
3	Bertolini, Esposito, et al. (2019)	Tester et évaluer l'algorithme proposé	Simulation	L'analyse des résultats de la simulation permet d'évaluer la performance de l'algorithme
4	Braglia et al. (2019)	Optimiser les itinéraires et l'allocation de l'espace tout en essayant de réduire la distance parcourue	Décision	Séquence sous forme de liste pour le chargement et déchargement des matières (itinéraires optimisés)
5	Bučková et al. (2019)	Optimiser l'approvisionnement en matériaux pour la fabrication	Simulation	L'analyse des résultats de la simulation permet d'identifier la configuration la plus appropriée pour la ligne de production ainsi que la configuration idéale du temps de cycle de fabrication
6	Chen, S. et al. (2020)	Réduire les coûts d'entreposage grâce à une gestion d'entrepôt intelligente et contrôlable	Décision	Indique la meilleure position des marchandises dans les rayons de l'entrepôt et informe l'opérateur en cas de détection d'informations anormales
7	Coelho et al. (2021)	Tester et évaluer l'architecture proposée	Simulation	L'analyse des résultats des simulations permet d'affirmer que les modèles conçus selon l'architecture proposée représentent fidèlement les opérations du monde réel
8	De Luca et Osello (2021)	Servir de modèle virtuel 3D d'un entrepôt	Simulation Aide à la décision	Évaluer différents scénarios en termes de temps et de coût pour l'identification des zones de stockage
10	Gao et al. (2022)	Optimiser la planification de la zone de stockage, des AGVs et des ASCs	Décision	Propose un plan d'ordonnancement pour les ASCs
11	Glatt et al. (2021)	Contrôler les paramètres du système de manutention automatique pour éviter que la pièce tombe de la palette	Prédiction Surveillance Décision	Indique l'accélération et la vitesse pour une manutention la plus rapide et la plus sûre Notifier l'opérateur en cas de détection d'une perturbation Indique les causes possibles d'une défaillance survenue
12	Kauke et al. (2021)	Aider à la prise de décisions concernant la préparation des commandes	Prédiction Décision	Indique la taille requise pour la tournée de préparation des commandes, la planification des ressources humaines et la stratégie de libération des commandes à utiliser
13	Leng et al. (2019)	Optimiser l'emballage et l'affectation du stockage des produits dans un entrepôt	Décision	Indique comment palettiser les articles Indique l'endroit où les paquets doivent être stockés
14	Leung et al. (2022)	Optimiser les opérations conjointes d'exécution des commandes et de réapprovisionnement	Prédiction Décision	Indique la stratégie TIS à adopter : Coordonne les opérations conjointes OFR, prédit l'arrivée des commandes et consolide un ensemble de commandes PI pour le traitement des lots
17	Sharotry et al. (2022)	Réduire les blessures causées par des mouvements incorrects de la manutention manuelle	Décision	Fournit un retour d'information à l'opérateur sur son niveau de fatigue sur la base de la modification des angles articulaires
18	Wang et al. (2020)	Affecter de manière proactive les tâches logistiques aux chariots intelligents en minimisant la distance de transport et la consommation d'énergie	Prédiction Décision	Indique une combinaison optimale entre les tâches de livraison et les chariots intelligents en fonction de leur statut futur et de leurs informations actuelles
19	Zhao, Z. et al. (2021)	Optimiser la gestion de la sécurité des opérateurs	Décision	Informe les superviseurs si l'opérateur est en danger

2.4.3 Données requises

Du point de vue des données, très peu d'informations sont précisées quant aux entrées des modèles. En fait, aucune précision n'est apportée concernant la quantité et la qualité des données à l'exception de l'article de De Luca et Osello (2021). Ces auteurs utilisent un système de nettoyage des données. Toutefois, aucun détail supplémentaire n'est fourni en ce sens. D'ailleurs, dans l'ensemble, la synchronisation est faite en temps réel. Kauke et al. (2021) sont les seuls auteurs à avoir défini une fréquence de mises à jour variable selon la donnée. Aussi, les données proviennent principalement de l'espace physique (E) grâce à des technologies de l'IdO telles que des capteurs, des vêtements intelligents et des caméras de détection (Sharotry et al., 2022). Les résultats de

simulation (SI) servent également d'entrée pour le JN dans plusieurs articles. En ce qui concerne les types de données, celles-ci servent essentiellement à décrire l'état des équipements (E), les commandes (D), les produits (F et FC) et leurs localisations (L) dans l'entrepôt.

Tableau 2.12 : Informations sur les données

	Quantité	Qualité	Synchronisation	Sources						Types									
				H	E	S	SI	C	P	F	FC	S	L	PR	T	E	P	EN	D
2	NP	NP	NP	X	X					X					X			X	X
3	NP	NP	Statique						X	X		X							X
4	NP	NP	30 minutes		X		X						X			X			X
5	NP	NP	Temps réel		X						X								
6	NP	NP	Temps réel		X		X			X			X						X
7	NP	NP	Statique						X		X				X				X
8	Élevée	Système de nettoyage des données	Temps réel		X	X	X					X	X						X
10	NP	NP	Temps réel		X	X	X			X				X	X	X	X		
11	NP	NP	Temps réel	X	X		X			X	X		X						
12	Élevée	NP	Variable selon la donnée	X	X		X						X						X
13	NP	NP	Périodique	X	X		X			X			X			X		X	
14	NP	NP	Temps réel Consolidation : 60 minutes		X								X			X		X	X
17	Élevée	NP	Temps réel		X			X		X		X				X			
18	NP	NP	Temps réel	X	X		X				X		X	X		X			
19	Élevée	NP	Temps réel		X						X		X						

NP = non précisé,

Source : H = Historiques, E = Espace physique, S = Services fournis, SI = Simulation, C = Connaissances d'expert, P = Prétraitées

Type : F = Forme, FC = Fonctionnalité, S = Santé, L = Localisation, PR = Processus, T = Temps, E = État, P = Performance, EN = Environnement,

D = Divers qualitatif

2.4.4 Capacités

En se fiant à la définition du contexte d'Alexopoulos et al. (2016) qui est plutôt simpliste, il est tout à fait normal de constater dans le tableau 2.13 que les modèles puissent traiter (O2), incorporer (O3) et fournir (O4) des ICs. Par exemple, la position des chariots élévateurs bien qu'elle soit peu précise est utilisée dans le modèle de Braglia et al. (2019) pour choisir le transporteur le plus proche. Aussi, dans l'article de Sharotry et al. (2022), un retour d'information en temps réel est transmis à l'opérateur quant aux mouvements de levage appropriés. Toutefois, le modèle de Glatt et al. (2021) est le seul à pouvoir identifier les contextes pertinents. Cela dit, la capacité du modèle se limite à reconnaître lors d'une perturbation le type de pièce manutentionnée (possiblement grâce à son identifiant) afin de rechercher les données historiques de manutention pour ce même type de pièce. De plus, plusieurs modèles incluent des sources de données tierces (O6) notamment grâce aux technologies de l'IdO (Zhao, Z. et al., 2021).

Tableau 2.13 : Analyse des opportunités liées au context-awareness

		Opportunités – Context-Awareness											
		État du système						Design du système			Comportement du système		
	Auteurs	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10	O11	O12
2	Baruffaldi et al. (2019)		X	X			X						
3	Bertolini, Esposito, et al. (2019)		X	X									
4	Braglia et al. (2019)		X	X	X		X						
5	Bučková et al. (2019)		X	X									
6	Chen et al. (2020)		X	X	X		X						
7	Coelho et al. (2021)		X	X									
8	De Luca et Osello (2021)		X	X	X		X						
10	Gao et al. (2022)		X	X	X		X						X
11	Glatt et al. (2021)	X	X	X	X	X	X					X	
12	Kauke et al. (2021)		X	X	X		X						
13	Leng et al. (2019)		X	X	X		X			X			X
14	Leung et al. (2022)		X	X	X		X						X
17	Sharotry et al. (2022)		X	X	X		X						
18	Wang et al. (2020)		X	X	X		X						X
19	Zhao et al. (2021)		X	X	X		X						

En ce qui concerne l'autonomie (voir tableau 2.14), lorsque le système fonctionne en tant que CPS, il devient possible pour le JN de contrôler des entités physiques (O14) comme des équipements de manutention intelligents (O15) (Gao et al., 2022; Wang et al., 2020) et d'empêcher tout mouvement supplémentaire de la palette (Glatt et al., 2021). Au niveau du design du système, le modèle de Gao et al. (2022) optimise le résultat de la simulation grâce à une boucle de rétroaction (O17) avant d'être exécuté par l'entité physique. Somme toute, très peu d'articles décrivent un JN ayant des fonctionnalités avancées d'autonomie. Bien entendu, les résultats de cette analyse peuvent être sujets à changement en considérant une autre définition de l'autonomie que celle prise pour ce travail. Ce constat est également applicable pour l'analyse des opportunités liées à l'adaptabilité

Tableau 2.14 : Analyse des opportunités liées à l'autonomie

		Opportunités - Autonomie							
		État du système			Design du système			Comportement du système	
	Auteurs	O13	O14	O15	O16	O17	O18	O19	O20
2	Baruffaldi et al. (2019)								
3	Bertolini, Esposito, et al. (2019)								
4	Braglia et al. (2019)								
5	Bučková et al. (2019)								
6	Chen et al. (2020)		X	X					
7	Coelho et al. (2021)								
8	De Luca et Osello (2021)								
10	Gao et al. (2022)		X	X		X			
11	Glatt et al. (2021)		X	X					
12	Kauke et al. (2021)								
13	Leng et al. (2019)								
14	Leung et al. (2022)								
17	Sharotry et al. (2022)								
18	Wang et al. (2020)		X	X					
19	Zhao et al. (2021)								

D'autre part, tel que démontré dans le tableau 2.15, la conception de certains modèles est facilement adaptable au contexte d'utilisation (O24). Notamment, Braglia et al. (2019) propose une approche de modélisation par agent qui permet d'apporter des modifications rapidement à un modèle. Aussi, Kauke et al. (2021) propose un JN hautement paramétrable (O22) capable de s'adapter automatiquement à l'état réel du système de préparation des commandes. Quant au modèle de Glatt et al. (2021), il permet non seulement d'accéder à l'historique des simulations de manutention échouée (O21), mais également d'adapter la vitesse et l'accélération (O22) pour une manutention rapide et réussie.

Tableau 2.15 : Analyse des opportunités liées à l'adaptabilité

		Opportunités - Adaptabilité								
		État du système			Design du système		Comportement du système			
	Auteurs	O21	O22	O23	O24	O25	O26	O27	O28	O29
2	Baruffaldi et al. (2019)									
3	Bertolini, Esposito, et al. (2019)									
4	Braglia et al. (2019)				X					
5	Bučková et al. (2019)									
6	Chen et al. (2020)									
7	Coelho et al. (2021)				X					
8	De Luca et Osello (2021)									
10	Gao et al. (2022)									
11	Glatt et al. (2021)	X	X							
12	Kauke et al. (2021)		X		X					
13	Leng et al. (2019)									
14	Leung et al. (2022)									
17	Sharotry et al. (2022)									
18	Wang et al. (2020)									
19	Zhao et al. (2021)									

2.5 Analyse critique

Cette section souligne les faiblesses et les limitations identifiées dans la revue. D'abord, l'une des principales faiblesses identifiées est l'absence de validation du modèle de simulation. Certains auteurs prévoient d'effectuer une validation d'ici peu (Kauke et al., 2021). Toutefois, il n'en demeure pas moins que la précision des résultats est directement impactée par la capacité du modèle à représenter fidèlement le système physique.

De plus, bien que l'échange des données entre le modèle virtuel et physique soit central au fonctionnement d'un JN, un travail supplémentaire doit être réalisé en ce sens. Il s'agit non seulement d'être capable d'identifier les données pertinentes à intégrer au modèle, mais également de pouvoir les caractériser en termes de quantité, qualité et de précision. Dans bien des cas, les données utilisées sont incomplètes. Par exemple, Gao et al. (2022) reconnaissent que plusieurs

informations pouvant impacter le déroulement du processus telles que le mauvais temps et l'encombrement des routes sont manquantes à leur modèle. De plus, l'intégration d'une base de connaissances comprenant divers scénarios et leurs solutions appropriées est fortement suggérée par Gao et al. (2022) entre autres pour aider les opérateurs à prendre des décisions optimales.

En ce qui concerne les capacités d'un JN, plusieurs écarts de recherche ont été soulevés par Hribernik et al. (2021) (voir tableaux 2.16 à 2.19). Ceux-ci sont classifiés par les auteurs en quatre catégories : Interopérabilité; Modélisation; Interaction avec l'humain; Capacité en temps réel.

Tableau 2.16 : Écarts de recherche liés aux généralités (adapté d'Hribernik et al., 2021)

Écarts à combler - Généralités		
Interopérabilité	Rôle des JN dans l'IdO et les protocoles IdO appropriés pour les JN	E1
	Interopérabilité du cycle de vie	E2
	Normes et protocoles pour l'échange d'informations	E3
Modélisation	Granularité requise de la mise en correspondance des JN avec leurs homologues physiques	E4
	Modèle et cadre de référence font défaut	E5
	Intégration complète avec RAMI4.0	E6
Interaction avec l'humain	Pouvoir être expliqués et certifiés	E7

Tableau 2.17 : Écarts de recherche liés au context-awareness (adapté d'Hribernik et al., 2021)

Écarts à combler - Context-Awareness		
Interopérabilité	Intégration des informations contextuelles	E8
Modélisation	Modèles de contexte pour les JN	E9
	Agrégation des JN en fonction du contexte	E10
Interaction avec l'humain	Représenter de manière appropriée les humains dans les modèles contextuels	E11
Capacité en temps réel	Acquérir et analyser des I.C. en temps réel	E12

Tableau 2.18 : Écarts de recherche liés à l'autonomie (adapté d'Hribernik et al., 2021)

Écarts à combler - Autonomie		
Modélisation	Relation entre les HMS et MAS avec les JNs et systèmes de JN	E13
Interaction avec l'humain	Frontières entre le JN et l'autonomie des travailleurs	E14
Capacité en temps réel	Prendre des décisions quasi-optimales sous contrainte de temps	E15
	Prendre en charge une quantité massive de données en temps réel	E16
	Données incomplètes, hétérogènes et erronées	E17

Tableau 2.19 : Écarts de recherche liés à l'adaptabilité (adapté d'Hribernik et al., 2021)

Écarts à combler - Adaptabilité		
Modélisation	Traduction des objectifs commerciaux en plans d'action	E18
	Modèle de coopération et de collaboration entre les JN	E19
	Modèle dynamique et évolutif	E20
Interaction avec l'humain	Modèle d'interaction humain et JN (profils différents d'individu)	E21

Tel que démontré au tableau 2.20, le travail de certains auteurs répond en partie à quelques limitations. Notamment, Sahlab et al. (2021) ont développé un modèle de contexte (E9) à quatre niveaux pour modéliser et intégrer le contexte interne et externe (E8) d'un système dans un JN (voir figure 2.5). Ce modèle se base sur les domaines d'ingénierie (mécanique, électrique et logiciel) qu'implique un système de production. En fait, chaque domaine représente tous les sous-systèmes et les composants de son propre point de vue. Par exemple, le domaine électrique interprète tous les éléments du point de vue électrique. Au sein d'un domaine, des relations sont présentes entre chaque composant formant une entité ce qui réfère au niveau 1 (C1). Au niveau 2 (C2), les liens entre les domaines sont représentés. Ainsi, ce niveau permet d'obtenir une compréhension générale d'une entité donnée. Pour atteindre les objectifs de production, les entités comprises dans le système de production interagissent ensemble ce qui caractérise le niveau 3 (C3). Ce niveau comprend également les interactions entre la station de production et le produit comme les exigences de qualité, de temps et de coût. Enfin, le niveau 4 (C4) réfère au contexte environnemental dans lequel travaillent les entités physiques (température, bruit, ...). Bref, l'article propose un graphe de propriété étiqueté pour l'intégration du contexte au JN. Cela étant dit, la démarche d'implantation n'est pas détaillée dans l'article puisque ce modèle n'a jamais été testé. En plus, il ne permet pas d'identifier les données nécessaires à considérer selon le cas d'application. Il y a donc un manque important à ce niveau. Dans un autre ordre d'idée, le système d'allocation de zone de stockage proposé par Gao et al. (2022) possède la capacité d'observer les changements dans l'état d'empilement (E12). Cependant, cette capacité semble être très limitée puisque les changements perçus concernent uniquement l'état des équipements et le volume d'un conteneur.

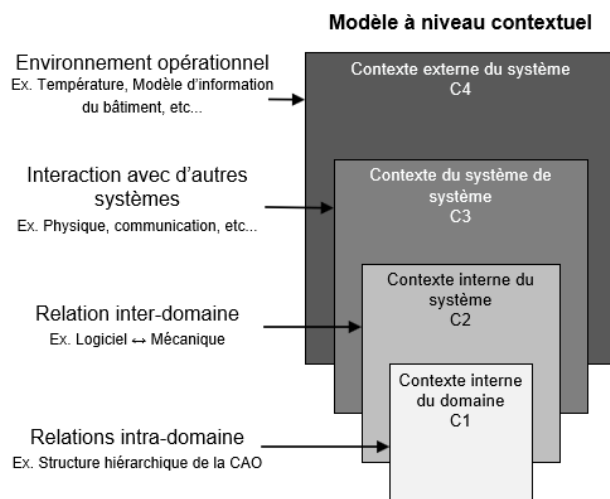


Figure 2.5 : Modèle de contexte (adapté de Sahlab et al., 2021)

Tableau 2.20 : Analyse des écarts

	Généralités							Context-awareness					Autonomie					Adaptabilité			
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21
1																					
2																				X	
3																					
4																				X	
5					X			(X)													
6	X		X									X									
7					X															X	
8			X									X					(X)			(X)	
9																					
10	X				X							X			X						
11			X		X										X					X	
12			X		X										X	(X)				X	
13			(X)																		
14	X				X										(X)						
15								X	X											X	
16				X																	
17					X			X			X	X			X	X					
18					X		(X)								(X)		X				
19	X				X											X					

(X) : partiellement

2.6 Conclusion

Pour conclure, la littérature présente divers cas d'application très spécifique des JNs en entreposage. Bien que certains auteurs proposent des solutions pour pallier aux écarts identifiés par Hribernik et al. (2021), plusieurs limites demeurent empêchant d'exploiter à son plein potentiel un JN. Les limitations concernent principalement la caractérisation des données requises au JN ainsi que les 3 capacités d'intérêt de la revue. Le prochain chapitre présente les objectifs spécifiques de ce projet ainsi qu'une proposition de méthode de recherche pour les atteindre.

CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La conclusion permet de mettre l'accent sur les contributions du mémoire ou de la thèse à l'avancement des connaissances et au développement des technologies, tout en identifiant ses limites et ses contraintes. Elle permet également d'identifier de nouvelles voies de recherche. Des recommandations y sont également énoncées.

BIBLIOGRAPHIE

- Accorsi, R., Baruffaldi, G., & Manzini, R. (2018). Picking efficiency and stock safety: A bi-objective storage assignment policy for temperature-sensitive products. *Computers & Industrial Engineering*, 115, 240-252. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.11.009>
- Alexopoulos, K., Makris, S., Xanthakis, V., Sipsas, K., & Chryssolouris, G. (2016). A concept for context-aware computing in manufacturing: the white goods case. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(8), 839-849. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1130257>
- Alvarez, G. A., Borowsky, E., Go, S., Romer, T. H., Becker-Szendy, R., Golding, R., . . . Wilkes, J. (2001). Minerva. *ACM Transactions on Computer Systems*, 19(4), 483-518. <https://doi.org/10.1145/502912.502915>
- Bányai, Á., Illés, B., Glistau, E., Machado, N. I. C., Tamás, P., Manzoor, F., & Bányai, T. (2019). Smart Cyber-Physical Manufacturing: Extended and Real-Time Optimization of Logistics Resources in Matrix Production. *Applied Sciences*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/app9071287>
- Baruffaldi, G., Accorsi, R., & Manzini, R. (2019). Warehouse management system customization and information availability in 3pl companies. *Industrial Management & Data Systems*, 119(2), 251-273. <https://doi.org/10.1108/imds-01-2018-0033>
- Bertolini, M., Esposito, G., Mezzogori, D., & Neroni, M. (2019). Optimizing Retrieving Performance of an Automated Warehouse for Unconventional Stock Keeping Units. *Procedia Manufacturing*, 39, 1681-1690. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.272>
- Bertolini, M., Mezzogori, D., & Neroni, M. (2019). Allocation of items considering unit loads balancing and joint retrieving. *Proceedings of the Summer School Francesco Turco*, 1, 464-470.
- Braglia, M., Gabbrielli, R., Frosolini, M., Marrazzini, L., & Padellini, L. (25-27 sept. 2019). *Using RFID technology and Discrete-Events, Agent-Based simulation tools to build Digital-Twins of large warehouses* IEEE International Conference on RFID Technology and Applications, Pisa, IT. <https://doi.org/10.1109/RFID-TA.2019.8892254>
- Bučková, M., Skokan, R., Fusko, M., & Hodoň, R. (2019). Designing of logistics systems with using of computer simulation and emulation. *Transportation Research Procedia*, 40, 978-985. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.137>
- CAP7002-Stratégie de recherche à la maîtrise en génie (Module 1). (2022). [PowerPoint slides]. Moodle@Polytechnique Montreal. <https://moodle.polymtl.ca/>
- Chan, F. T. S., & Chan, H. (2011). Improving the productivity of order picking of a manual-pick and multi-level rack distribution warehouse through the implementation of class-based storage. *Expert Systems with Applications*, 38(3), 2686-2700. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.08.058>
- Chen, S., Meng, W., Xu, W., Liu, Z., Liu, J., & Wu, F. (2020). *A Warehouse Management System with UAV Based on Digital Twin and 5G Technologies* International Conference on

- Information, Cybernetics, and Computational Social Systems. <https://doi.org/10.1109/icc52145.2020.9336832>
- Chen, T.-L., Cheng, C.-Y., Chen, Y.-Y., & Chan, L.-K. (2015). An efficient hybrid algorithm for integrated order batching, sequencing and routing problem. *International Journal of Production Economics*, 159, 158-167. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.09.029>
- Coelho, F., Relvas, S., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2021). Simulation-based decision support tool for in-house logistics: the basis for a digital twin. *Computers & Industrial Engineering*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107094>
- Danjou, C., Rivest, L., & Pellerin, R. (2017). *Le passage au numérique : Industrie 4.0 : des pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité*. Cefrio. <https://espace2.etsmtl.ca/id/eprint/14934/1/le-passage-au-num%C3%A9rique.pdf>
- De Koster, R., Le-Duc, T., & Roodbergen, K. J. (2007). Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 182(2), 481-501. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.009>
- De Luca, D., & Osello, A. (2021). BIM and Mixed Reality for the New Management of Storage Area. Dans *From Building Information Modelling to Mixed Reality* (p. 123-141).
- Fedotov, A. A., Sergeev, S. M., Provotorova, E. N., Prozhogina, T. V., & Zaslavskaya, O. Y. (2020). *The digital twin of a warehouse robot for Industry 4.0* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/862/3/032061>
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, 8, 108952-108971. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2998358>
- Gao, Y., Chang, D., Chen, C.-H., & Xu, Z. (2022). Design of digital twin applications in automated storage yard scheduling. *Advanced Engineering Informatics*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101477>
- Glatt, M., Sinnwell, C., Yi, L., Donohoe, S., Ravani, B., & Aurich, J. C. (2021). Modeling and implementation of a digital twin of material flows based on physics simulation. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 231-245. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.04.015>
- Hribernik, K., Cabri, G., Mandreoli, F., & Mentzas, G. (2021). Autonomous, context-aware, adaptive Digital Twins—State of the art and roadmap. *Computers in Industry*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103508>
- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36-52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
- Julien, N., & Martin, E. (2021). How to characterize a Digital Twin: A Usage-Driven Classification. *IFAC-PapersOnLine*, 54(1), 894-899. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.106>
- Kaiblinger, A., & Woschank, M. (2022). State of the Art and Future Directions of Digital Twins for Production Logistics: A Systematic Literature Review. *Applied Sciences*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/app12020669>

- Kauke, D., Galka, S., & Fottner, J. (2021). *Digital Twins in Order Picking Systems for Operational Decision Support*. Proceedings of the 54th Hawaii International Conference on System Sciences (p. 1655-1664). <https://doi.org/10.24251/HICSS.2021.200>
- Klein, P., van der Vegte, W. F., Hribernik, K., & Klaus-Dieter, T. (2019). *Towards an Approach Integrating Various Levels of Data Analytics to Exploit Product-Usage Information in Product Development*. Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design (vol. 1, p. 2627-2636). <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.269>
- Leng, J., Yan, D., Liu, Q., Zhang, H., Zhao, G., Wei, L., . . . 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*, 34(7-8), 783-800. <https://doi.org/10.1080/0951192x.2019.1667032>
- Leung, E. K. H., Lee, C. K. H., & Ouyang, Z. (2022). From traditional warehouses to Physical Internet hubs: A digital twin-based inbound synchronization framework for PI-order management. *International Journal of Production Economics*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108353>
- Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2021). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346-361. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>
- Madni, A., Madni, C., & Lucero, S. (2019). Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/systems7010007>
- Perno, M., Hvam, L., & Haug, A. (2022). Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers. *Computers in Industry*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103558>
- Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., . . . Nee, A. Y. C. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 3-21. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>
- Qi, Q., Tao, F., Zuo, Y., & Zhao, D. (2018). Digital Twin Service towards Smart Manufacturing. *Procedia CIRP*, 72, 237-242. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.103>
- Rosen, R., von Wichert, G., Lo, G., & Bettenhausen, K. D. (2015). About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 567-572. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>
- Rosenberger, P., & Gerhard, D. (2018). Context-awareness in industrial applications: definition, classification and use case. *Procedia CIRP*, 72, 1172-1177. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.242>
- Sahlab, N., Braun, D., Jung, T., Jazdi, N., & Weyrich, M. (2021). *A Tier-based Model for Realizing Context-Awareness of Digital Twins* IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation <https://doi.org/10.1109/etfa45728.2021.9613408>
- Sapronov, A., Belavin, V., Arzymatov, K., Karpov, M., Nevolin, A., & Ustyuzhanin, A. (2018). Tuning hybrid distributed storage system digital twins by reinforcement learning. *Advances in Systems Science and Applications*, 18(4), 1-12. <https://doi.org/10.25728/assa.2018.18.4.660>

- Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., & Dassisti, M. (2021). Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103469>
- Sharotry, A., Jimenez, J. A., Mediavilla, F. A. M., Wierschem, D., Koldenhoven, R. M., & Valles, D. (2022). Manufacturing Operator Ergonomics: A Conceptual Digital Twin Approach to Detect Biomechanical Fatigue. *IEEE Access*, 10, 12774-12791. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3145984>
- Sharotry, A., Jimenez, J. A., Wierschem, D., Mendez Mediavilla, F. A., Koldenhoven, R. M., Valles, D., . . . Aslan, S. (2020). *A Digital Twin Framework for Real-Time Analysis and Feedback of Repetitive Work in the Manual Material Handling Industry*. Winter Simulation Conference (p. 2637-2648). <https://doi.org/10.1109/wsc48552.2020.9384043>
- Steiner, N. J. (2008). *Autonomous Computing Systems* [Doctoral dissertation, Virginia Tech]. <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/26758/dissertation.pdf?sequence=1>
- Strang, T., & Linnhoff-Popien, C. (7-10 sept 2004). *A Context Modeling Survey* [Paper presentation]. UbiComp 2004 – The Sixth International Conference on Ubiquitous Computing, Nottingham, GB. <http://pace.itee.uq.edu.au/cw2004/Paper15.pdf>
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405-2415. <https://doi.org/10.1109/tii.2018.2873186>
- Tao, F., & Zhang, M. (2017). Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing. *IEEE Access*, 5, 20418-20427. <https://doi.org/10.1109/access.2017.2756069>
- VanDerHorn, E., & Mahadevan, S. (2021). Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>
- Wang, W., Zhang, Y., & Zhong, R. Y. (2020). A proactive material handling method for CPS enabled shop-floor. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101849>
- Zhang, L., Zhou, L., & Horn, B. K. P. (2021). Building a right digital twin with model engineering. *Journal of Manufacturing Systems*, 59, 151-164. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.02.009>
- Zhao, G., Liu, S., Lopez, C., Lu, H., Elgueta, S., Chen, H., & Boshkoska, B. M. (2019). Blockchain technology in agri-food value chain management: A synthesis of applications, challenges and future research directions. *Computers in Industry*, 109, 83-99. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.04.002>
- Zhao, Z., Shen, L., Yang, C., Wu, W., Zhang, M., & Huang, G. Q. (2021). IoT and digital twin enabled smart tracking for safety management. *Computers & Operations Research*, 128. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105183>

ANNEXE A - TITRE DE LA PREMIÈRE ANNEXE

ATTENTION : Ne supprimez pas le mot annexe dans la ligne ci-dessus. Un signet a été défini pour que le numéro de page de la section Annexes de la page des matières soit mis à jour automatiquement.

Bien que nécessaires à la compréhension du travail de recherche, certains documents peuvent alourdir le texte. Il est donc préférable de les présenter en annexe et de les séparer les uns des autres par des pages de titre appropriées.

ANNEXE B - TITRE DE LA DEUXIÈME ANNEXE

Cette annexe est en mode paysage.