

Titre: Intégration de données contextuelles à un jumeau numérique
Title: permettant d'optimiser le positionnement de l'inventaire

Auteur: Marie-Jane Bélanger
Author:

Date: 2022

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Bélanger, M.-J. (2022). Intégration de données contextuelles à un jumeau numérique permettant d'optimiser le positionnement de l'inventaire [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/10715/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/10715/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Robert Pellerin, & Samir Lamouri
Advisors:

Programme: Maîtrise recherche en génie industriel
Program:

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 mathématiques et de génie industriel

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

Génie industriel

Décembre 2022

© Marie-Jane Bélanger, 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 :

Jean-Marc FRAYRET, président

Robert PELLERIN, membre et directeur de recherche

Samir LAMOURI, membre et codirecteur de recherche

Vincent CHEUTET, membre

DÉDICACE

À mom et pops!

REMERCIEMENTS

Plusieurs personnes ont contribué d'une façon ou d'une autre à la rédaction de ce mémoire qui mérite d'être souligné.

J'aimerais d'abord remercier mes directeurs de recherche, Robert Pellerin et Samir Lamouri, pour leur encadrement académique, leur soutien et leur grande disponibilité tout au long de ce projet de maîtrise. Ils ont su me guider adéquatement dans l'accomplissement d'un projet réussi. Leur partage de connaissances a grandement contribué à mon apprentissage. Ils m'ont permis de découvrir le monde de la recherche sous une nouvelle vision et m'ont offert la possibilité de poursuivre des études de troisième cycle à l'international. Merci de croire en moi!

Je souhaite également remercier l'équipe de Productique Québec, un centre collégial de transfert technologique (CCTT) affilié au cégep de Sherbrooke. Non seulement ils m'ont soutenu financièrement, ils m'ont aussi exposé à des expertises professionnelles variées grâce à des collègues de travail dynamiques. Une mention spéciale doit être soulignée à mon superviseur Vincent Thomasset-Laperrière. Nos rencontres du mercredi après-midi étaient toujours enrichissantes et très bénéfiques à la réalisation du projet.

Un merci spécial à l'entreprise manufacturière partenaire au projet sans qui la phase d'expérimentation n'aurait pas été possible. Les ressources dédiées au projet ont été un facteur déterminant pour le bon déroulement de cette maîtrise.

J'adresse aussi des remerciements à mes parents, ma sœur, mes amis et toute ma famille proche qui ont su me soutenir moralement pendant les périodes plus difficiles. Votre présence et votre bonne écoute ont été très appréciées.

Enfin, je remercie mon chien Léa. Nos séances de jeu m'ont permis de faire une pause lorsque j'en avais besoin.

RÉSUMÉ

Le coût élevé des opérations d'entreposage motive les entreprises manufacturières à accroître l'efficacité de leur processus. En fait, l'opération la plus dispendieuse est le ramassage des produits finis qui doivent être expédiés. Le positionnement de l'inventaire et l'ordonnancement du trajet sont quelques exemples de facteurs pouvant impacter le temps de ramassage des produits.

Dans un contexte où ce processus n'est pas optimal, il est intéressant de créer un environnement qui permet de contrôler les facteurs pertinents à l'entreposage. Les technologies de l'Industrie 4.0 offrent plusieurs solutions pour y parvenir. La technologie du jumeau numérique (JN) permet notamment une représentation virtuelle en temps réel d'un système physique afin d'aider à optimiser ce système. La littérature présente des cas très spécifiques d'application du JN. En fait, chaque JN est unique et dépend de son contexte. Cela dit, les concepteurs, notamment ceux en PME, n'ont pas les outils nécessaires pour identifier correctement les données essentielles pour alimenter le JN, et ainsi obtenir un modèle valide. En plus, chaque donnée intégrée à un JN nécessite un investissement monétaire et en ressources de la part des entreprises ce qui limite les PME dans la sélection des capteurs à installer pour espérer obtenir un JN valide.

Ce mémoire s'intéresse donc aux opportunités d'intégrer des informations contextuelles (ICs) qui soient pertinentes à un JN d'entreposage. À notre connaissance, aucun modèle d'identification des ICs adapté à la complexité d'un JN n'est proposé dans la littérature. Ainsi, une méthodologie d'identification des ICs pertinentes à intégrer à un JN a été développée. Cette méthodologie utilise les connaissances métier pour identifier les facteurs pouvant impacter la problématique ciblée. Une expérimentation a été menée dans l'entrepôt d'une entreprise manufacturière du Québec. Deux résultats principaux ont été obtenus : une proposition de liste d'ICs à intégrer au JN en ordre de priorité en fonction du gain (%) et du coût d'implantation (\$) (1-Vitesse de marche (gain : 23.0; coût : 2 818); 2-Taux d'occupation (gain : 17.3; coût : 1 050); 3-Indice de mixité (gain : 11.2; coût : 1 050)); une augmentation de la précision du modèle de 26.5% grâce à l'intégration des trois facteurs contextuels. Ces résultats justifient la pertinence d'utiliser la méthodologie proposée pour identifier les facteurs contextuels pertinents à intégrer au modèle. Certaines limites doivent être considérées. Notamment, la méthodologie a été testée uniquement sur un cas d'application où la précision du modèle de simulation initial est faible. Aussi, un biais dans les résultats peut provenir de la modélisation des ICs dans AnyLogic.

ABSTRACT

The high cost of warehousing operations motivates manufacturing companies to increase the efficiency of their process. The most expensive operation is the pickup of finished goods for shipment. Inventory positioning and route scheduling are just a few of the factors that can impact product picking time.

In a context where this process is not optimal, it is interesting to be able to create an environment that will control the factors relevant to warehousing. Industry 4.0 technologies offer several solutions to achieve this. Notably, digital twin (DT) technology allows a real-time virtual representation of a physical system to help optimize that system. The literature presents very specific cases of DT application. Each DT is unique and depends on its context. Designers, especially those in SME, do not have the necessary tools to correctly identify the essential data to feed the DT and thus obtain a valid model. Moreover, each data integrated in a DT requires a monetary and resource investment from the companies, which limits the SME in the selection of the sensors to be installed to hope to obtain a valid DT.

This paper focuses on the opportunities to integrate contextual information relevant to a warehousing DT. To the best of our knowledge, no model for identifying contextual information (CIs) adapted to a DT's complexity is proposed in the literature. Thus, a methodology for identifying relevant CIs to be integrated into a DT has been developed. This methodology uses field knowledge to identify the factors impacting the targeted problem. An experiment was conducted in the warehouse of a manufacturing company based in Quebec. Two main results were obtained: a proposed list of CIs to be incorporated into the DT in order of priority based on gain (%) and implementation cost (\$) (1-Walking speed (gain: 23.0; cost: 2818); 2-Occupancy rate (gain: 17.3; cost: 1050); 3-Mixing index (gain: 11.2; cost: 1050)); an increase in the accuracy of the model by 26.5% following the integration of the three contextual factors. These results justify the relevance of integrating CIs that are relevant to the DT to improve its accuracy. These results justify the relevance of using the proposed methodology to identify the relevant contextual factors to be included in the model. Some limitations must be considered. In particular, the methodology has been tested only on a case study where the accuracy of the initial simulation model is low. Also, a bias in the results may come from the modeling of the CIs in AnyLogic.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES	XII
LISTE DES ANNEXES	XVI
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.....	21

2.6	Conclusion.....	24
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE.....		25
3.1	Définition des objectifs de recherche	25
3.2	Méthodologie de recherche	26
3.3	Conclusion.....	27
CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE D'IDENTIFICATION DES INFORMATIONS CONTEXTUELLES PERTINENTES À UN JUMEAU NUMÉRIQUE		28
4.1	Modèle initial	28
4.2	Modèle proposé.....	30
4.2.1	Étape 1 : Problématique	31
4.2.2	Étape 2 : Sources de contexte.....	32
4.2.3	Étape 3 : Distribution statistique	33
4.2.4	Étape 4 : Test 1	33
4.2.5	Étape 5 : Confirmation	33
4.2.6	Étape 6 : Test 2.....	34
4.2.7	Étape 7 : Analyse coûts-bénéfices.....	34
4.3	Conclusion.....	34
CHAPITRE 5 EXPÉRIMENTATION		36
5.1	Présentation de l'étude de cas	36
5.2	Présentation des résultats	37
5.2.1	Étape 1 : Problématique	37
5.2.2	Étape 2 : Sources de contexte.....	42
5.2.3	Étape 3 : Distribution statistique	43
5.2.4	Étape 4 : Test 1	45
5.2.5	Étape 5 : Confirmation	47

5.2.6	Étape 6 : Test 2.....	50
5.2.7	Étape 7 : Analyse coûts-bénéfices.....	52
5.3	Discussion	53
5.3.1	Résultats	53
5.3.2	Limites de l'étude.....	55
5.3.3	Développement du modèle.....	56
5.4	Conclusion.....	59
CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		60
BIBLIOGRAPHIE		63
ANNEXES		68

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 2.10 : Classification générale des articles (suite et fin).....	16
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.....	20
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)...	22
Tableau 2.18 : Écarts de recherche liés à l'autonomie (adapté d'Hribernik et al., 2021).....	22
Tableau 2.19 : Écarts de recherche liés à l'adaptabilité (adapté d'Hribernik et al., 2021).....	22
Tableau 2.20 : Analyse des écarts	24
Tableau 5.1 : Options de données requises	43

Tableau 5.2 : Hypothèses émises des distributions statistiques	44
Tableau 5.3 : Plan d'expérimentation (test 1)	45
Tableau 5.4 : Résultats des expérimentations (test 1) en minute	46
Tableau 5.5 : Résultats initiaux	46
Tableau 5.6 : Imprécision et gain moyens obtenus par facteur	47
Tableau 5.7 : Nombres de données collectées.....	47
Tableau 5.8 : Temps de marche (sec) d'une distance de 10 m.....	48
Tableau 5.9 : Plan d'expérimentation mené dans l'outil « Input Analyzer ».....	48
Tableau 5.10 : Distributions statistiques obtenues grâce à l'outil « Input Analyzer ».....	49
Tableau 5.11 : Résultats de la simulation avec la nouvelle expression du temps de ramassage....	50
Tableau 5.12 : Plan d'expérimentation (test 2)	51
Tableau 5.13 : Résultats des expérimentations (test 2) en minute et imprécisions moyennes (%)	51
Tableau 5.14 : Effets combinatoires en seconde	51
Tableau 5.15 : Exemple de calculs de l'effet combinatoire en seconde des facteurs H et D	51
Tableau 5.16 : Analyse de coûts pour intégrer la vitesse de marche (D).....	52
Tableau 5.17 : Analyse de coûts pour intégrer l'indice de mixité (H) ou le taux d'occupation (I)	52
Tableau 5.18 : Analyse coûts-bénéfices des facteurs contextuels.....	53

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Modèle, ombre et jumeau numériques (adapté de Kritzinger et al., 2018)	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
Figure 3.1 : Méthodologie de recherche suivie	26
Figure 4.1 : Méthodologie de conception d'un système intelligent prenant en compte le contexte (adapté de Bauer & Dey, 2016).....	29
Figure 4.2 : Étape 4 de la méthodologie de conception d'un système intelligent prenant en compte le contexte (adapté de Bauer & Dey, 2016)	30
Figure 4.3 : Méthodologie d'identification des informations contextuelles pertinentes à intégrer à un JN (adapté de Bauer & Dey, 2016)	31
Figure 4.4 : Transformation du modèle initial et contributions apportées	35
Figure 5.1 : Temps des vagues simulées et réelles (min).....	39
Figure 5.2 : Écarts entre les temps de vagues simulées et réelles (min)	40
Figure 5.3 : Ishikawa des écarts dans les temps de ramassage des vagues	41
Figure 5.4 : 3P – Partie 1	42
Figure 5.5 : 3P – Partie 1, 2 et 3.....	42
Figure 5.6 : 3P – ICs retenues	44
Figure 5.7 : Modèle de simulation (Main - AnyLogic).....	45
Figure 5.8 : Activités d'entreposage (adapté de Khanzode & Shah, 2017)	56
Figure 5.9 : Taxonomie des causes typiques d'un temps élevé de préparation des commandes (adapté de De Koster et al., 2007).....	57

Figure 5.10 : Méthodologie développée initialement (adapté de Bauer & Dey, 2016)	58
Figure 5.11 : Capteurs de l'Industrie 4.0 (adapté de Javaid et al., 2021; Kalsoom et al., 2020) ...	59
Figure B.1 : Déplacements de la vague 1	73
Figure B.2 : Déplacements de la vague 2.....	74
Figure B.3 : Déplacements de la vague 3.....	75
Figure B.4 : Déplacements de la vague 4.....	76

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AGV	Automated Guided Vehicle
API	Application Programming Interface
ASC	Automated Stacking Cane
BIM	Building Information Modelling
BPMN	Business Process Model and Notation
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
MSE	Mean Squared Error
OFR	Order Fulfillment and Replenishment
OWL	Web Ontology Language
PI	Physical Internet
PME	Petite Moyenne Entreprise
RFID	Radio-frequency identification
RH	Resource Humaine
RV	Réalité Virtuelle
SKU	Stock Keeping Unit
SME	Small Medium Enterprise

TIS	Total Inbound Synchronization
UML	Unified Modelling Language
VV&A	Vérification, Validation et Accréditation
WMS	Warehouse Management System
3PL	Third-Party Logistics
5P	5 Pourquoi

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – Questionnaire	68
Annexe B – Cartes des déplacements	73

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 pris et soit régulièrement révisé (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'entreposage. 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 décentralisé 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'entreposage 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'entreposage 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 d'identification des éléments contextuels pertinents à intégrer à un JN en entreposage sera exposé au chapitre 4. Le chapitre suivant présentera nos résultats expérimentaux. En ce qui concerne le contexte expérimental, la méthodologie a été testée avec un modèle de simulation AnyLogic de base qui n'est pas encore utilisé par l'entreprise. 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.

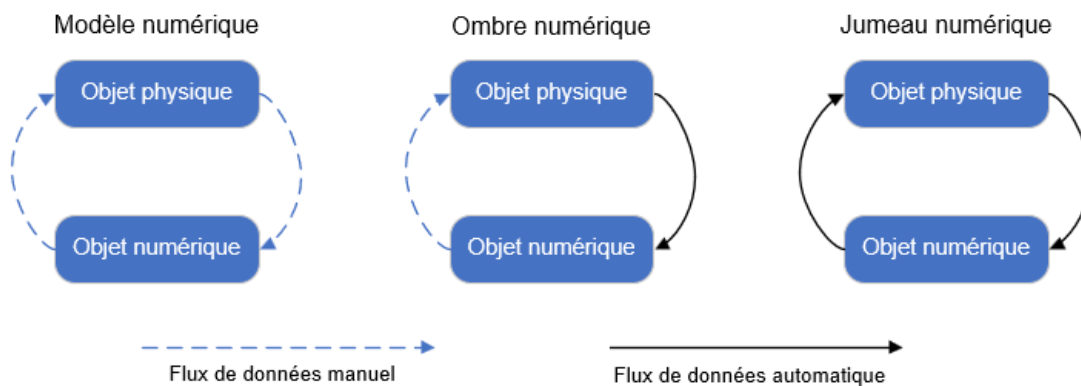


Figure 2.1 : Modèle, ombre et jumeau numériques (adapté de Kritzinger et al., 2018)

Le modèle numérique est une réplique statique bien qu'évolutive d'un système physique. Ce niveau se caractérise par un échange manuel de données entre le système physique et le modèle virtuel. Le second niveau est une ombre numérique. Le flux de données unidirectionnel du système physique vers le modèle virtuel permet de représenter l'évolution dans le temps de l'état 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 physiques 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) sont parvenus à classifier les données nécessaires en 10 types de paramètres d'entrée (voir le tableau 2.1). Quant à Kaiblinger et Woschank (2022), ils proposent de caractériser les données en fonction de leurs provenances (voir le 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 qualitatifs	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 informations contextuelles (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 qui offrent 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 ICs	O2
	Incorporer les ICs	O3
	Fournir des ICs	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 la 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.

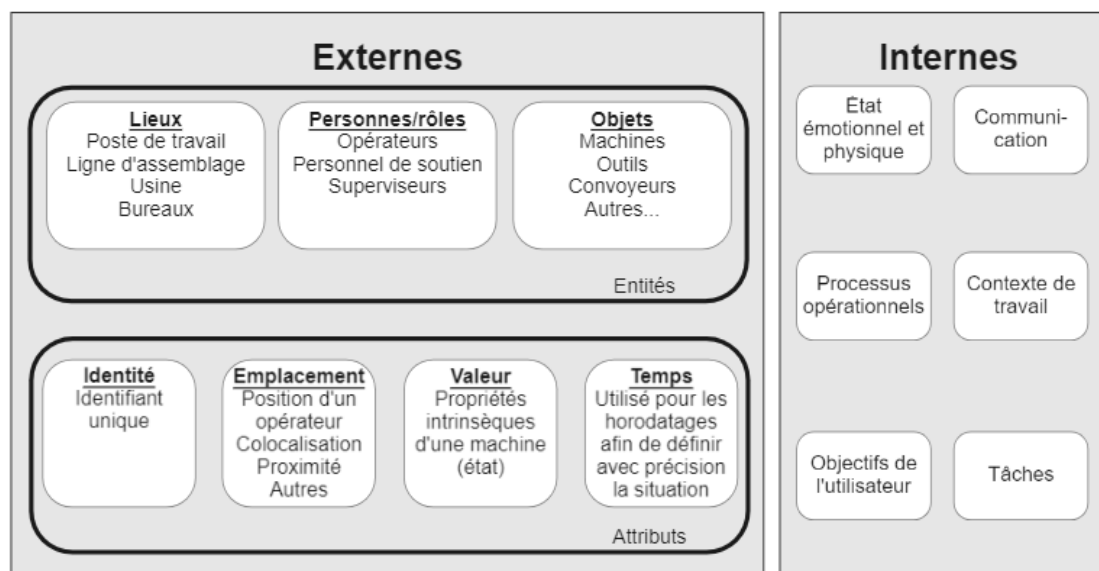


Figure 2.2 : Classification des données contextuelles (adapté d'Alexopoulos et al., 2016)

Néanmoins, les cas industriels bénéficieraient davantage d'une classification plus spécifique comme celle proposée par Rosenberger et Gerhard (2018) (voir le 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'ICs 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	-	-	∅	∅	∅	+
Modèle de balisage de schéma	+	++	-	-	+	++
Modèle graphique (UML)	∅	-	+	-	+	+
Modèle orienté objet	++	+	+	+	+	+
Modèle basé sur la logique	++	-	-	-	++	∅
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 la 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; et
- Accès aux données : Héberger une base de données contenant les informations pertinentes.

En ce qui concerne la couche de sensibilisation au contexte, elle remplit (Alexopoulos et al., 2016).

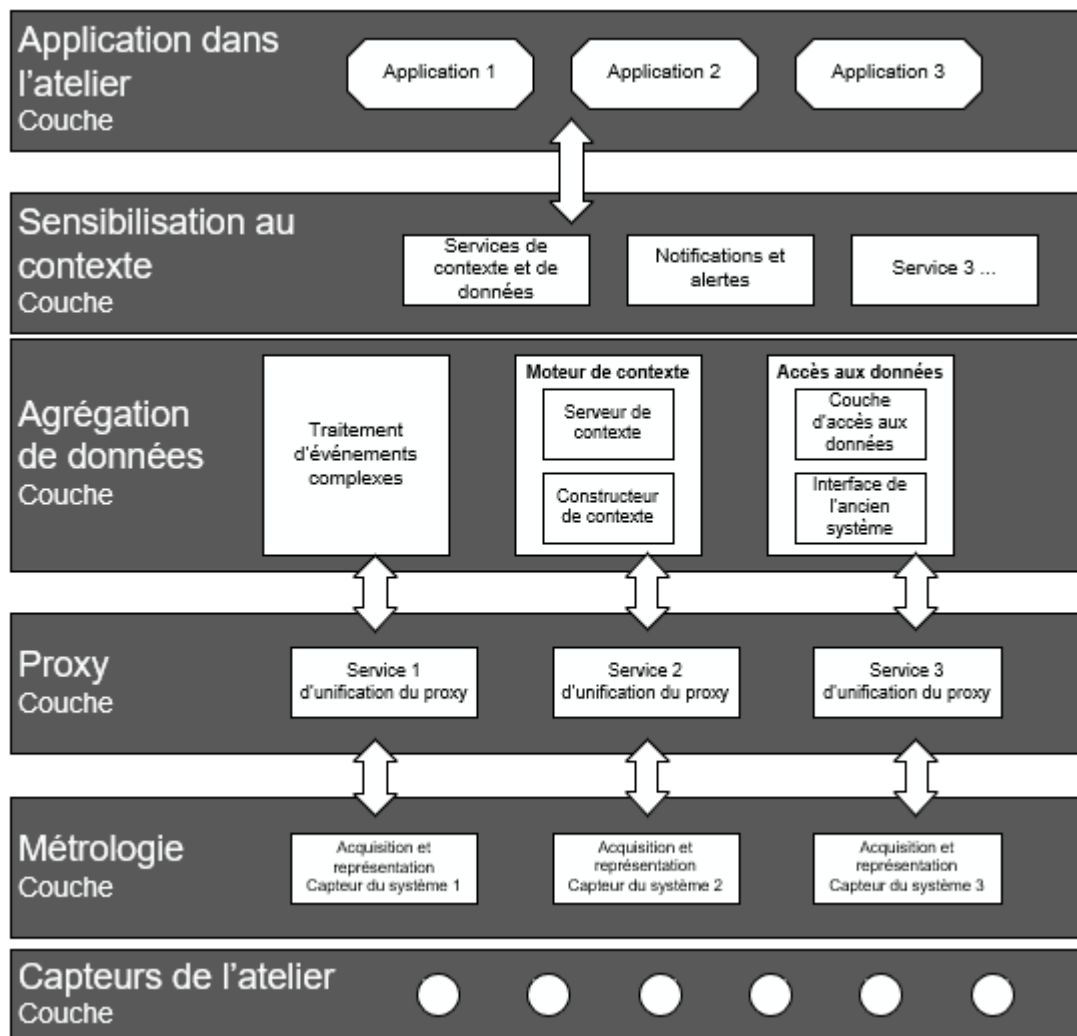


Figure 2.3 : Architecture du système de traitement et de distribution de l'IC (adapté d'Alexopoulos et al., 2016)

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 le 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 le 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 en suivant la méthodologie proposée par Tranfield et al. (2003). 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 exclus 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 le 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) montrent qu'un jumeau numérique d'un 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).

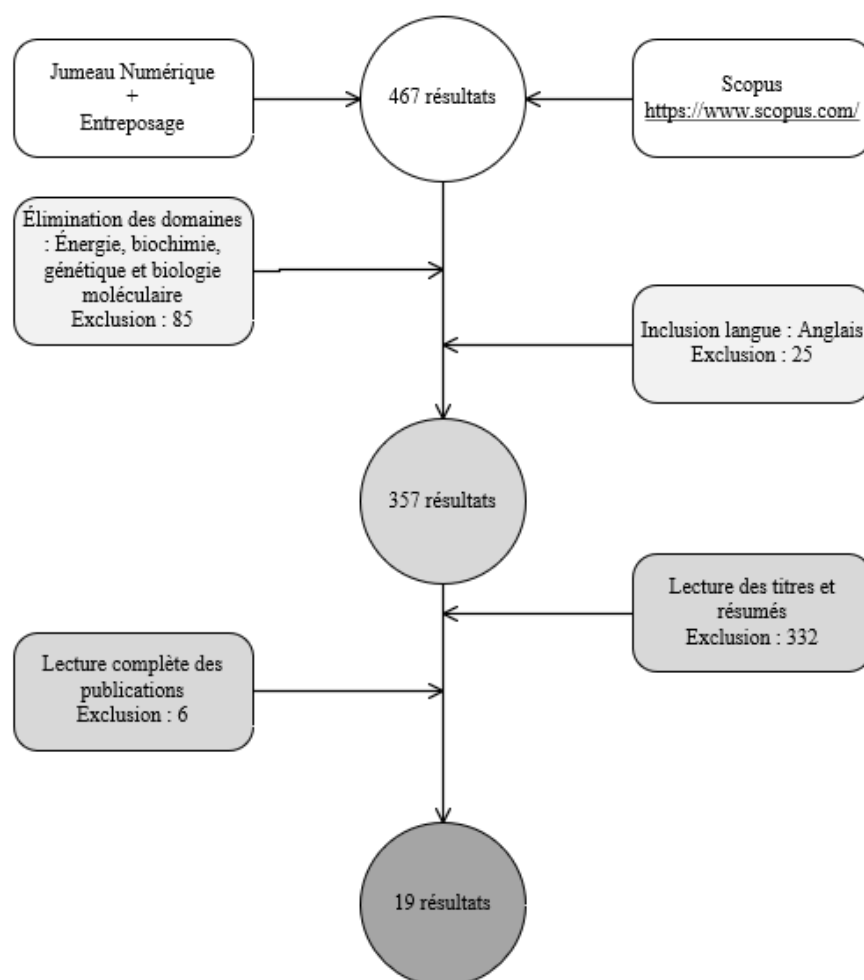


Figure 2.4 : Méthodologie de recherche

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 Hofsajer (2022)(*CAP7002-Stratégie de recherche à la maîtrise en génie (Module 1)*, 2022) (voir le tableau 2.10). Cet auteur définit trois types de méthode de recherche (quantitative, qualitative et mixe) 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 seule 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 basée 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 dynamiques 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

Tableau 2.10 : Classification générale des articles (suite et fin)

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 Algorithmes de détection des comportements immobiliers anormaux et de positionnement intérieur	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'entreposage dans un entrepôt automatisé	Algorithme de correspondance colis-emplacement 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 basés 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)	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'entreposage. 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 (voir le tableau 2.12). 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	Synchro- nisation	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
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 qualitatifs

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.

2.5 Analyse critique

Cette section souligne les faiblesses et les limitations identifiées dans la revue littéraire. 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 tel 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 les 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 deux (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.

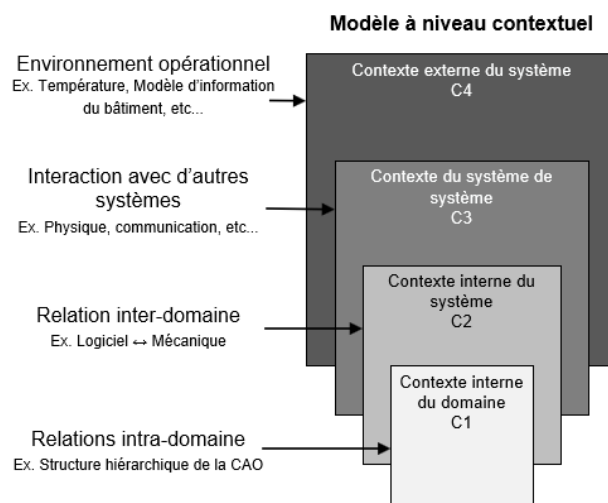


Figure 2.5 : Modèle de contexte (adapté de Sahlab et al., 2021)

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 spécifiques 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 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Ce chapitre précise les objectifs de recherche en solution à la problématique identifiée du projet. Ensuite, la méthodologie de recherche utilisée pour les atteindre est présentée.

3.1 Définition des objectifs de recherche

La revue de littérature décrite au chapitre 2 a permis de dégager la problématique de recherche suivante : *comment identifier les ICs pertinentes à intégrer à un JN dans un contexte de PME?* En fait, cette problématique est directement reliée à la perspective de recherche E8-Intégration des informations contextuelles identifiée par Hribernik et al. (2021). Le travail requis pour développer un JN performant est considérable surtout dans un contexte de PME où les ressources sont habituellement limitées. Un tel projet requiert non seulement des expertises variées, mais également des ressources financières importantes tout au long du développement du JN. Ces contraintes limitent les PME dans la sélection des capteurs à installer puisque capter des données inutiles au bon fonctionnement du JN peut s'avérer être très coûteux. Une approche plus ciblée et plus économique est souhaitable pour l'identification des ICs pertinentes à intégrer à un JN.

Pour répondre à cette problématique, l'objectif principal de ce projet est de *faciliter l'identification des ICs pertinentes à intégrer à un JN au sein d'une PME.*

Plusieurs sous-objectifs découlent de cet objectif principal :

- Sous-objectif 1 : Évaluer les apports potentiels d'intégrer des éléments contextuels à un JN;
- Sous-objectif 2 : Identifier et analyser les modèles d'identification des ICs existants;
- Sous-objectif 3 : Proposer une méthodologie d'identification des ICs pertinentes à intégrer à un JN; et
- Sous-objectif 4 : Quantifier le gain d'intégrer des ICs pertinentes sur la précision d'un JN.

3.2 Méthodologie de recherche

Voici la méthodologie de recherche proposée pour répondre à ces quatre sous-objectifs :

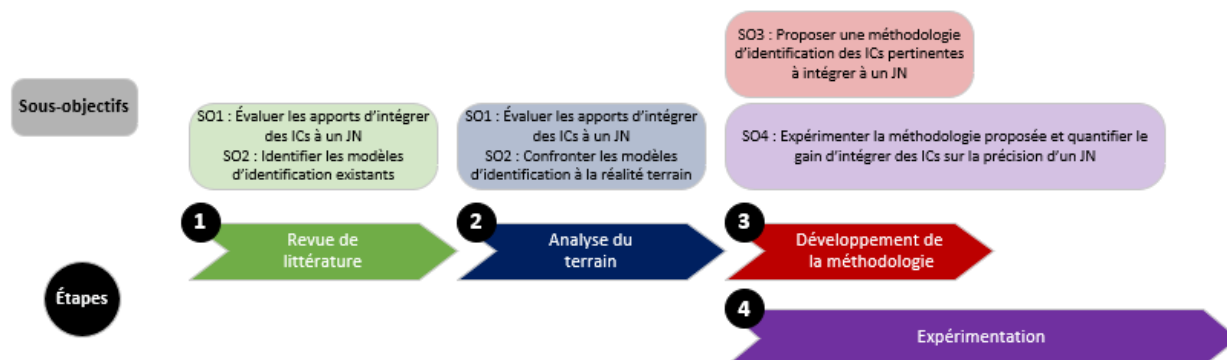


Figure 3.1 : Méthodologie de recherche suivie

Premièrement, pour atteindre le SO1, une revue de littérature portant sur les concepts de JN et d'entreposage a été menée. Tel qu'expliqué au chapitre 2, les travaux ont été critiqués notamment sur les fonctionnalités liées à la capacité de *context-awareness*. La littérature souligne clairement les apports de la capacité de prise en compte du contexte sur le fonctionnement d'un JN. Pour répondre au SO2, une recherche portant sur les modèles existants d'identification des ICs pertinentes à intégrer à un JN a été faite. Plus spécifiquement, les contributions de la méthodologie de conception d'un système intelligent prenant en compte le contexte de Bauer et Dey (2016) ont été analysées plus finement selon les objectifs du projet. Cela a permis de dresser le portrait actuel des connaissances scientifiques sur ce domaine qui par le fait même a confirmé la problématique ciblée dans ce travail. En ce qui concerne le SO3, la construction du modèle sera faite avec une approche de recherche intervention. La méthodologie proposée sera développée parallèlement à l'expérimentation en testant différentes méthodes.

Finalement, la réponse au SO4 sera atteinte par une étude de cas en partenariat avec une entreprise manufacturière au Québec. La méthodologie sera ainsi appliquée sur un cas réel à partir d'un modèle simulant les vagues de ramassage des produits finis à l'entrepôt en vue de l'expédition des commandes. Dans le cadre de ce mémoire, les étapes un à sept de la méthode proposée seront testées. La dernière étape d'implantation qui consiste à l'intégration technique de capteurs pour la collecte de données contextuelles pertinentes à intégrer au modèle de simulation ne sera pas réalisée. Cette étape est purement de la mise en œuvre et sort des objectifs académiques d'une

maîtrise recherche. Aussi, le processus décisionnel de l'entreprise à vouloir poursuivre l'intégration est trop long par rapport au délai de la maîtrise.

3.3 Conclusion

Pour conclure, le chapitre a précisé les objectifs et la démarche du travail de recherche. Cette démarche passe par une analyse de terrain et l'évaluation de la méthodologie proposée à partir d'un cas réel. Le prochain chapitre présentera la méthodologie développée pour l'identification des facteurs contextuels pertinents à un JN.

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE D'IDENTIFICATION DES INFORMATIONS CONTEXTUELLES PERTINENTES À UN JUMEAU NUMÉRIQUE

Ce chapitre a pour objectif de présenter la méthodologie d'intégration des informations contextuelles à un JN qui permet d'identifier les éléments du contexte pertinents à modéliser afin d'améliorer la précision du modèle de simulation. Dans un premier temps, la méthode générale proposée par Bauer et Dey (2016) est présentée. Chaque étape du modèle a été adaptée pour l'appliquer dans le cadre de ce projet de maîtrise. En guise de conclusion, les contributions du modèle sont présentées.

4.1 Modèle initial

Le modèle proposé se base sur la méthodologie de conception d'un système intelligent prenant en compte le contexte de Bauer et Dey (2016). Plus spécifiquement, l'article propose une démarche en 8 étapes pour soutenir les concepteurs de systèmes dans leurs tâches. Cette méthode présente un intérêt pour le projet principalement pour deux raisons. Premièrement, leur modèle est suffisamment général pour s'appliquer à plusieurs systèmes d'information, dont ceux utilisant la technologie du JN. Deuxièmement, cette méthode vise à concevoir des systèmes ayant des fonctionnalités liées au *context-awareness* qui s'avère être la principale capacité recherchée pour le JN dans le cadre de ce projet. Grâce aux entretiens effectués avec des concepteurs expérimentés, les auteurs ont fait ressortir « la manière dont les concepteurs identifient, sélectionnent et prennent en compte le contexte tout au long du processus de conception » (Bauer & Dey, 2016) (voir les figures 4.1 et 4.2). Cela étant dit, la modélisation du contexte est très peu réalisée en pratique (Falcao et al., 2021). Bien que les concepteurs reconnaissent l'importance des étapes 4.1 et 4.2, elles sont non intuitives et exigeantes en temps (Falcao et al., 2021). Cette même critique peut être faite à l'ensemble de la méthodologie de Bauer et Dey (2016) surtout dans un contexte d'application au sein d'une PME où les ressources sont habituellement limitées. De plus, lorsque le contexte est modélisé, peu de bénéfices sont perçus (Falcao et al., 2021). En considérant que l'analyse d'identification des éléments contextuels ait manqué de rigueur en raison de diverses contraintes, il est fort probable que les éléments contextuels intégrés au système ne soient pas les plus pertinents et les plus représentatifs d'une situation donnée ce qui pourrait entraîner l'absence

de bénéfice perçu. En effet, une modélisation des éléments contextuels non appropriés représente non seulement une charge de travail supplémentaire pour les concepteurs et également un nombre plus important d'informations à traiter pour les opérateurs. Somme toute, la contribution de Bauer et Dey (2016) est fort intéressante pour les objectifs du projet. Sur cette base, une nouvelle méthodologie sera proposée spécifiquement pour une application d'entreposage au sein d'une PME. Cet élément distinctif du modèle permettra d'accélérer ou d'éliminer certaines étapes du modèle initial. Le but est de restreindre l'univers de contexte à considérer afin d'orienter davantage l'usager dans l'identification des ICs pertinentes à modéliser. Bien entendu, le modèle proposé sera implanté dans un JN ce qui teintera également chacune des étapes.

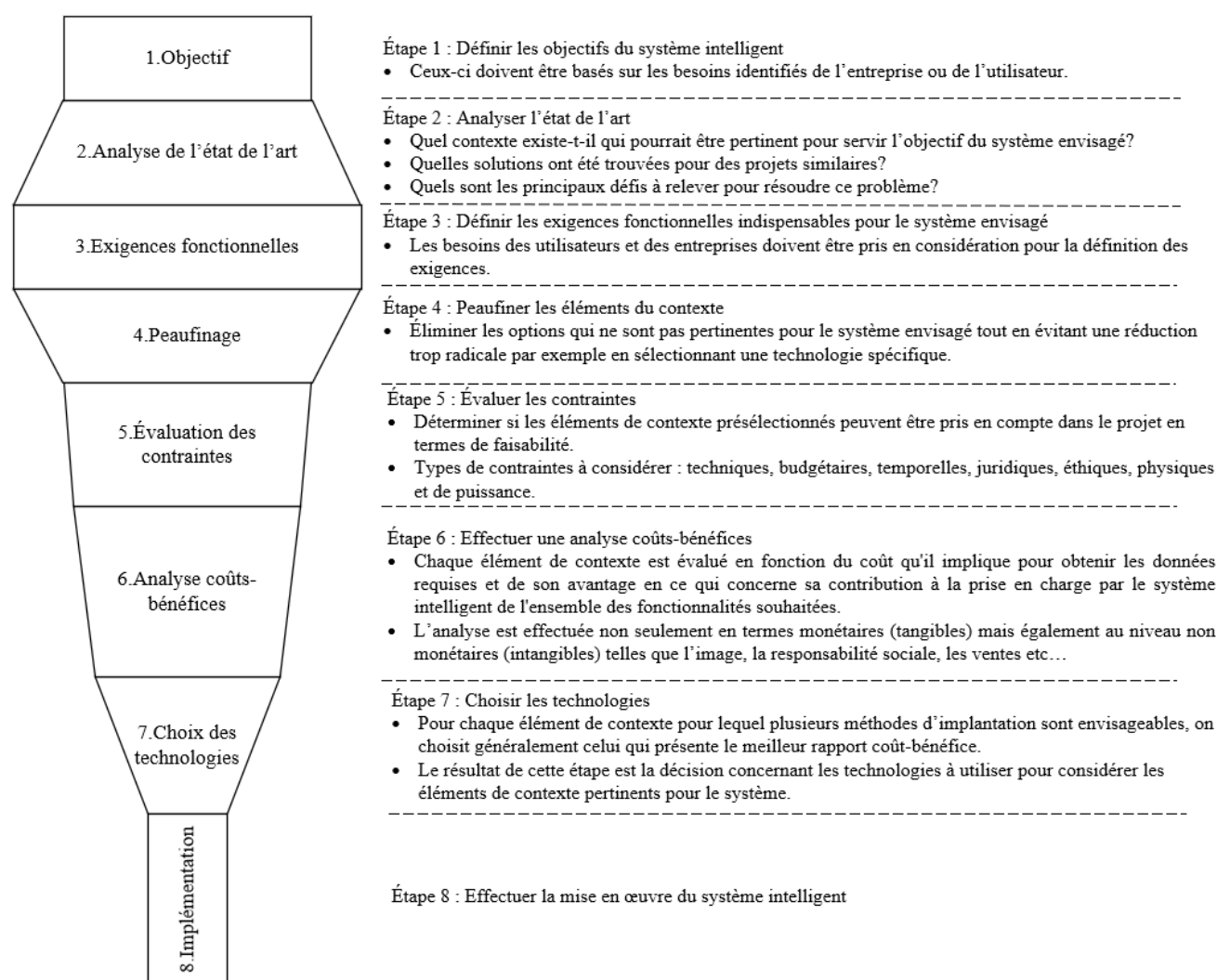


Figure 4.1 : Méthodologie de conception d'un système intelligent prenant en compte le contexte
(adapté de Bauer & Dey, 2016)

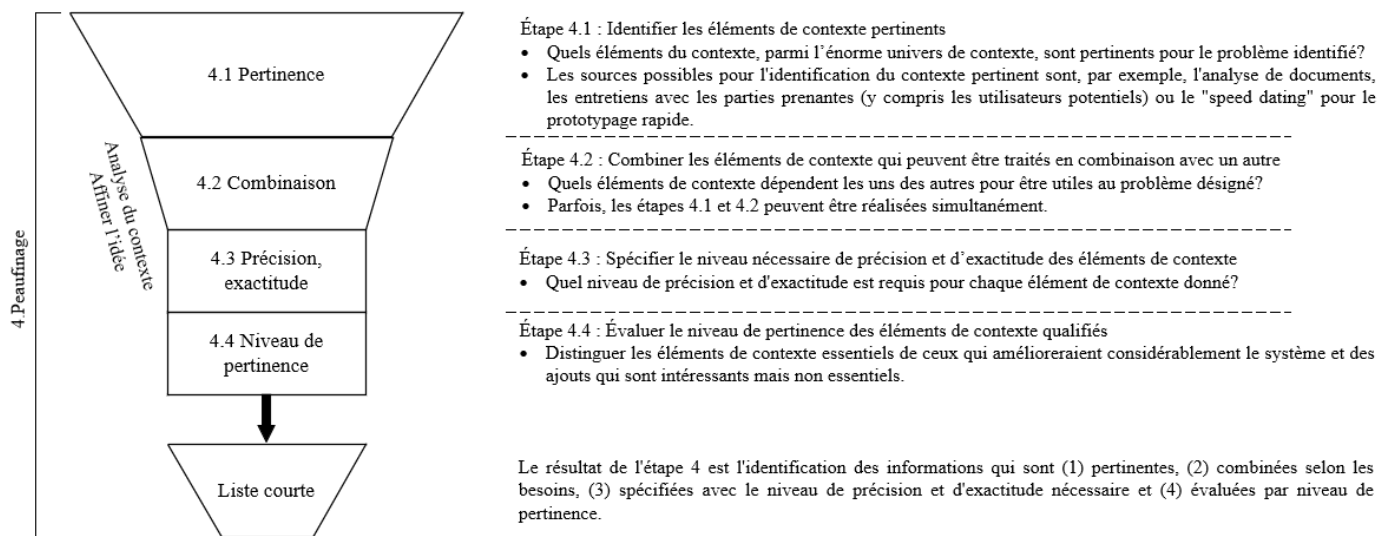


Figure 4.2 : Étape 4 de la méthodologie de conception d'un système intelligent prenant en compte le contexte (adapté de Bauer & Dey, 2016)

4.2 Modèle proposé

La méthodologie proposée vise à outiller les concepteurs dans l'identification des ICs pertinentes à intégrer à un JN existant. Celle-ci comprend huit étapes (voir la figure 4.3), dont chacune sera expliquée aux sections suivantes. À noter que cette méthode est applicable lorsqu'un JN du système physique d'intérêt est disponible, peu importe son niveau de maturité. Cet aspect diffère du modèle de Bauer et Dey (2016) qui est utilisé non seulement pour l'identification des ICs pertinentes, mais également pour la conception d'un système intelligent. Cela va sans dire qu'en industrie, la conception d'un JN d'entreposage fonctionnel est un long processus de développement. Plusieurs projets de transformation numérique sont souvent nécessaires avant d'envisager un tel projet. La faisabilité d'un projet de JN exige non seulement d'être en contrôle de son processus notamment grâce aux technologies de l'Industrie 4.0, mais également d'avoir accès à des ressources compétentes. Bien que la capacité de *context-awareness* soit fort utile pour un fonctionnement optimal d'un JN, l'ajout de telles fonctionnalités ne fait généralement pas partie des priorités lors du démarrage de la conception. Il paraît plus réaliste pour l'industrie de donner au JN des capacités de prises en compte du contexte lors d'une phase ultérieure de développement, soit lorsqu'un modèle numérique fonctionnel est disponible. En fait, le modèle de Bauer et Dey (2016) semble plus approprié pour des systèmes relativement moins complexes comme une application mobile.

La grande complexité d'un JN n'est donc pas compatible avec leur modèle. Les étapes du modèle proposé dans le cadre de ce projet ont été modifiées conséquemment.

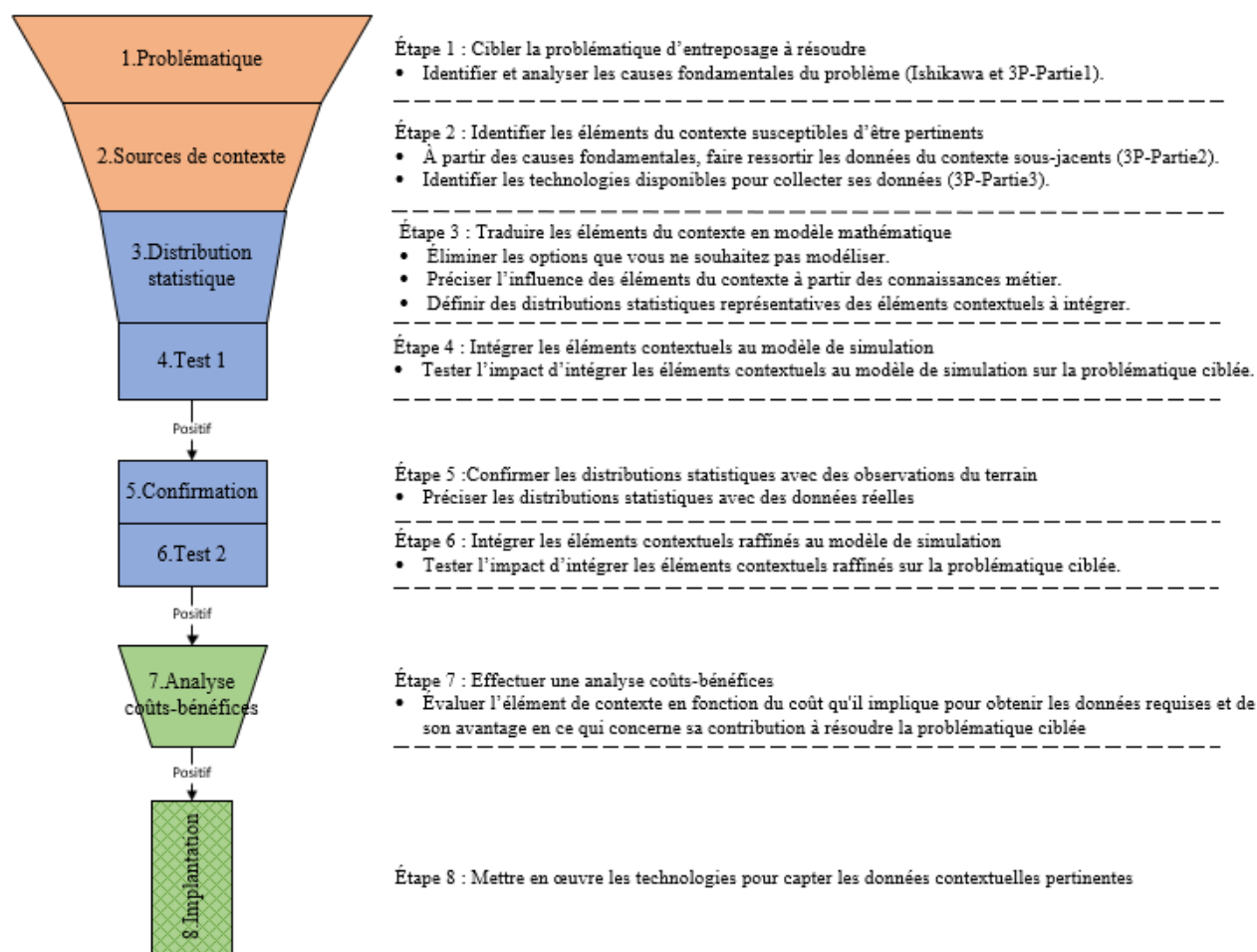


Figure 4.3 : Méthodologie d'identification des informations contextuelles pertinentes à intégrer à un JN (adapté de Bauer & Dey, 2016)

4.2.1 Étape 1 : Problématique

La première étape du modèle consiste à cibler la problématique d'entreposage à résoudre. L'idée est d'identifier ce que l'on souhaite obtenir ou plutôt ce que l'on tente de résoudre grâce à l'ajout d'ICs au modèle. Autrement dit, cette étape permet de réfléchir sur le besoin d'intégrer des ICs pour une application donnée. Il s'agit non seulement d'identifier la problématique, mais également d'en préciser sa nature grâce à l'analyse des causes fondamentales du problème. Un diagramme d'Ishikawa est un excellent outil pour enligner la discussion de remue-méninges des causes (Liliana, 2016). Puisque cet outil est structuré autour des 5M (matière, matériel ou machine,

méthode, main-d'œuvre, milieu), il permet de s'assurer que toutes les facettes du sujet soient couvertes. Plusieurs facteurs peuvent impacter sur le succès d'un atelier Ishikawa. Notamment, la capacité de l'animateur à créer un milieu de discussion participatif et respectueux est sans équivoque un facteur déterminant. Aussi, la richesse des idées partagées est acquise grâce à la participation d'individus ayant différents profils. Idéalement, les employés exécutant les tâches d'intérêt doivent être inclus dans ce type de discussion pour leurs perspectives uniques du terrain qu'ils apportent.

À la suite de l'atelier Ishikawa, plusieurs causes du problème seront identifiées. Ces causes peuvent être de différents niveaux. Par exemple, une cause peut en réalité être l'effet d'une autre cause. Il est possible d'identifier les relations qu'elles peuvent avoir entre elles en les structurant de façon hiérarchique. Pour ce faire, l'atelier des 3P est recommandé. Cette technique simple consiste à se poser trois fois la question : pourquoi? Vous arriverez rapidement à obtenir une structure en trois niveaux de causes. La méthodologie Lean standard comprend 5P. Toutefois, pour éviter que l'exercice tourne en rond et que l'humain devienne systématiquement la cause des problèmes, il est plus pertinent d'arrêter à un niveau supérieur (Consuunt). Cet atelier peut être effectué seul en se rapportant aux causes identifiées grâce à l'atelier Ishikawa. Si nécessaire, une validation de la hiérarchie auprès d'un employé de l'entreprise peut être effectuée. L'objectif de cet exercice est d'identifier des causes fondamentales de niveau suffisamment bas qui permettront facilement de faire ressortir les sources de contexte associées lors de la prochaine étape. Il est recommandé d'effectuer l'atelier Ishikawa avant celui des 3P. Les idées générées grâce à l'atelier Ishikawa vont orienter la structure hiérarchique lors du 3P.

4.2.2 Étape 2 : Sources de contexte

La deuxième étape consiste à identifier les éléments du contexte susceptibles d'être pertinents. À partir des causes fondamentales ressorties à l'étape précédente, il faut identifier les données du contexte sous-jacent. Cette tâche est très intuitive puisqu'il suffit de déduire les ICs liées aux causes du problème. Bien entendu, la qualité de l'analyse effectuée à l'étape un impactera directement sur les ICs ressorties. À cette étape, une liste d'ICs potentielles doit être générée. L'évaluation de la pertinence des ICs n'est pas considérée à cette étape. Il faut également identifier les technologies disponibles pour collecter ses données. Des exemples de capteurs peuvent être listés. Il n'est pas

nécessaire de faire une analyse des technologies très rigoureuse. L'idée est de permettre un début de réflexion sur la manière d'obtenir les données d'intérêt du contexte.

4.2.3 Étape 3 : Distribution statistique

La troisième étape vise à traduire les éléments du contexte identifié à l'étape précédente en modèle mathématique. Une option d'IC peut être éliminée si les concepteurs ne souhaitent pas la modéliser ou s'ils ne peuvent pas la considérer pour le projet. Pour y parvenir, il faut préciser l'influence des éléments du contexte à partir des connaissances du terrain. Il n'est pas nécessaire d'obtenir des réponses exactes basées sur des données réelles. Il faut plutôt obtenir les impressions qui ressortent du terrain sur la façon dont les éléments du contexte influencent la problématique ciblée. Une discussion avec un expert du milieu peut fournir l'ensemble des informations nécessaires pour permettre de modéliser mathématiquement les ICs. En fait, les connaissances métier doivent permettre d'émettre des hypothèses sur la distribution statistique des éléments du contexte. Des exemples d'informations intéressantes à obtenir sont la fréquence d'apparition d'un événement et sa durée. Bref, la finalité de cette étape est un modèle mathématique pour chaque élément contextuel à analyser.

4.2.4 Étape 4 : Test 1

La quatrième étape comprend l'intégration de l'élément contextuel au modèle de simulation. La phase de tests peut inclure diverses expérimentations. Notamment, il est possible d'intégrer un élément contextuel pour isoler son impact sur la problématique ciblée. L'impact de la combinaison des facteurs peut également être testé. Il est important de définir une manière d'intégrer les éléments du contexte au modèle de simulation qui soit cohérente avec la réalité. Concrètement, il s'agit d'une étape de modélisation de l'élément contextuel en utilisant le modèle mathématique défini à l'étape trois.

4.2.5 Étape 5 : Confirmation

Advenant le cas que l'élément contextuel intégré au modèle de simulation ait un impact positif sur la problématique ciblée, il faut confirmer le modèle mathématique avec des observations du terrain. Une collecte de données est nécessaire pour préciser la distribution statistique de l'élément contextuel. Un modèle mathématique raffiné sera alors défini. Bien entendu, les éléments

contextuels n'ayant aucun impact sur la problématique ciblée ne requièrent pas d'investigation supplémentaire.

4.2.6 Étape 6 : Test 2

L'étape six est essentiellement la même que la quatrième. En fait, le test s'effectue plutôt avec le modèle mathématique raffiné ce qui a principalement pour but de préciser le modèle de simulation. Si le modèle mathématique raffiné n'apporte aucun gain par rapport à la problématique ciblée, il est inutile de procéder à l'analyse coûts-bénéfices. Cependant, si un impact positif est encore remarquable, cela confirme la pertinence de capter cette donnée.

4.2.7 Étape 7 : Analyse coûts-bénéfices

Tel que mentionné à l'étape précédente, les bénéfices sont déterminés par l'entremise du modèle de simulation. Afin de compléter l'analyse coûts-bénéfices, il faut déterminer le coût pour obtenir la donnée requise. Ainsi, une recherche rigoureuse portant sur les technologies disponibles pour collecter la donnée devra être menée. Cette analyse fournira aux décideurs un outil d'aide à la décision quant à la poursuite ou non de l'implantation du capteur.

4.3 Conclusion

Une méthodologie d'identification des ICs pertinentes à intégrer à un JN existant a été proposée. À notre connaissance, il s'agit du premier modèle qui propose de traduire les éléments contextuels en modèle mathématique grâce à des connaissances du terrain. Cette méthodologie s'inspire du modèle de Bauer et Dey (2016) pour la conception d'un système intelligent prenant en compte le contexte. Un aperçu des modifications apportées au modèle initial est disponible à la figure 4.4. Les étapes gris foncé ont été reprises dans le modèle proposé contrairement à celles en gris pâle. De plus, la signification des couleurs pour le modèle proposé est la suivante : Orange = Modifications apportées à l'étape initiale; Bleu = Nouvelle étape; Vert = Étape existante.

En résumé, cette méthodologie utilise les connaissances métier pour identifier les facteurs pouvant impacter la problématique ciblée. Aussi, la démarche proposée tire avantage du modèle de simulation existant pour tester l'impact d'intégrer des éléments contextuels dans un environnement virtuel. Cette méthodologie simple à suivre pourra servir de guide de référence pour identifier quels

CHAPITRE 5 EXPÉRIMENTATION

Ce chapitre présente le projet réalisé en collaboration avec une entreprise manufacturière québécoise dont le but était d'expérimenter la méthodologie d'identification des ICs pertinentes à intégrer à un JN. D'abord, le cas d'application du projet est décrit. Ensuite, les résultats de l'expérimentation menée ainsi que les limites de l'étude seront détaillés.

5.1 Présentation de l'étude de cas

Par souci de confidentialité, ce mémoire nommera l'entreprise par le nom fictif ABC inc. L'étude de cas se concentre uniquement sur son processus d'entreposage. Plus spécifiquement, la préparation des commandes est l'activité d'intérêt. L'objectif d'ABC inc. est de réduire le temps de ramassage des vagues. Une vague correspond à une série de déplacements pour aller chercher les produits devant être expédiés. Les vagues sont générées automatiquement selon les différentes priorités établies par l'entreprise. Par exemple, une priorité est accordée aux commandes web. Une vague de ramassage comprend généralement entre 22 et 26 produits finis à ramasser pour une moyenne de 24.

Un logiciel WMS fait maison est utilisé pour la gestion des opérations d'entreposage. Les opérateurs y ont accès grâce à des tablettes numériques. Une explication détaillée du déroulement d'une vague de ramassage suivra. Un opérateur accepte une vague de ramassage via l'application WMS. Il va chercher un chariot disponible au centre de l'entrepôt. Il scanne son chariot et commence sa vague de ramassage. Il suit l'ordre de la liste de ramassage qui lui indique quel produit, la quantité et la localisation du produit à ramasser. Il marche vers la première localisation suggérée. Une fois arrivé, il recherche la boîte dans l'alvéole. Lorsqu'il trouve le produit, il le scanne et le met sur son chariot. Il procède de la même manière pour les produits suivants dans sa liste. Si un produit est manquant, l'opérateur passe à la prochaine localisation disponible. Advenant le cas qu'aucune localisation supplémentaire ne soit indiquée, il doit chercher le produit dans l'entrepôt. Lorsque la vague de ramassage est complétée, il va porter son chariot au centre de l'entrepôt. Il appelle l'AGV qui déplace le chariot à la zone d'expédition.

ABC inc. possède une base de données centralisée dans laquelle la traçabilité complète de l'inventaire et les temps de ramassage des vagues sont enregistrés depuis avril 2021. Aussi, parallèlement à ce projet de maîtrise, un modèle de l'entrepôt simulant les vagues de ramassage a

été réalisé par un autre chercheur avec le logiciel AnyLogic. L'historique des vagues de ramassage ainsi que le positionnement exact de l'inventaire alimentent le modèle de simulation qui agit donc en tant qu'émulateur. De plus, les hypothèses suivantes ont été émises lors de la conception du modèle : la vitesse de marche des opérateurs est fixe à 1.6 m/s (Buell, 2014) et le temps de ramassage des produits suit une loi triangulaire de 10, 15 et 20 secondes. Autrement dit, uniquement les deux variables suivantes sont considérées dans le modèle : la vitesse de déplacement ainsi que le temps de ramassage.

5.2 Présentation des résultats

Avant le commencement de l'expérimentation, certaines activités ont été réalisées au préalable. Notamment, une visite de l'entrepôt de l'entreprise ABC inc. a été effectuée par l'équipe. Aussi, l'équipe a pu valider l'objectif du projet grâce à la technique de triangulation. Concrètement, 3 superviseurs de différents niveaux hiérarchiques ont été interrogés individuellement concernant les problèmes perçus au niveau de l'entreposage. Tous ont souligné la nécessité de réduire le temps de ramassage des vagues. Cet objectif ne provient pas d'un manque de capacité, mais bien d'un désir d'être plus performant. En réalité, l'entreprise ABC inc. souhaite tirer profit de la baisse de la demande causée par la covid pour améliorer leur processus de préparation des commandes. Des cartographies BPMN ont également été réalisées pour les activités d'intérêt. L'équipe avait donc acquis des connaissances sur le processus d'entreposage de l'entreprise au commencement de l'étape un de la méthodologie.

5.2.1 Étape 1 : Problématique

Il est important de mentionner que l'expérimentation a été effectuée dans un contexte où l'objectif de l'entreprise est différent en soi de l'objectif de ce mémoire. Plus précisément, l'entreprise souhaite minimiser le temps de ramassage des vagues. Un modèle de simulation a été proposé à l'entreprise afin d'évaluer différents scénarios sans impacter leurs opérations. Plusieurs paramètres peuvent influencer le temps de ramassage des vagues tels que la politique de positionnement de l'inventaire, la politique de création des vagues ainsi que l'ordonnancement du trajet. Le travail réalisé par Ferreira va directement en ce sens. Le modèle de simulation qu'il a conçu permet d'évaluer la performance de deux politiques de positionnement de l'inventaire, soit le stockage aléatoire et le stockage par classes ABC. Toutefois, avant de procéder à des analyses de

performance de scénarios, une étape de validation du modèle est requise. Tel que mentionné à la section 2.2.1 de la revue de littérature, la validation du modèle de simulation est essentielle pour dégager des résultats avec confiance. La capacité du modèle à simuler des temps de vagues semblables aux vagues réelles est une méthode de validation appropriée.

Une étape de traitement des données a été requise avant d'évaluer la précision du modèle de simulation. Au niveau des données historiques des vagues réelles, on constate des incohérences lorsqu'une pause vient interrompre le déroulement d'une vague (141 vagues). En fait, l'heure indiquée pour le début de la vague est l'heure à laquelle l'employé recommence la vague à son retour de pause. La durée du premier déplacement de la vague étant inconnue, cela empêche un calcul précis du temps réel de la vague. Aussi, des erreurs dans l'heure de début et de fin des vagues sont constatées (80 vagues), par exemple, lorsque l'heure de ramassage d'un produit pour une vague se produit hors de l'intervalle de temps du déroulement de cette vague. En ce qui concerne le modèle de simulation, bien que l'historique des déplacements soit un paramètre d'entrée du modèle, des écarts sont observables dans les localisations simulées (265 vagues). En fait, des vagues peuvent avoir des localisations erronées et/ou des séquences de déplacement désordonnées comparativement aux données des vagues réelles. Des incohérences dans la séquence de déplacement des vagues simulées sont également présentes dans les résultats de la simulation (55 vagues). Ceci s'applique, par exemple, lorsque la localisation de destination ne correspond pas à la localisation de départ du prochain déplacement. À noter que certaines vagues peuvent contenir plus de deux types d'erreurs. Pour simplifier la gestion de la qualité des données, uniquement les vagues sans erreur tant au niveau des données réelles qu'au niveau des résultats de la simulation ont été conservées. Plus spécifiquement, parmi les 715 vagues simulées, 368 vagues sont conservées pour la suite de l'analyse.

La précision du modèle a donc été évaluée à partir des données historiques et simulées de 368 vagues. La figure 5.1 montre que le modèle simule à la baisse les temps de vagues (moyenne des temps de vagues simulées : 9.070 min; moyenne des temps de vagues réelles : 13.753 min). Cela a du sens puisque peu de facteurs du monde réel ne sont pris en considération dans le modèle. Dans ce même ordre d'idée, on constate également que les résultats de la simulation montrent très peu de variabilité comparativement aux données réelles, ce qui est cohérent avec les données d'entrée du modèle. Cela étant dit, des écarts non négligeables de plus de 8 minutes entre les temps de vagues simulées et réelles sont observables dans les données (voir la figure 5.2). En fait, la moyenne

des écarts est de 4.68 min. Sans aucun doute, le modèle de simulation ne prend pas en considération l'entièreté des facteurs pouvant impacter la durée des vagues de ramassage. Prenons par exemple des erreurs de positionnement de l'inventaire qui exigeraient un temps de recherche additionnel pour retrouver un produit perdu dans l'entrepôt. À ce sujet, les facteurs pouvant impacter les résultats du modèle feront l'objet d'une analyse détaillée un peu plus loin à cette étape de la méthodologie. En ce qui concerne la capacité du modèle à simuler avec précision la durée des vagues, les résultats confirment qu'elle n'est pas atteinte. Plus spécifiquement, l'imprécision initiale du modèle est de 34.1 % en utilisant le calcul suivant :

$$\text{Imprécision (\%)} = \frac{\text{Moyenne des vagues réelles} - \text{Moyenne des vagues simulées}}{\text{Moyenne des vagues réelles}} \times 100.$$

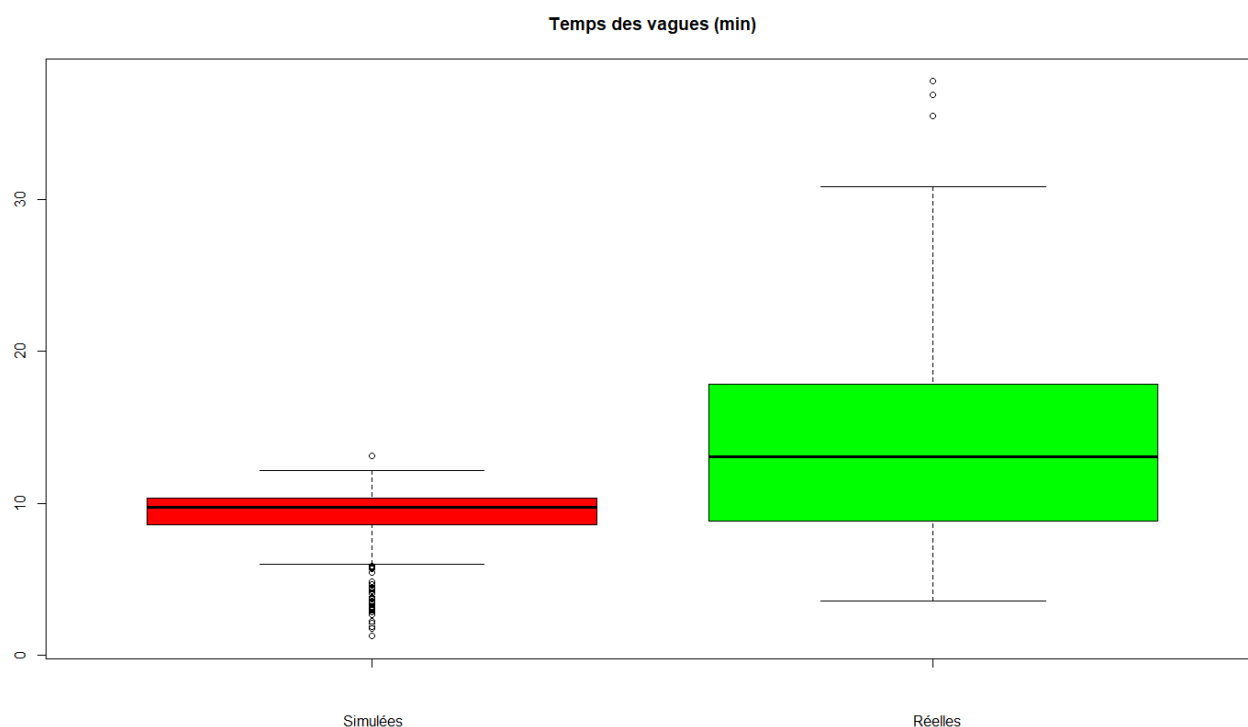


Figure 5.1 : Temps des vagues simulées et réelles (min)

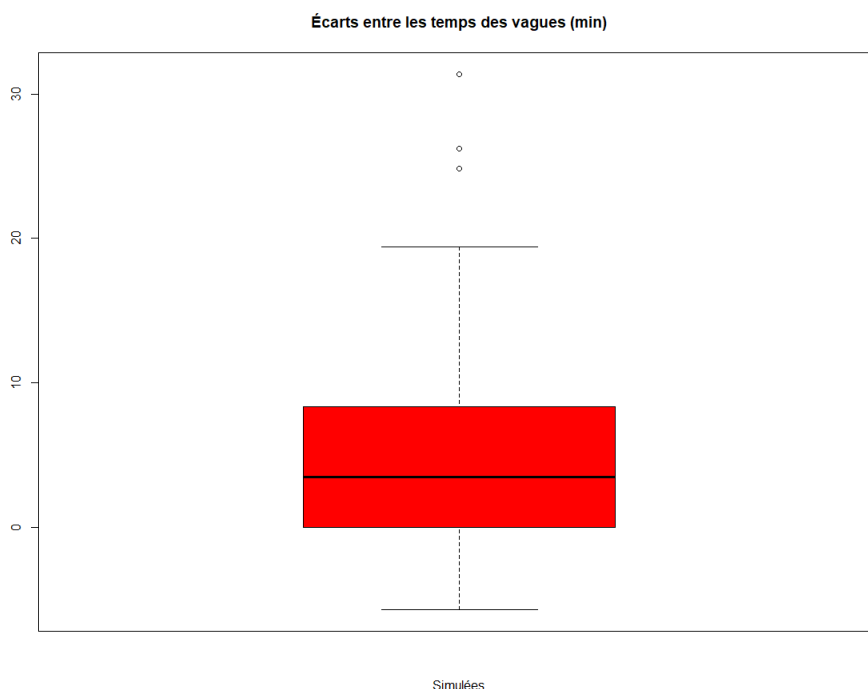


Figure 5.2 : Écarts entre les temps de vagues simulées et réelles (min)

La problématique à résoudre est donc la présence d'écarts entre les temps de vagues simulées et réelles. Des éléments contextuels pertinents seront considérés pour les intégrer au modèle de simulation afin d'augmenter la précision du modèle de simulation. Ainsi, l'objectif académique de ce travail est d'identifier les éléments contextuels pertinents permettant de réduire l'écart entre les temps des vagues simulées et réelles.

Une fois la problématique identifiée, un diagramme Ishikawa (voir la figure 5.3) a été complété pour identifier les causes fondamentales du problème. L'atelier a duré 3.5h et a été réalisé aux locaux d'ABC inc. Six participants étaient présents durant l'atelier dont 3 directeurs/superviseurs de différents niveaux hiérarchiques, un développeur informatique et un animateur d'expérience externe à l'entreprise. Malheureusement, il n'a pas été possible d'obtenir la participation d'employés exécutant le travail de ramassage des vagues à temps plein. Toutefois, les 3 superviseurs ont déjà exécuté ce travail durant quelques heures. Ils ont donc une bonne connaissance des tâches à réaliser et de leurs contextes de réalisation. L'objectif de l'entreprise étant différent de celui de ce mémoire, il a été difficile pour l'animateur de centrer la discussion sur la problématique précisée. La discussion tournait autour des problèmes présents en entreposage plutôt qu'uniquement sur la présence d'écarts entre les temps des vagues simulées et réelles. Les éléments hors sujet ont été retirés du diagramme puisque le contexte ne semblait pas représentatif

dû à l'inefficacité du processus. Autrement dit, ce qui ressortait du diagramme était les méthodes de fonctionnement non optimales des opérations d'entrepôt. À la lecture de l'Ishikawa, il est difficile d'identifier les éléments contextuels représentatifs des causes fondamentales des écarts possiblement en raison de la présence de relations de cause à effet entre les facteurs.

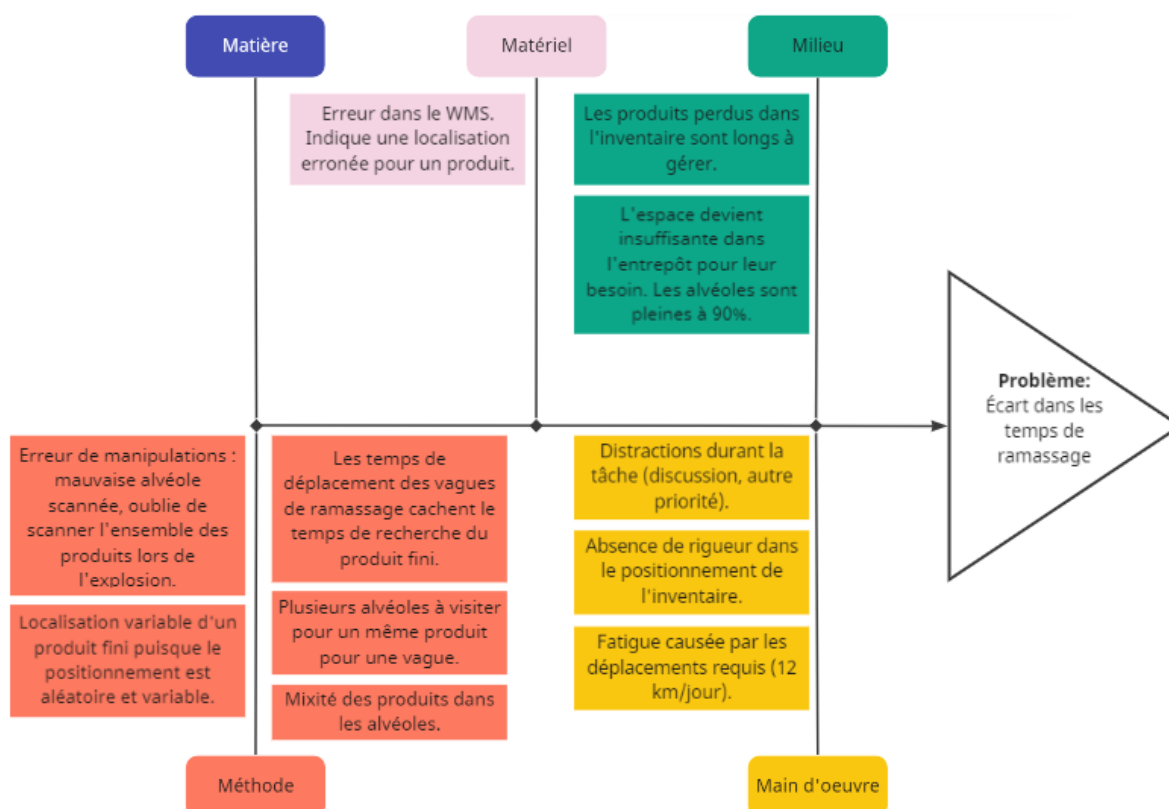


Figure 5.3 : Ishikawa des écarts dans les temps de ramassage des vagues

Pour rendre l'identification des ICs plus intuitive, un atelier 3P (voir la figure 5.4) a été réalisé en collaboration avec l'un de mes collègues de travail. L'identification des causes du premier niveau a exigé une plus grande réflexion. Ces éléments n'ont pas été mentionnés durant l'atelier Ishikawa puisque la discussion avait manqué de profondeur à ce propos. Cela étant dit, à partir de nos connaissances du fonctionnement du modèle de simulation et du processus de ramassage des produits, deux causes possibles expliquant les écarts entre les temps de vagues simulées et réelles ont pu être formulées. Les causes de plus bas niveau ont facilement été identifiées grâce aux facteurs ressortis lors de l'atelier Ishikawa qui ont été restructurés selon une notion de causalité. En général, cet exercice d'une durée de 2h a été relativement simple à compléter. Les causes de niveau trois serviront à la prochaine étape pour identifier les ICs pertinentes à la problématique ciblée.

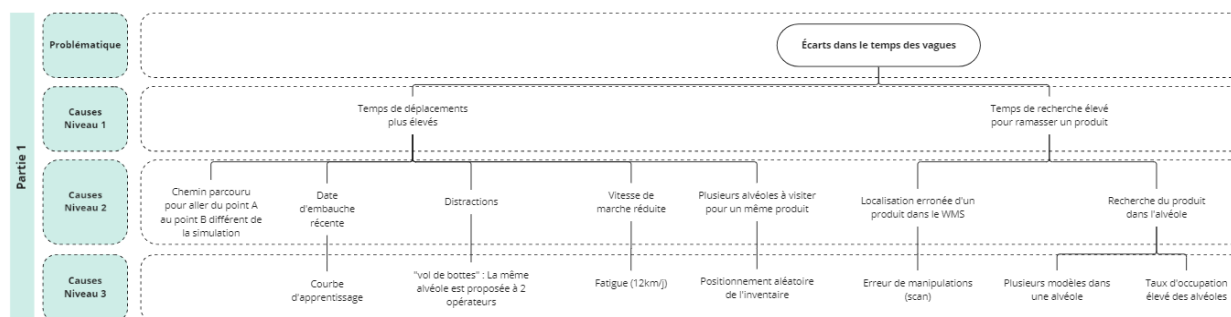


Figure 5.4 : 3P – Partie 1

5.2.2 Étape 2 : Sources de contexte

En quelques minutes seulement, les données du contexte ont été déduites à partir des causes fondamentales du problème (voir la figure 5.5 – Partie 2). Cette étape est plutôt intuitive puisque les ICs découlent naturellement des causes. Il faut lister toutes les ICs qui vous semblent être intéressantes pour le projet. Une réflexion d'une trentaine de minutes a également été effectuée concernant les technologies disponibles pour capter ces données (voir la figure 5.5 – Partie 3). Le tableau 5.1 résume les ICs ressorties grâce à cette étape.

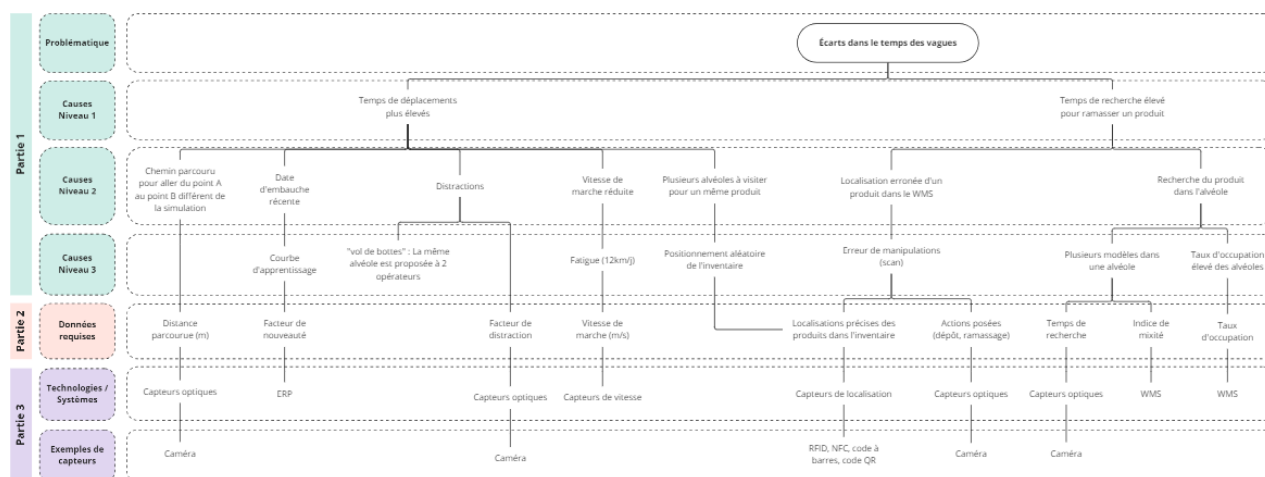


Figure 5.5 : 3P – Partie 1, 2 et 3

Tableau 5.1 : Options de données requises

	Données	Explications
A	Distance parcourue (m)	Distances de déplacement réelles des opérateurs durant une vague de ramassage
B	Facteur de nouveauté	Temps induit par le facteur de courbe d'apprentissage d'un nouvel opérateur à réaliser les vagues de ramassage
C	Facteur de distraction	Temps induit par des distractions (placotage ou autres) lors de la vague de ramassage
D	Vitesse de marche (m/s)	Vitesse de marche de l'opérateur lors d'une vague de ramassage
E	Localisations des produits	Localisations précises des produits dans l'inventaire
F	Actions posées	Actions posées par l'opérateur lors du stockage
G	Temps de recherche	Temps nécessaire pour trouver un produit perdu dans l'inventaire
H	Indice de mixité	Nombre de produits différents dans une alvéole au moment du ramassage
I	Taux d'occupation	Nombre de produits présents dans l'alvéole sur la capacité totale au moment du ramassage

5.2.3 Étape 3 : Distribution statistique

Les données découlant des erreurs de manipulation (E et F) dans le positionnement de l'inventaire ont été éliminées de l'analyse. Elles représentent l'inefficacité du processus, ce que nous ne voulions pas considérer pour le projet puisque ces données ne réfèrent pas directement aux opérations de ramassage des produits. En ce qui concerne la distance parcourue (A), il n'est pas possible de définir une distribution statistique basée sur les connaissances d'un expert du milieu de l'impact de ce facteur sur la précision du modèle, car l'expert ignore les distances parcourues simulées. La distance parcourue simulée est obtenue grâce à une fonction qui considère le temps de déplacement nécessaire pour circuler sur les chemins du modèle ainsi que la vitesse de déplacement des agents. Faire varier ce paramètre revient donc à ajouter un temps de déplacement dans un bloc de type « move to ». À noter que les distances réellement parcourues ne sont pas disponibles dans l'historique de déplacements. Il n'est donc pas possible de modéliser directement ce paramètre et de le comparer aux distances réelles. Puisque la vitesse de marche (D) des opérateurs sera analysée, la distance parcourue (A) ne sera pas traduite en distribution statistique. Toutefois, cette donnée sera collectée lors de l'étape cinq pour déterminer si des écarts sont présents. Afin de traduire les 6 options restantes (B, C, D, G, H et I) en distribution statistique, un questionnaire a été transmis à un expert du processus d'entreposage de l'entreprise ABC inc. Le questionnaire ainsi que les réponses reçues se trouvent à l'Annexe BA. Ainsi, six options sont conservées pour la prochaine étape de tests (voir la figure 5.6). Les hypothèses émises quant à leurs distributions statistiques sont présentées au tableau 5.2.

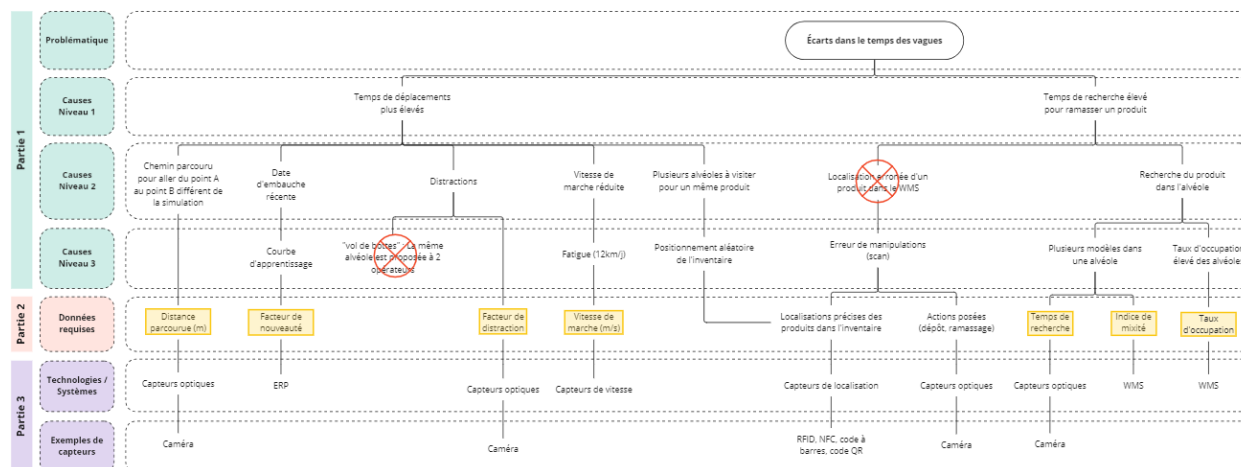


Figure 5.6 : 3P – ICs retenues

Tableau 5.2 : Hypothèses émises des distributions statistiques

	Données	Paramètres	Explications
B	Facteur de nouveauté	a = premier seuil de nouveauté b = deuxième seuil de nouveauté	Si nombre $\leq a$ Temps = uniforme (60,420) ou Temps = exponentielle (60,420,50,50) ou Temps = normale (60,420,10,150) Si nombre $\leq b$ Temps = uniforme (1,60)
C	Facteur de distraction	c = probabilité d'apparition de l'événement (placotage)	Si premier déplacement et nombre $\leq c$ Temps = uniforme (60,300) Sinon Temps = 0
D	Vitesse de marche (m/s)	d = paramètres de la distribution en début am et début pm e = paramètres de la distribution en fin am et fin pm	Si début de vague entre 7h15 et 10h30 Vitesse = triangulaire (d) Si début de vague entre 10h30 et 12h30 Vitesse = triangulaire (e) Si début de vague entre 12h30 et 15h00 Vitesse = triangulaire (d) Si début de vague entre 15h00 et 18h00 Vitesse = triangulaire (e)
G	Temps de recherche	f = probabilité d'apparition de l'événement (perte d'un produit)	Si nombre $\leq f$ Temps = uniforme (300,1200) Sinon Temps = 0
H	Indice de mixité	g = seuil de mixité	Si mixité $\leq g$ Temps = uniforme (0,5) Sinon Temps = PERT (5,60,20) ou Temps = normale (5,60,0,20) ou Temps = triangulaire (5,60,20)
I	Taux d'occupation	h = seuil du taux d'occupation i = paramètres de la distribution	Si occupation $\leq h$ Temps = uniforme (0,5) Sinon Temps = triangulaire (i) ou Temps = normale (i)

5.2.4 Étape 4 : Test 1

Pour tester l'impact d'ajouter les ICs sur la précision du modèle de simulation, les six facteurs ont dû être modélisés adéquatement dans AnyLogic. La figure 5.7 montre le modèle de simulation incluant les ICs. Le facteur de nouveauté (B), l'indice de mixité (H), le facteur de distraction (C), le taux d'occupation (I) ainsi que le temps de recherche (G) sont représentés par un délai. Les trois premiers (H, C et I) sont placés dans la boucle puisque cela réfère aux déplacements requis pour compléter une vague de ramassage. À noter que le facteur de distraction (C) s'applique uniquement lorsqu'il s'agit du premier déplacement d'une vague, car le placotage est plus susceptible de survenir au début d'une vague. Quant au temps de recherche (G), le délai est placé à l'extérieur de la boucle puisque la perte d'un produit arrive une fois sur 50 vagues. Pour le facteur de nouveauté (B), il s'applique uniquement lorsque la vague survient dans les 5 ou 30 jours suivants la date de la première vague de l'opérateur. Bien entendu, la vitesse de marche (D) est incluse dans un bloc de type « move to ». Une variabilité dans la vitesse de marche est donc ajoutée pour chaque déplacement dans la vague.

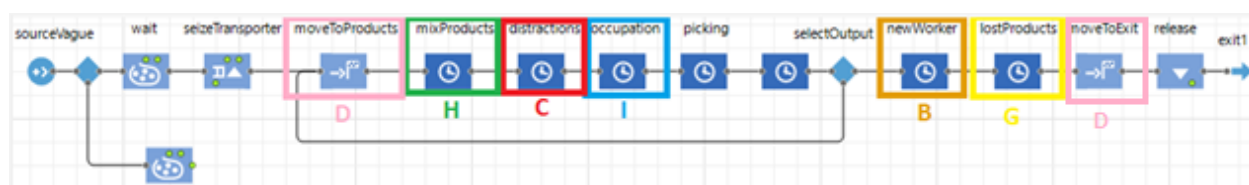


Figure 5.7 : Modèle de simulation (Main - AnyLogic)

Dans cette première phase de tests, les facteurs ont été testés individuellement en suivant le plan d'expérimentation du tableau 5.3. Les résultats des expérimentations sont présentés au tableau 5.4.

Tableau 5.3 : Plan d'expérimentation (test 1)

	Facteurs	Paramètres		Facteurs	Paramètres
1	B	a = 5; b = 30; Temps = uniforme (60,420)	15	H	g = 3; Temps = PERT (5,60,20)
2	B	a = 5; b = 30; Temps = expo (60,420,50,50)	16	H	g = 5; Temps = PERT (5,60,20)
3	B	a = 5; b = 30; Temps = normale (60,420,10,150)	17	H	g = 10; Temps = PERT (5,60,20)
4	C	c = 0.1	18	H	g = 3; Temps = normale (5,60,0,20)
5	C	c = 0.2	19	H	g = 5; Temps = normale (5,60,0,20)
6	C	c = 0.3	20	H	g = 10; Temps = normale (5,60,0,20)
7	D	d = (1.4,1.6,1.8); e = (1.2,1.4,1.6)	21	H	g = 3; Temps = triangulaire (5,60,20)
8	D	d = (1.2,1.4,1.6); e = (1,1.2,1.4)	22	H	g = 5; Temps = triangulaire (5,60,20)
9	D	d = (1,1.2,1.4); e = (0.8,1,1.2)	23	H	g = 10; Temps = triangulaire (5,60,20)
10	D	d = (0.8,1,1.2); e = (0.6,0.8,1)	24	I	h = 20; Temps = triangulaire (5,30,15)
11	D	d = (0.6,0.8,1); e = (0.6,0.8,1)	25	I	h = 30; Temps = triangulaire (5,30,15)
12	G	f = 0.013 = 1/75	26	I	h = 20; Temps = normale (5,30,0,15)
13	G	f = 0.02 = 1/50	27	I	h = 30; Temps = normale (5,30,0,15)
14	G	f = 0.04 = 1/25			

Tableau 5.4 : Résultats des expérimentations (test 1) en minute

	Facteurs	Moyennes des vagues	Moyennes des écarts	Écart-types des écarts		Facteurs	Moyennes des vagues	Moyennes des écarts	Écart-types des écarts
1	B	9.163	4.590	6.051	15	H	13.935	-0.182	6.367
2	B	9.131	4.622	6.040	16	H	12.093	1.660	6.349
3	B	9.130	4.623	6.041	17	H	10.367	3.386	6.091
4	C	8.992	4.762	6.055	18	H	13.007	0.747	6.239
5	C	9.350	4.404	6.180	19	H	11.589	2.164	6.239
6	C	9.499	4.255	6.205	20	H	10.265	3.489	6.111
7	D	9.266	4.488	6.025	21	H	14.681	-0.927	6.579
8	D	9.690	4.063	5.982	22	H	12.494	1.260	6.479
9	D	10.282	3.471	5.918	23	H	10.479	3.274	6.137
10	D	11.158	2.595	5.861	24	I	14.429	-0.676	6.598
11	D	11.586	2.167	5.780	25	I	12.913	0.841	6.585
12	G	9.314	4.439	6.451	26	I	13.555	0.199	6.505
13	G	9.312	4.441	6.211	27	I	12.331	1.422	6.494
14	G	9.768	3.985	6.720					

Tableau 5.5 : Résultats initiaux

Moyennes des vagues	Moyennes des écarts	Écart-types des écarts	Imprécision initiale
9.070 min	4.683 min	6.063 min	34.1 %

En guise de comparaison, le tableau 5.5 présente les résultats de la simulation initiale sans ajout d'élément contextuel. Les résultats démontrent que l'indice de mixité (H), le taux d'occupation (I) et la vitesse de marche (D) influencent la précision du modèle de simulation. En fait, ces facteurs font réduire la moyenne des écarts. À noter que la réduction de la vitesse de marche entraîne une diminution dans la moyenne des écarts. Ainsi, une vitesse de marche de 1.6 m/s émis en hypothèse est fort probablement surestimée par rapport à la réalité. De plus, on constate que les écart-types des écarts restent relativement similaires au résultat initial ce qui laisse sous-entendre que les distributions statistiques définies en hypothèse peuvent être précisées davantage. Quant aux autres options (B, C et G), elles ont eu très peu d'impact sur les résultats des simulations. En fait, ces facteurs entraînent au gain de précision inférieur à 3% (voir le tableau 5.6). Le calcul du gain utilisé est le suivant :

$$\text{gain (\%)} = \text{Imprécision initiale} - \text{Imprécision obtenue.}$$

Tableau 5.6 : Imprécision et gain moyens obtenus par facteur

Facteurs	Imprécisions obtenues (%)	Gains (%)
B	33.5	0.5
C	32.5	1.5
D	24.4	9.6
G	31.2	2.9
H	12.0	22.0
I	3.2	30.8

Ainsi, la distribution statistique de l'indice de mixité (H), le taux d'occupation (I) et de la vitesse de marche (D) seront précisés grâce à une collecte de données réelles à la prochaine étape.

5.2.5 Étape 5 : Confirmation

En guise de rappel, cette étape vise à collecter les données nécessaires pour valider la distribution statistique des facteurs contextuels. La collecte de données a été réalisée au courant d'un après-midi à l'entrepôt de l'entreprise ABC inc. Une caméra 360° a été accrochée en hauteur sur un chariot utilisé pour la tâche de ramassage des produits. Plusieurs raisons expliquent la décision d'utiliser une caméra. D'abord, l'analyse des vidéos permet de ressortir précisément le temps de chacune des actions menées par l'opérateur même si leur durée est de quelques secondes. Par exemple, en observant le regard des opérateurs dans la séquence d'action, il est possible de déterminer le temps de recherche pris pour trouver le produit dans l'alvéole. De plus, la vidéo permet de retracer le chemin parcouru par l'opérateur permettant de calculer la distance réellement parcourue. Obtenir cette information était nécessaire pour le calcul de la vitesse de marche des opérateurs lors des déplacements. Finalement, les événements qui surviennent lors des vagues de ramassage telles que les accrochages, le ramassage des produits tombés et les blocages d'allées peuvent être analysés. Au total, quatre vidéos de vagues de ramassage complètes ont été obtenues. L'indice de mixité (H) et le taux d'occupation (I) des alvéoles au moment des ramassages ont été obtenus grâce au WMS de l'entreprise. Le tableau 5.7 présente le nombre de données collectées pour chaque information.

Tableau 5.7 : Nombres de données collectées

	Données	Nombres
Actions	Durée et distance de déplacement (D)	62
	Scanner la localisation de l'alvéole	58
	Consulter le WMS	117
	Rechercher le(s) produit(s) dans l'alvéole	48
	Prendre le(s) produit(s) et le(s) scanner	48
WMS	Indice de mixité (H)	48
	Taux d'occupation (I)	48

De plus, le temps nécessaire pour parcourir une distance de 10 m a été chronométré à deux reprises pour trois opérateurs (voir le tableau 5.8). Les résultats valident la surestimation de la vitesse de déplacement utilisée dans le modèle de simulation.

Tableau 5.8 : Temps de marche (sec) d'une distance de 10 m

	Durées (sec)	Vitesses (m/s)
Opérateur 1	9.88	0.99
	10.94	1.09
Opérateur 2	8.20	0.82
	6.77	0.68
Opérateur 3	11.02	1.10
	10.03	1.00

L'outil « Input Analyzer » du logiciel Arena a été utilisé pour préciser la distribution statistique des éléments contextuels. En fait, cet outil indique le modèle mathématique le plus représentatif d'un lot de données parmi une multitude de distributions. La fonction « Fit All Summary » du logiciel classe les expressions en fonction de leurs précisions, soit du MSE le plus faible au plus élevé. Le tableau 5.9 présente le plan d'expérimentation utilisé pour tester la précision des distributions statistiques selon différents seuils du niveau de mixité (g) et du taux d'occupation (h). À noter que pour les facteurs de mixité (H) et du taux d'occupation (I), les données utilisées par l'outil correspondent au temps nécessaire pour trouver le produit dans l'alvéole. Ceci permet d'ajouter un temps additionnel à la recherche du produit en fonction du niveau de mixité (H) et du taux d'occupation (I) de l'alvéole. Pour ces deux facteurs, les paramètres g et h sont définis par les expressions ayant une somme de MSEs la plus faible. Pour chaque facteur, les trois premières expressions obtenues au classement (cases remplies en jaune) seront sélectionnées pour l'étape six, soit la deuxième phase de tests (voir le tableau 5.10).

Tableau 5.9 : Plan d'expérimentation mené dans l'outil « Input Analyzer »

	Facteurs	Données	Paramètres
1	D	Vitesses	
2	H	Temps de recherche	g = 5
3	H		g = 10
4	H		g = 15
5	I		h = 20
6	I		h = 25
7	I		h = 30

Tableau 5.10 : Distributions statistiques obtenues grâce à l'outil « Input Analyzer »

Facteurs		Distributions		MSE	
1	D	Vitesse = 0.03 + BETA (2.43, 2.65, 0.17, 1.48)		0.012576	
		Vitesse = TRIA (0.03, 1.05, 1.62)		0.019483	
		Vitesse = NORM (0.17, 1.48, 0.791, 0.32)		0.021368	
		Mixité < g	Mixité ≥ g	Mixité < g	Mixité ≥ g
2	H	Temps = 0.5 + LOGN (1.53, 1.7, 0)	Temps = 0.5 + LOGN (10.6, 18.2, 0)	0.014614	0.041055
3	H	Temps = 0.5 + WEIB (0.959, 1.98, 1)	Temps = 0.5 + GAMM (0.977, 12.3, 1)	0.011842	0.034973
		Temps = 0.5 + ERLA (2.02, 1, 1)	Temps = 0.5 + WEIB (0.988, 11.9, 1)	0.014932	0.035029
		Temps = 0.5 + EXPO (1, 14, 2.02, 1)	Temps = 0.5 + EXPO (1, 35, 12, 1)	0.014932	0.035170
4	H	Temps = 0.5 + LOGN (2.77, 4.34, 0)	Temps = 0.5 + 28 * BETA (0.624, 0.605, 0, 1)	0.008137	0.087489
		Occupation < h	Occupation ≥ h	Occupation < h	Occupation ≥ h
5	I	Temps = 0.5 + LOGN (1.37, 1.39, 0)	Temps = 0.5 + LOGN (5.05, 11, 0)	0.027466	0.012899
6	I	Temps = 0.5 + EXPO (1, 7, 1.5, 1)	Temps = 0.5 + WEIB (0.744, 4.91, 1)	0.012342	0.015736
		Temps = 0.5 + WEIB (1.17, 1.6, 1)	Temps = 0.5 + GAMM (0.67, 9.03, 1)	0.016002	0.022232
		Temps = 0.5 + GAMM (0.982, 1.53, 1)	Temps = 0.5 + BETA (0.457, 1.59, 1, 35)	0.019679	0.023309
7	I	Temps = 0.5 + LOGN (1.74, 1.85, 0)	Temps = 0.5 + 35 * BETA (0.236, 0.905, 1, 35)	0.012273	0.026827

5.2.5.1 Temps de ramassage

Les données réelles des quatre vagues ont été intégrées au modèle de simulation afin de pouvoir comparer les données des vagues simulées aux données réelles. Il s'avère que trois vagues sur quatre simulent un temps total supérieur aux données réelles. Une incohérence est présente dans le modèle de simulation puisque la vitesse de marche réelle des opérateurs est inférieure au paramètre émis en hypothèse. En fait, on constate qu'en moyenne les temps simulés des déplacements sont inférieurs aux temps réels. L'inverse est observé pour les distances de déplacement simulées et réelles. Autre que le déplacement, les temps des vagues dépendent également du temps de ramassage des produits. La moyenne des temps de ramassage réels est de 6.31 secondes avec un écart-type de 2.29 sec ce qui sous-entend qu'une loi triangulaire de paramètres (10, 15, 20) n'est pas appropriée. Une distribution statistique précisée a été obtenue grâce à l'outil « Input Analyzer » pour le temps de ramassage des produits (voir le tableau 5.11). Bien que l'expression obtenue soit appuyée par des données réelles, ce changement augmente l'imprécision du modèle à 62.7%. Cela s'explique possiblement par la réduction des temps de ramassage qui réduit le temps des vagues simulées. Les facteurs contextuels présents durant la réalisation de la vague, mais qui sont manquants dans le modèle de simulation accroissent certainement la durée totale des vagues. Cette nouvelle expression du temps de ramassage sera utilisée pour réaliser les tests à la prochaine étape. En ce qui concerne les quatre vagues observées, la nouvelle expression du temps de ramassage permet d'obtenir des temps de vagues simulées inférieurs aux données réelles.

Tableau 5.11 : Résultats de la simulation avec la nouvelle expression du temps de ramassage

Temps de ramassage	Moyenne des vagues	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts	Imprécision révisée
POIS (6.31)	5.131 min	8.622 min	5.870 min	62.7%

5.2.6 Étape 6 : Test 2

Cette deuxième phase de tests utilise les expressions raffinées des facteurs contextuels obtenues à l'étape précédente. Ils ont été testés individuellement ainsi qu'en combinaison double et triple selon le plan d'expérimentation du tableau 5.12. Plusieurs raisons justifient la pertinence d'évaluer l'effet combinatoire des facteurs. Notamment, le modèle de Bauer et Dey (2016) précise une étape (4.2) spécifiquement pour évaluer l'impact de combiner les facteurs. Aussi, l'expert du milieu a souligné une possible corrélation entre les facteurs de mixité et du taux d'occupation lors de l'étape 3 (voir l'Annexe BA). Évaluer la présence de corrélation entre les facteurs contextuels s'avère donc être pertinent pour l'analyse. Les résultats des expérimentations sont présentés au tableau 5.13. On constate que l'imprécision du modèle varie en fonction de la donnée contextuelle qui a été ajoutée. En fait, le facteur de vitesse (D) réduit l'imprécision à 39.7%, l'indice de mixité (H) à 51.5% et le taux d'occupation (I) à 45.4%. Ainsi, le facteur de mixité (H) a moins d'impact sur la précision du modèle comparativement à la vitesse de marche (D) et au taux d'occupation (I). En ce qui concerne l'effet combinatoire des facteurs, bien qu'il soit relativement faible, un effet est constaté pour chaque combinaison (expérimentation 10 à 13) (voir le tableau 5.14). L'effet combinatoire représente le temps en seconde supplémentaire obtenu sur la moyenne des vagues simulées grâce à la combinaison de facteurs (voir le tableau 5.15 pour un exemple de calculs). Cela dit, les effets ne sont pas significatifs puisque le temps supplémentaire est inclus dans les écarts-types des moyennes des vagues. À noter que l'effet combinatoire de la combinaison des trois facteurs est moindre que la combinaison en binôme des facteurs D et I. Une corrélation négative est donc constatée en ajoutant le facteur H.

Tableau 5.12 : Plan d'expérimentation (test 2)

Facteurs		Distributions				
1	D	Vitesse = 0.03 + BETA (2.43, 2.65, 0.17, 1.48)				
2	D	Vitesse = TRIA (0.03, 1.05, 1.62)				
3	D	Vitesse = NORM (0.17, 1.48, 0.791, 0.32)				
		Mixité < 10	Mixité ≥ 10			
4	H	Temps = 0.5 + WEIB (0.959, 1.98, 1)	Temps = 0.5 + GAMM (0.977, 12.3, 1)			
5	H	Temps = 0.5 + ERLA (2.02, 1, 1)	Temps = 0.5 + WEIB (0.988, 11.9, 1)			
6	H	Temps = 0.5 + EXPO (1, 14, 2.02, 1)	Temps = 0.5 + EXPO (1, 35, 12, 1)			
		Occupation < 25	Occupation ≥ 25			
7	I	Temps = 0.5 + EXPO (1, 7, 1.5, 1)	Temps = 0.5 + WEIB (0.744, 4.91, 1)			
8	I	Temps = 0.5 + WEIB (1.17, 1.6, 1)	Temps = 0.5 + GAMM (0.67, 9.03, 1)			
9	I	Temps = 0.5 + GAMM (0.982, 1.53, 1)	Temps = 0.5 + BETA (0.457, 1.59, 1, 35)			
Combinaisons						
10	H	I	Expérimentation 6	Expérimentation 9		
11	H	D	Expérimentation 6	Expérimentation 3		
12	D	I	Expérimentation 3	Expérimentation 9		
13	D	H	I	Expérimentation 3	Expérimentation 6	Expérimentation 9

Tableau 5.13 : Résultats des expérimentations (test 2) en minute et imprécisions moyennes (%)

	Facteurs	Moyennes des vagues	Écart-types des moyennes	Moyennes des écarts	Écart-types des écarts	Imprécisions obtenues (%)		
1	D	8.081	2.321	5.673	5.468	39.7		
2	D	8.321	2.861	5.433	5.629			
3	D	8.482	2.567	5.271	5.480			
4	H	6.650	1.672	7.103	5.923	51.5		
5	H	6.682	1.676	7.072	5.935			
6	H	6.670	1.645	7.083	5.934			
7	I	7.335	1.799	6.419	6.032	45.4		
8	I	7.406	1.826	6.347	5.997			
9	I	7.772	1.890	5.981	6.016			
10	H	I	9.344	2.307	4.410	6.091	32.1	
11	H	D	10.125	2.936	3.629	5.527	26.4	
12	D	I	11.289	3.151	2.465	5.151	17.9	
13	D	H	I	12.707	3.288	1.046	5.288	7.6

Tableau 5.14 : Effets combinatoires en seconde

Facteurs		Effets combinatoires	
H	I	18	
H	D	18	
D	I	37	
D	H	I	30

Tableau 5.15 : Exemple de calculs de l'effet combinatoire en seconde des facteurs H et D

	Facteurs	Moyennes des vagues (min)	Écarts entre la moyenne des vagues et le temps simulé révisé (min)	Moyennes des écarts (min)
1	D	8.081	2.950	3.164
2	D	8.321	3.190	
3	D	8.482	3.351	
4	H	6.650	1.519	1.536
5	H	6.682	1.551	
6	H	6.670	1.539	
11	H	D	4.994	

$$\text{Effet combinatoire (H et D)} = (4.994 - (3.164 + 1.536)) \times 60 = 18 \text{ sec}$$

5.2.7 Étape 7 : Analyse coûts-bénéfices

Cette étape vise à offrir une aide à la décision quant à la poursuite ou non de collecter la donnée contextuelle. Plusieurs méthodes d'analyse coûts-bénéfices peuvent être utilisées. Dans le cadre de ce projet, l'analyse est faite sans contrainte budgétaire. L'analyse permettra d'établir une liste de priorité en fonction du meilleur gain et du coût nécessaire pour obtenir la donnée. Cette proposition pourra être revue par l'entreprise ABC inc. en y ajoutant par exemple un pourcentage minimal de gain à atteindre et en établissant un budget maximal pour le projet. La formule utilisée du gain est la même que celle présentée à la page 45. Pour le calcul des coûts, les tableaux 5.16 et 5.17 précisent les coûts estimés pour l'implantation de chaque facteur contextuel. L'évaluation des coûts a été faite conjointement avec la personne-ressource de l'entreprise ABC inc. La structure informatique actuellement en place à l'entrepôt est adéquate pour supporter la récupération des données en temps réel. Autrement dit, le nombre de points d'accès est suffisant pour assurer une bonne qualité du réseau et leur serveur a une capacité de traitement et de stockage adéquate. Les principaux coûts proviennent des heures de développement interne. On considère en moyenne un taux horaire de 25\$ par heure-personne pour le développement. À noter que l'entrepôt dispose d'environ 10 chariots manuels utilisés pour la tâche de ramassage des produits finis.

Tableau 5.16 : Analyse de coûts pour intégrer la vitesse de marche (D)

Requis	Quantité / Durée	Coûts (\$)
Encodeur de roue	10 unités	36,86
Pi Zero 2 W Starter Kit	10 unités	44,95
- Installation des capteurs et programmation de l'équipement	40 h	1 000
- Développement de l'API	40 h	1 000
<ul style="list-style-type: none"> • Créer l'API • Déployer l'API • Intégrer l'API avec AnyLogic 		
Total		2 818,1

Tableau 5.17 : Analyse de coûts pour intégrer l'indice de mixité (H) ou le taux d'occupation (I)

Requis	Durée	Coûts (\$)
- Préciser les données à transmettre	2 h	50
- Développement de l'API	40 h	1 000
<ul style="list-style-type: none"> • Créer l'API • Déployer l'API • Intégrer l'API avec AnyLogic 		
Total		1 050

La vitesse de marche implique que certains scripts du WMS soient modifiés afin d'envoyer une communication au Raspberry Pie pour procéder à la lecture des données. Les vitesses pourront être stockées dans leur serveur SQL à l'interne. D'ailleurs, l'intégration des facteurs H et I suivront la même démarche. L'idée générale est de permettre une communication entre le WMS et AnyLogic

grâce à une API. Une réflexion devra être faite sur les données à transmettre et la fréquence d'échange pour chaque facteur contextuel.

Le tableau 5.18 présente les résultats de l'analyse coûts-bénéfices. On remarque que l'intégration du facteur D permet d'obtenir un gain de précision plus important que les facteurs H et I, mais exige un coût supérieur. Les combinaisons de facteurs permettent d'obtenir un gain supérieur au facteur individuellement. En fait, le gain le plus élevé (55.1%) est obtenu lorsque les 3 facteurs contextuels sont combinés. Grâce à ces résultats, une proposition de priorisation des facteurs contextuels à intégrer au modèle de simulation peut être définie. La proposition est la suivante : 1- la vitesse de marche (D); 2-le taux d'occupation (I) puis 3-l'indice de mixité (H).

Tableau 5.18 : Analyse coûts-bénéfices des facteurs contextuels

Facteurs	Gains (%)	Coûts (\$)
D	23.0	2 818
H	11.2	1 050
I	17.3	1 050
H I	30.6	1 100
H D	36.3	3 868
D I	44.8	3 868
D H I	55.1	3 918

5.3 Discussion

5.3.1 Résultats

Une mise en garde doit être effectuée concernant la précision du modèle initial utilisé pour l'expérimentation. Le modèle de simulation utilisé a été transmis à l'équipe de recherche. Il s'agit d'un JN en construction et sa précision initiale est de 65.9% ce qui pour l'instant le rend inexploitable. Ce travail ne vise pas à développer une méthodologie de conception d'un modèle de simulation d'un entrepôt. Ainsi, bien que des erreurs de modélisation soient présentes dans le modèle, il a été repris dans l'objectif d'améliorer sa précision grâce à des données contextuelles pertinentes tout en réduisant les coûts de développement. Bien entendu, un tel niveau de précision du modèle peut avoir impacté les résultats de ce travail. Notamment, les gains observés à la suite de l'intégration des données contextuelles pourraient être moindres dans un modèle plus performant.

Au cours de l'expérimentation, différents niveaux de précision du modèle ont été obtenus. Il est intéressant de constater que la modification de la distribution du temps de ramassage a fait baisser

la précision du modèle à 37.3% bien que des observations réelles viennent appuyer la distribution obtenue. Il s'agit d'une baisse de précision importante de 28.6%. Tel que mentionné à la page 47, cette diminution peut s'expliquer par la surestimation du temps de ramassage préalablement émise en hypothèse. La variabilité du temps de ramassage n'avait pas été identifiée comme un facteur du contexte potentiel dans les étapes un et deux. Toutefois, il aurait peut-être été pertinent de considérer cette donnée comme un facteur contextuel puisque cet élément semble beaucoup impacter les temps de vagues. Le temps de ramassage raffiné est le seul facteur ayant impacté négativement la précision du modèle. En combinant les facteurs D, H et I, on dénote un gain de précision de 26.5% par rapport au modèle initial. La précision du modèle est alors de 92.4%. Il revient à l'entreprise de juger si le modèle est valide. Selon Robinson (2011), «un modèle valide produit des résultats suffisamment précis pour l'objectif visé, est crédible pour le client [...], est utile, c'est-à-dire facile à utiliser, maintenable, flexible, visuel et a une durée d'exécution courte». En pratique, les attentes des clients sont plutôt élevées, comme le souligne un intégrateur qui en général doit reproduire à plus ou moins 5% les résultats passés. Il est donc judicieux pour l'entreprise d'intégrer les facteurs D, H et I au modèle de simulation avant qu'un travail d'optimisation ne soit fait. Aussi, la conception du modèle de simulation pourrait être revue puisque certaines incohérences ont été constatées dans les résultats de la simulation au niveau notamment des séquences de déplacements. Ainsi, malgré l'amélioration de la précision obtenue grâce à l'ajout d'éléments du contexte, un travail supplémentaire devra certainement être fait pour confirmer la validation du modèle de simulation.

L'utilisation d'une caméra 360° a été très utile pour l'analyse. Les vidéos permettent de comparer la trajectoire empruntée par l'employé à celle simulée dans AnyLogic (voir Annexe B). Ceci a permis de constater une erreur de modélisation dans la trajectoire des opérateurs puisqu'aucun déplacement vertical ne se faisait dans l'allée centrale. À noter qu'un modèle corrigé a été utilisé pour l'expérimentation. De plus, l'analyse des cartographies de déplacement permet de soulever un autre facteur contextuel non identifié dans la méthode. Il s'agit de la variabilité des positions de départ et de fin lors des vagues de ramassage. Bien que la position de départ et de fin des vagues soit au centre de l'entrepôt, une variabilité est présente pour chaque vague ce qui n'est pas représenté dans le modèle de simulation. En fait, les cartographies présentent à l'Annexe B montrent que la trajectoire empruntée par l'employé est la même que celle simulée à l'exception

du premier et du dernier déplacement puisque la position de départ et de fin diffère. Ceci peut expliquer en partie l'imprécision de 7.6% du modèle.

5.3.2 Limites de l'étude

Tout compte fait, la conception d'un JN exploitable nécessite un long processus de développement et requiert plusieurs expertises variées. Les ressources limitées des PME peuvent s'avérer être un frein à la sélection de cette technologie d'autant plus que l'ajout de fonctionnalités de *context-awareness* au JN doit encore faire ses preuves dans le milieu industriel. Les contraintes de temps imposées par l'entreprise peuvent également encourager les concepteurs à utiliser une méthode qui soit moins rigoureuse et plus exhaustive pour identifier les ICs pertinentes à intégrer.

La majorité des éléments contextuels ont été modélisés dans AnyLogic par des délais. Cependant, d'autres méthodes de modélisation plus appropriées pourraient être testées pour représenter le plus fidèlement possible les éléments du contexte à la réalité.

D'ailleurs, la méthode a été testée seulement avec un cas d'application qui s'avère être un cas moins commun dû à la faible performance du modèle. Bien que les étapes soient assez génériques, on ne peut confirmer la répliquabilité de la méthode pour d'autres cas d'application. Dans ce même ordre d'idée, la dernière étape de la méthodologie qui correspond à l'intégration des données contextuelles au JN n'a pas été testée. L'étude ne permet donc pas de dégager des conclusions sur les facteurs contextuels influençant la tâche de ramassage des produits finis dans le monde réel puisque leur impact a été évalué uniquement au niveau du modèle de simulation.

Pour finir, la capacité de la méthodologie à identifier l'ensemble des facteurs pertinents à intégrer à un JN peut également être remise en question. En fait, les écarts-types des écarts restent relativement similaires à celui du modèle initial malgré l'ajout de facteurs contextuels ce qui sous-entend que la complexité du contexte n'est pas totalement représentée dans le modèle de simulation. Les étapes un et deux n'ont probablement pas permis d'identifier l'ensemble des éléments contextuels du cas d'application comme le temps de ramassage des produits dans l'alvéole. Aussi, le modèle proposé utilise les connaissances métier pour préciser les facteurs contextuels pertinents ce qui peut représenter à la fois un avantage et un inconvénient à la méthodologie. Bien entendu, cela permet de préciser la distribution statistique des facteurs. Toutefois, les réponses obtenues proviennent d'un seul individu ce qui permet d'obtenir une

perception limitée de l'impact du contexte. Une perception erronée à l'étape trois (Distribution statistique) des facteurs peut avoir entraîné leurs éliminations trop rapidement lors de l'étape quatre (Test 1) de la méthodologie.

5.3.3 Développement du modèle

Tel que mentionné au chapitre 3, la méthodologie proposée a été développée parallèlement à l'expérimentation en testant différentes approches. La première a été de suivre les étapes proposées dans la méthodologie de Bauer et Dey (2016). L'objectif initialement défini pour le projet était d'optimiser le temps de ramassage des vagues puisque cela répond directement aux besoins exprimés par ABC inc. En partant de cet objectif, une analyse de l'état de l'art a été faite. Plus spécifiquement, un travail a été fait pour bien comprendre les opérations d'entreposage (voir la figure 5.8). Aussi, une taxonomie des causes typiques d'un temps élevé de préparation des commandes (adapté de De Koster et al., 2007) est présentée à la figure 5.9. En fait, réaliser cette analyse a pris environ 3 semaines. Toutefois, ce travail ne permet pas d'identifier facilement les ICs qui sont pertinentes au cas d'application puisque l'analyse manque de profondeur à ce niveau. Le travail accompli s'est donc avéré être inutile pour ce mémoire. À la suite de ce constat, l'objectif du projet a été revu pour refléter davantage l'utilité d'intégrer des ICs sur le fonctionnement du modèle de simulation. Ce recentrage a été nécessaire au bon déroulement de l'expérimentation. D'ailleurs, cette remise en question a permis de développer une première méthodologie d'identification des ICs pertinentes à intégrer à un JN (voir la figure 5.10).

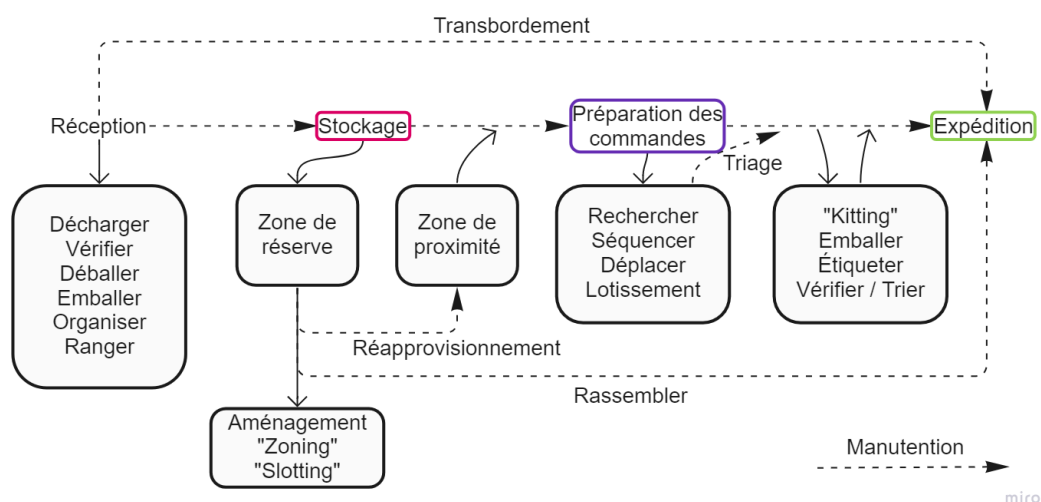


Figure 5.8 : Activités d'entreposage (adapté de Khanzode & Shah, 2017)

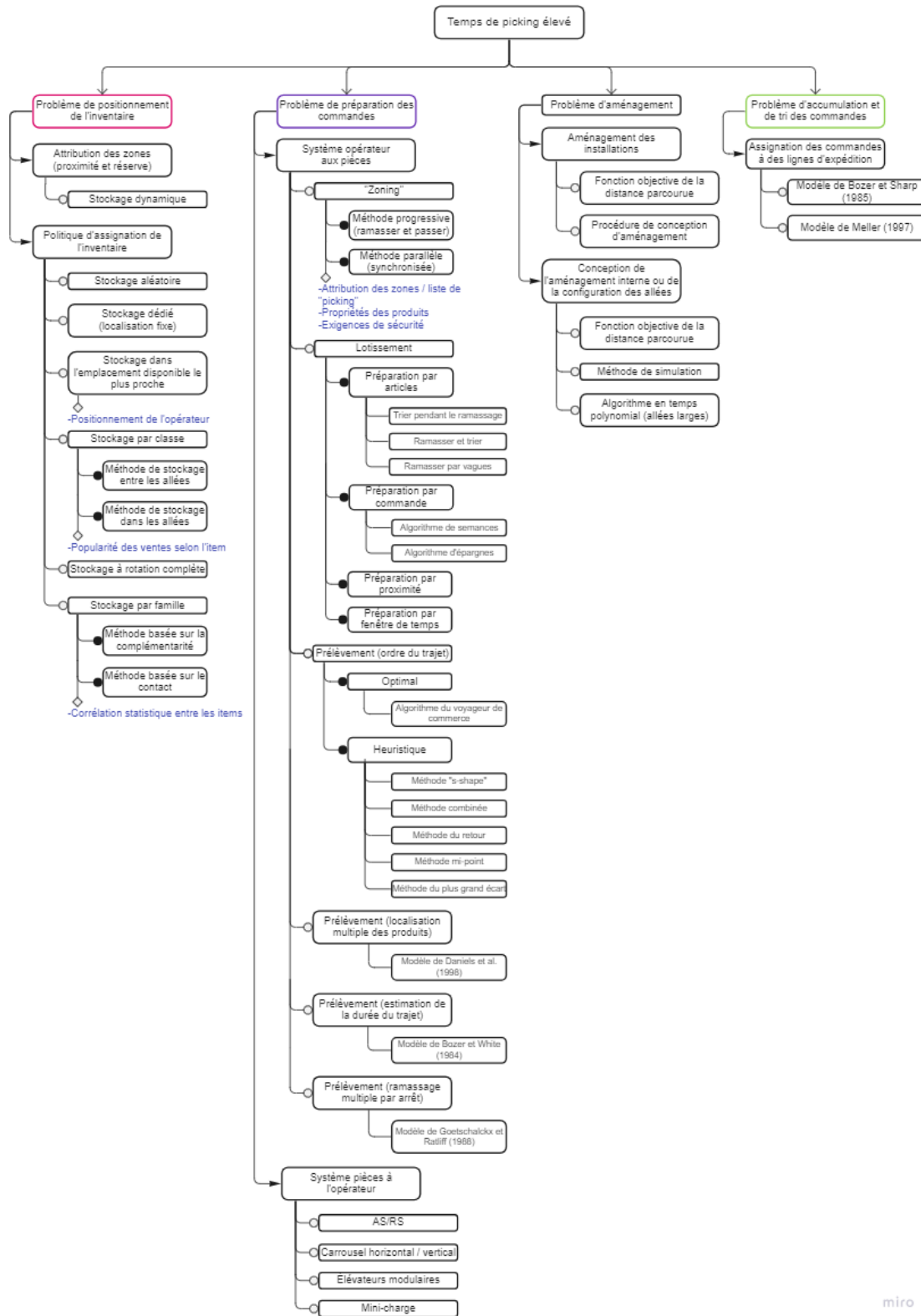
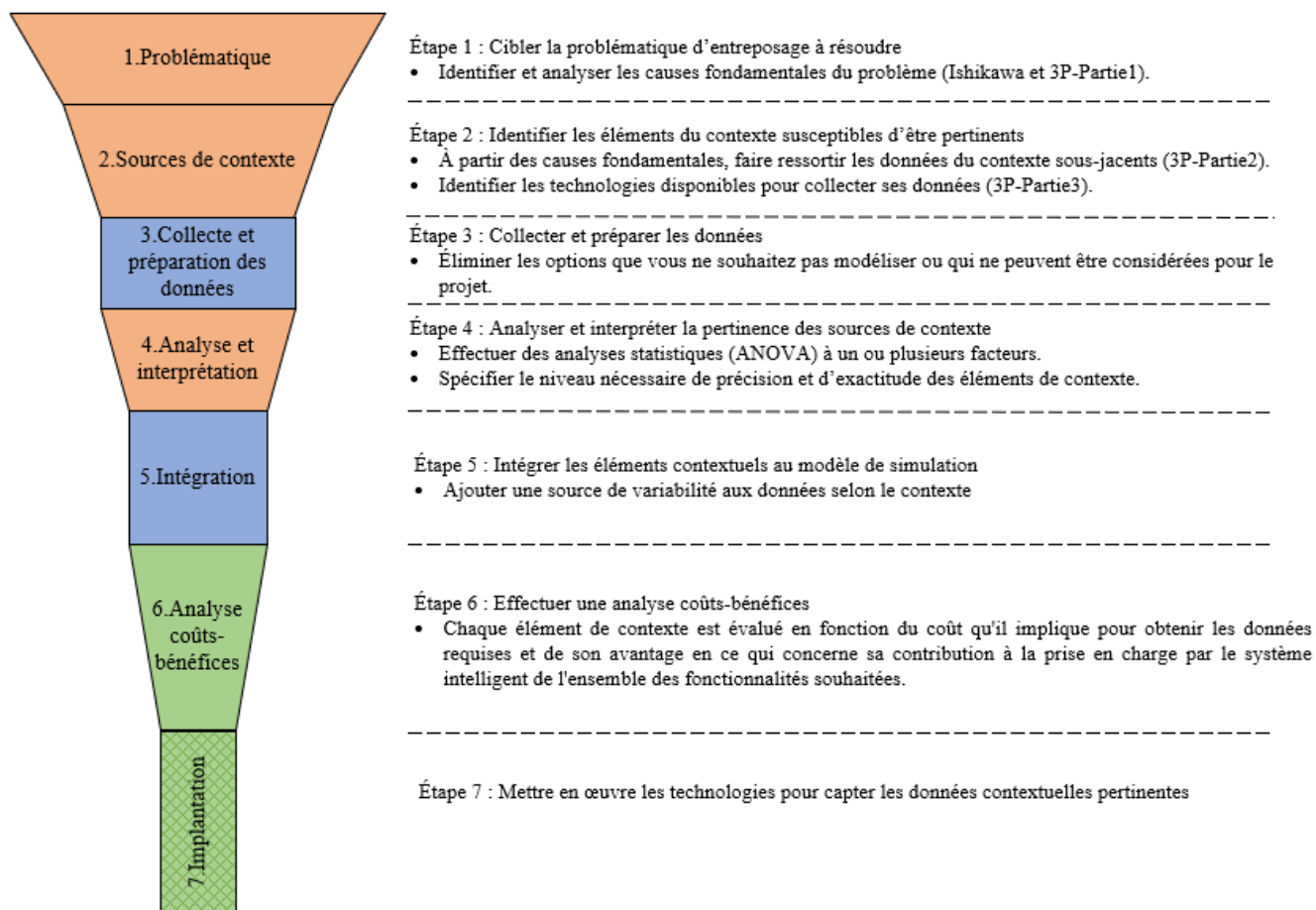


Figure 5.9 : Taxonomie des causes typiques d'un temps élevé de préparation des commandes (adapté de De Koster et al., 2007)



Orange : Modifications apportées à l'étape initiale; Bleu : Nouvelle étape; Vert : Étape existante

Figure 5.10 : Méthodologie développée initialement (adapté de Bauer & Dey, 2016)

La méthodologie de la figure 5.10 semblait de prime abord tout à fait appropriée pour l'objectif de ce travail de maîtrise. En résumé, elle propose d'utiliser des analyses statistiques pour évaluer la pertinence des ICs. Cela implique d'utiliser des données existantes pour dégager des conclusions sur la pertinence des éléments du contexte pour un cas précis d'application. Toutefois, le peu de données réelles disponibles a été un frein lors de l'analyse et de l'interprétation de la pertinence des sources de contexte. À vrai dire, la non-disponibilité de données importantes telle que le temps réel de ramassage et le temps réel de déplacement limitaient grandement les analyses pouvant être réalisées. Les analyses intéressantes pour le projet impliquaient de combiner des données réelles avec des données simulées ce qui est une pratique à éviter en analyse de données. En réfléchissant à cette problématique, l'idée d'émettre des hypothèses sur les distributions statistiques des éléments contextuels basées sur les connaissances métier a surgi permettant de développer la version de la méthodologie qui a été expérimentée.

En ce qui concerne la sélection des technologies, nous souhaitons rendre cette étape plus rapide. Pour ce faire, les technologies disponibles ont été identifiées en fonction des ICs à capter (voir la figure 5.11). L'outil peut être utilisé à l'étape trois pour faciliter la réflexion sur le choix des technologies. Cela dit, il s'agit d'un outil très général qui pourrait grandement être amélioré notamment en ajoutant des exemples précis de capteurs et leurs prix d'achat. Ces informations seraient utiles à l'étape d'analyse des coûts-bénéfices.

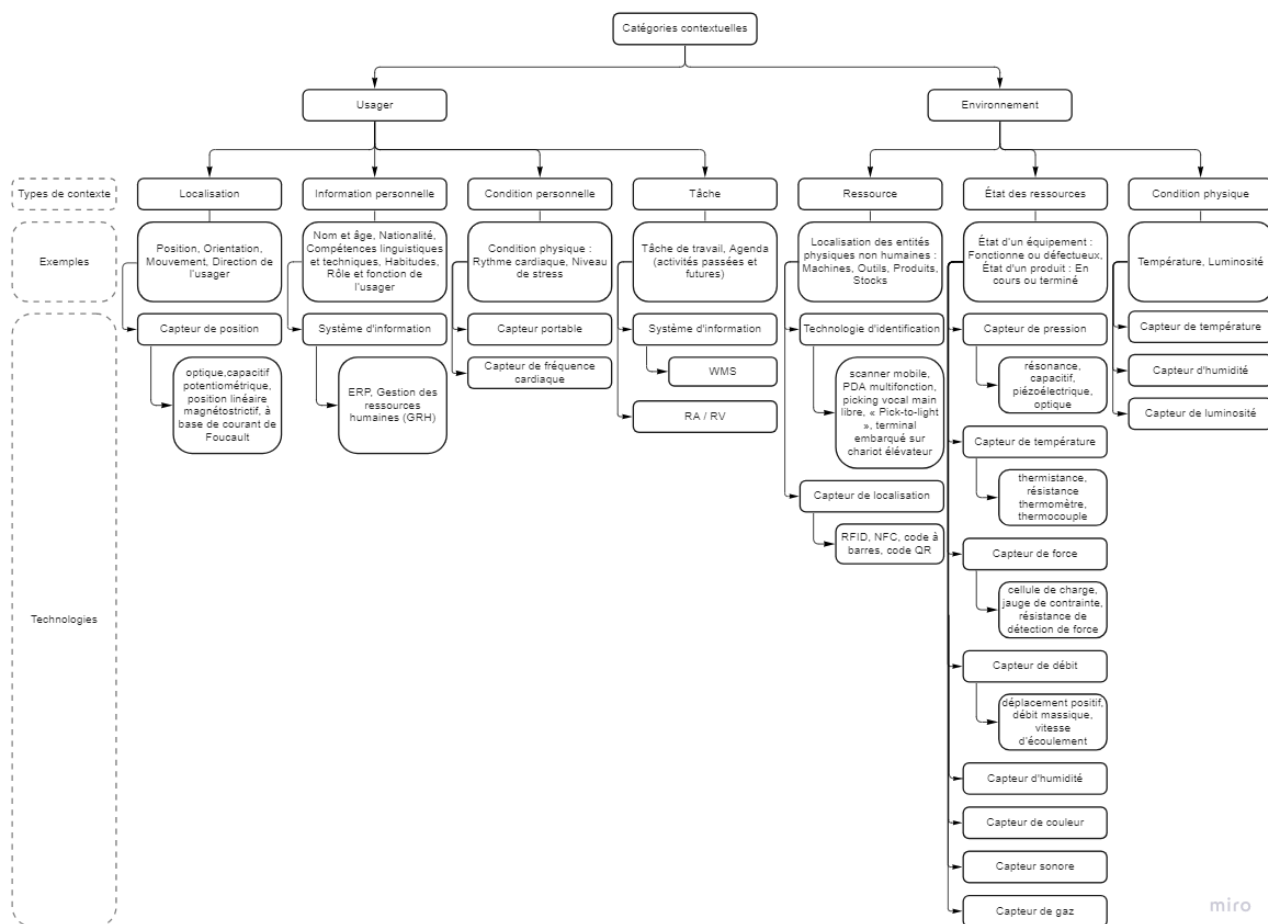


Figure 5.11 : Capteurs de l'Industrie 4.0 (adapté de Javaid et al., 2021; Kalsoom et al., 2020)

5.4 Conclusion

Pour conclure, le chapitre a présenté un cas d'application de la méthodologie d'identification des informations contextuelles. Les résultats de l'expérimentation ainsi que les limites de l'étude ont été détaillés. Les résultats justifient la pertinence d'utiliser la méthodologie proposée pour identifier les facteurs contextuels pertinents à intégrer au modèle.

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif principal de ce mémoire était de faciliter l'identification des ICs pertinentes à intégrer à un JN au sein d'une PME après avoir démontré les opportunités qu'offre la capacité de *context-awareness* sur la validation d'un modèle de simulation en entreposage. Plusieurs contributions scientifiques proposées dans ce mémoire ont permis de répondre à cet objectif de recherche.

Tout d'abord, la revue de littérature portant sur les concepts de JN et d'entreposage a permis de mettre en avant les lacunes des modèles existants en matière d'identification des données pertinentes à prendre en compte pour construire un JN. Cette revue a aussi permis de constater que les modèles de simulation sont rarement validés, ce qui limite l'exploitation des JN en entreposage à leur plein potentiel. En fait, bien que la littérature souligne clairement les apports de la capacité de prise en compte du contexte sur le fonctionnement d'un JN, peu de cas d'application décrits dans la littérature ont des fonctionnalités reliées à cette capacité en raison de la complexité à identifier les facteurs contextuels pertinents. Ensuite, pour répondre au sous-objectif 2, une recherche portant sur les modèles existants d'identification des ICs pertinentes à intégrer à un JN a été faite. À notre connaissance, aucun modèle d'identification des ICs adapté à la complexité d'un JN n'est proposé dans la littérature.

Ainsi, la méthodologie d'identification des ICs pertinentes à intégrer à un JN d'entreposage au sein d'une PME correspond à la seconde contribution scientifique de ce mémoire. Découpée en huit étapes, la méthode pourra guider les concepteurs de JN à identifier quels éléments du contexte sont pertinents à être intégrés ce qui évitera à la PME d'investir inutilement dans une technologie pour capter une donnée inutile au cas d'application. La méthodologie proposée répond aux problématiques énoncées précédemment et contribue ainsi à répondre au sous-objectif 3. L'originalité de cette méthode est de définir des distributions statistiques basées sur les connaissances métier pour identifier les facteurs pouvant impacter la problématique ciblée.

Finalement, la troisième contribution est l'expérimentation de cette méthodologie pour un JN d'un entrepôt d'une entreprise manufacturière du Québec ce qui satisfait au sous-objectif 4. L'expérimentation a permis de cibler les facteurs contextuels pertinents à intégrer pour accroître la précision du modèle de simulation. Plus spécifiquement, une liste d'ICs à intégrer au JN en ordre de priorité en fonction du gain et du coût d'implantation a été définie (1-la vitesse de marche (D); 2-le taux d'occupation (I) puis 3-l'indice de mixité (H)). L'expérimentation a permis également de

montrer la présence d'un effet combinatoire quoique non significatif sur l'augmentation du temps moyen des vagues grâce à la combinaison des facteurs contextuels. Au-delà de ces conclusions, il a été montré que les facteurs contextuels pertinents au cas d'application contribuent à la validation du modèle en augmentant sa précision de 26.5% par rapport au modèle initial.

Toutefois, l'étude comporte certaines limites. D'abord, au niveau de la revue de littérature, un JN fonctionnel d'entreposage est un système complexe exigeant un long processus de développement. À vrai dire, plusieurs barrières organisationnelles peuvent freiner les PME dans l'adoption de cette technologie ce qui est encore plus vrai pour l'intégration ciblée d'ICs au modèle. En ce qui concerne la méthodologie, celle-ci a été testée uniquement sur un cas d'application où la précision du modèle de simulation initial est faible. Au niveau de l'expérimentation, un biais dans les résultats peut provenir de la modélisation des ICs dans le modèle de simulation. En fait, d'autres alternatives de modélisation pourraient être envisagées pour représenter plus fidèlement le facteur contextuel à la réalité. L'écart-type des écarts reste relativement similaire à celui du modèle initial malgré l'ajout de facteurs contextuels ce qui sous-entend que la complexité du contexte n'est pas totalement représentée dans le modèle de simulation. Certains facteurs pertinents à l'étude ont peut-être été oubliés ou éliminés trop rapidement dans l'expérimentation rendant par le fait même impossible la détection de corrélations entre ces facteurs. À ce sujet, l'étude des combinaisons de facteurs et de leurs impacts sur la précision du modèle pourrait davantage être détaillée. De plus, le périmètre de l'étude ne permet pas de dégager des conclusions sur les facteurs contextuels influençant la tâche de ramassage des produits finis dans le monde réel puisque leur impact a été évalué uniquement au niveau du modèle de simulation.

Plusieurs perspectives de recherches futures peuvent être dégagées pour donner suite à ces limites. D'abord, expérimenter la dernière étape d'implantation des données contextuelles d'intérêt au JN serait fondamentale afin de pouvoir quantifier le gain réel sur la précision du modèle de simulation et qui par le fait même affinerait la compréhension des étapes de la méthodologie qui à notre connaissance n'a jamais été testée. De plus, l'identification des corrélations entre les facteurs contextuels pourrait en soi faire l'objet d'un projet de maîtrise. Des recherches futures devraient également tester la méthodologie sur un plus grand échantillon de cas. En fait, il serait intéressant d'utiliser des modèles de simulation initiaux avec des particularités différentes au cas d'application de ce mémoire. Notamment, la méthodologie devrait être testée sur des modèles de simulation ayant différents niveaux de performance ce qui permettrait d'évaluer plus finement la capacité de

la méthode à identifier les facteurs contextuels pertinents. Par ailleurs, l'utilisation d'une caméra 360° à l'étape cinq (Confirmation) est une piste intéressante à explorer pour préciser les distributions statistiques des données contextuelles. L'analyse des vidéos permet d'obtenir des durées précises des actions en plus d'identifier des éléments qui n'ont pas été nommés aux étapes précédentes comme le temps de ramassage. Une piste d'amélioration à tester serait de combiner l'étape trois avec l'étape cinq, ce qui éviterait de réaliser la première phase de tests (étape quatre) puisque les distributions obtenues seraient déjà précisées grâce aux données des vidéos. Pour pousser l'idée plus loin, la première étape de la méthodologie pourrait être une étape d'observation des tâches d'intérêt grâce à l'utilisation d'une caméra. Cette proposition permettrait d'alimenter les discussions lors de l'atelier Ishikawa grâce au contenu des vidéos. Les discussions seraient sans doute davantage centrées sur la problématique liée aux éléments contextuels ce qui permettrait d'identifier plus facilement certains facteurs contextuels. Une autre alternative à envisager serait d'obtenir les connaissances métier d'au moins deux experts pour éviter d'obtenir une perception limitée des éléments du contexte.

Pour conclure, la méthodologie développée dans ce mémoire est un avancement pour simplifier l'identification des facteurs contextuels qui sont pertinents à intégrer à un JN et contribue au fonctionnement optimal du modèle. Bien entendu, un travail supplémentaire est requis pour encourager les concepteurs à implanter des données contextuelles à un JN au sein d'une PME et de réduire éventuellement les dépenses en technologies.

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>
- Bauer, C., & Dey, A. K. (2016). Considering context in the design of intelligent systems: Current practices and suggestions for improvement. *Journal of Systems and Software*, *112*, 26-47. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2015.10.041>
- 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* [Paper presentation]. 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>
- Buell, G. (2014). *Fenceless System Basic concepts and design* [Friday Webinar Series]. Fanuc.
- 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* [Paper presentation]. International Conference on Information, Cybernetics, and Computational Social Systems. <https://doi.org/10.1109/iccss52145.2020.9336832>
- 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>
- Consuunt. *What is the Five Whys method.* <https://www.consuunt.com/5-whys-method/#:~:text=No.%20Sometimes%2C%20with%20just%203%20%E2%80%9CWhys%20is%20enough.,get%20to%20%E2%80%9Cbedrock%20with%20less%20than%205%20Whys.>
- 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).
- Falcao, R., Villela, K., Vieira, V., Trapp, M., & de Faria, I. L. (20-24 sept 2021). *The practical role of context modeling in the elicitation of context-aware functionalities: a survey* [Paper presentation]. IEEE 29th International Requirements Engineering Conference (RE), Indiana, USA. <https://doi.org/10.1109/re51729.2021.00011>
- 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* [Paper presentation]. 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>
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Rab, S., & Suman, R. (2021). Significance of sensors for industry 4.0: Roles, capabilities, and applications. *Sensors International*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100110>
- 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>
- Kalsoom, T., Ramzan, N., Ahmed, S., & Ur-Rehman, M. (2020). Advances in Sensor Technologies in the Era of Smart Factory and Industry 4.0. *Sensors (Basel)*, 20(23). <https://doi.org/10.3390/s20236783>
- 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>
- Khanzode, V., & Shah, B. (2017). A comprehensive review of warehouse operational issues. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 26(3). <https://doi.org/10.1504/ijlsm.2017.10002597>
- 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>
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016-1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- 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>

- Liliana, L. (2016). A new model of Ishikawa diagram for quality assessment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 161. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/161/1/012099>
- 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>
- Robinson, S. (2011). *Choosing the right model: Conceptual modeling for simulation*. Winter Simulation Conference (WSC) (p. 1423-1435). <https://doi.org/10.1109/wsc.2011.6147862>
- 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* [Paper presentation]. 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>
- Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, 14(3), 207-222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>
- 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 – QUESTIONNAIRE

Bonjour,

Je fais appel à vous pour obtenir certaines précisions sur ce qui pourrait influencer les temps de vagues. Je ne demande pas à avoir des réponses basées sur des données réelles. Je souhaite plutôt obtenir l'impression générale du terrain. Les réponses peuvent donc être des hypothèses basées sur votre connaissance du plancher. Autrement dit, des approximations/intervalles peuvent m'être données.

Temps des vagues

1. Quels facteurs peuvent avoir un impact sur le temps total des vagues? Les localisations proposés (manque de « *path finding* »), le passage de robots AMR (qui bloquent parfois l'allée), le temps de chargement de l'interface WMS, le placotage, le nombre d'items sur la vague, la diversité des items sur la vague (plus de diversité = plus d'alvéoles), c'est une hypothèse, mais, probablement l'heure de la journée et la journée de la semaine...
2. Quels facteurs peuvent avoir un impact sur le temps de ramassage (temps où l'opérateur est devant l'alvéole)? La quantité d'articles dans l'alvéole (plus difficile de trouver ce que l'on cherche), la diversité des articles (plusieurs modèles) sont les deux principaux selon moi

Mixité : Nombre de modèles différents dans une alvéole

3. Quel est l'impact d'avoir un nombre élevé de modèles différents dans une alvéole sur le temps de ramassage? Quelle la relation entre mixité et temps de ramassage? Selon moi le fait d'avoir plusieurs modèles de boîtes dans une même alvéole ralentit certainement l'opérateur puisque plutôt que de prendre une seule boîte au hasard, il doit trouver la bonne boîte. Cette boîte peut parfois se trouver dans la rangée du fond, et en dessous de la pile, l'opérateur doit donc sortir plusieurs boîtes afin d'arriver à celle qu'il veut.
4. À partir de combien de modèles différents est-ce que l'augmentation du temps de ramassage devient significative? Difficile à dire, selon moi, quand on dépasse 4-5 modèles c'est plus difficile.
5. Combien de temps supplémentaire peut prendre le ramassage du produit lorsque le seuil de mixité (réponse à la question 2) est atteint? Encore une fois, difficile à dire, mais, peut-être

en moyenne 20 secondes de plus, et, dans le pire des cas, une minute ? (Si elle est derrière le tout et en dessous)

Temps de recherche

6. À quelle fréquence est-ce qu'un produit d'une vague est perdu dans l'entrepôt? Peut-être une vague sur 50. Pas souvent, mais ça arrive.
7. Combien de temps est-ce que ça peut prendre pour retrouver le produit perdu? Cela peut prendre entre 5 et 20 minutes et bloque la ligne d'expédition lorsque ça survient.
8. Ça prend combien de temps trouver un produit dans l'alvéole (lorsque le produit est bel et bien présent dans l'alvéole)? Tout dépend de la position du produit ainsi que de la mixité de l'alvéole.
 - a. Dans un alvéole contenant 1-3 produits, je dirais probablement 5-10 secondes
 - b. Dans un alvéole contenant 4+ produits, cela peut se rendre dans les 30 secondes pour le trouver, car il faut parfois tasser les piles.

Vitesse des opérateurs

9. Comment qualifierais-tu la vitesse des opérateurs (normal/rapide/lente, fixe/variable)? À quelle vitesse les opérateurs semblent marcher? Ils marchent à vitesse « normal » pour la plupart. Il y a certainement des « pics » de motivation (ex : le Vendredi AM), et des « down » de motivation (probablement les Lundi AM), mais, en général, « normal » le décrit bien.
10. Est-ce que tous les opérateurs marchent à une vitesse similaire? Ils marchent pas mal tous à une vitesse similaire. (Sauf Monsieur X s'il en fait, lui c'est de la course!)
11. Si non, quel opérateur marche plus vite/lent? Pourrais-tu quantifier la différence? Par exemple, un tel marche 2 fois plus vite que les autres. Honnêtement, tels que dit ci-haut, pour la plupart des opérateurs, ils marchent tous. Aucune différence notable à mon avis. (Excepté pour Monsieur X)
12. Par opérateur, comment crois-tu que sa vitesse de marche fluctue? Ce n'est qu'une hypothèse, mais je pense que la vitesse peut être plus rapide le matin, plus lente le midi,

plus rapide en début PM, puis, plus lente en fin PM. Selon moi, la vitesse fluctue probablement également avec la journée de la semaine (mais ce n'est qu'une hypothèse!).

- a. -Est-ce qu'il marche à une vitesse relativement constante? Je pense que oui.
- b. Si non, à quoi ressemblerait la vitesse minimum/moyenne/maximale de l'opérateur?
- c. Est-ce que la distance parcourue impacte sur la vitesse de marche? Je ne pense pas que la distance parcourue soit assez grande pour impacter sa vitesse.
- d. Est-ce qu'ils marchent plus lentement en fin de journée? Je crois que oui.
- e. Est-ce qu'ils marchent plus rapidement en début de journée? Je crois également que oui.

Date d'embauche

13. Est-ce qu'un nouvel employé prend plus de temps à compléter sa vague? Certainement.
14. Si oui, combien de temps supplémentaire? Très difficile à évaluer, mais, selon-moi, entre 1 et 7 minutes probablement.
15. À partir de combien d'heures/jours de travail réalisé, un opérateur a atteint votre standard de performance? Combien de temps est requis pour qu'un opérateur soit considéré "performant"? Honnêtement, je ne sais pas quoi répondre ! Je dirais que du moment que l'opérateur se trouve dans la moyenne des opérateurs en termes de ramassage de vague pour la journée il est considéré comme « performant » (cela dépend du nombre de vagues générées dans une journée).

Distraction

16. Durant la réalisation d'une vague, est-ce qu'un opérateur peut avoir des distractions? (Placotage, arrêt de la vague pour compléter d'autres tâches sans l'indiquer dans l'application WMS, etc.)? Oui

Si oui,

- a) Les distractions sont de quelle nature/type? Principalement le placotage, je crois qu'il arrive plutôt rarement qu'un opérateur arrête sa vague pour faire autre chose (en général il la termine avant).

- b) À quelle fréquence est-ce que les distractions surviennent? Difficile à dire, mais, en général, en débutant une vague, ils se trouvent tous dans la zone centrale, donc, plus de chance de placoter à cet endroit.
- c) Combien de temps supplémentaire est requis pour compléter la vague? Entre 1 et 5 minutes je dirais.

Taux d'occupation

17. Quel est l'impact d'avoir un taux d'occupation élevé d'une alvéole sur le temps de ramassage? Quelle la relation entre taux d'occupation et temps de ramassage? Je pense que ça dépend grandement du taux de mixité de l'alvéole. (S'il y a deux types d'articles pour 50 articles, ce sera très rapide, tandis que s'il y a 20 articles, mais tous mixtes, ce sera beaucoup plus long). Donc, je pense qu'à moins d'avoir un taux d'occupation très faible, la mixité a un impact plus prononcé sur le temps de ramassage que son occupation. Une alvéole avec une mixité nulle est un ramassage instantané tandis qu'une avec une grande mixité peut facilement prendre plusieurs dizaines de secondes.
18. À partir de quel taux d'occupation est-ce que l'augmentation du temps de ramassage devient significative? Je vais rediriger la question vers le taux de mixité et d'occupation plutôt que simplement le taux d'occupation (pour la raison expliquée ci-haut)
1. Si taux d'occupation faible et mixité faible – Ramassage rapide (1)
 2. Si taux d'occupation faible et mixité élevée – Ramassage plus lent (3)
 3. Si taux d'occupation élevé et mixité faible – Ramassage rapide (2)
 4. Si taux d'occupation élevé et mixité élevée – Ramassage très lent (4)

J'ai indiqué entre parenthèse l'ordre du plus rapide au plus lent selon moi.

19. Combien de temps supplémentaire peut prendre le ramassage du produit lorsque le seuil du taux d'occupation (réponse à la question 17) est atteint? Encore une fois, je continue sur mon idée du taux d'occupation plus mixité. Selon moi, c'est peu significatif dans les cas A, B et C. Mais ça devient extrêmement significatif plus l'on s'approche du D. Tel que dit ci-haut, une alvéole « non mixte » est un ramassage instantané, et, plus l'on s'éloigne, plus ça peut être long. Si les boîtes cherchées se trouvent dans le fond et en dessous de toutes les

autres boîtes (pire scénario), on peut selon moi perdre environ 1min30 (car il faut déplacer les paires, trouver celle qu'on cherche puis remettre les paires à leur place).

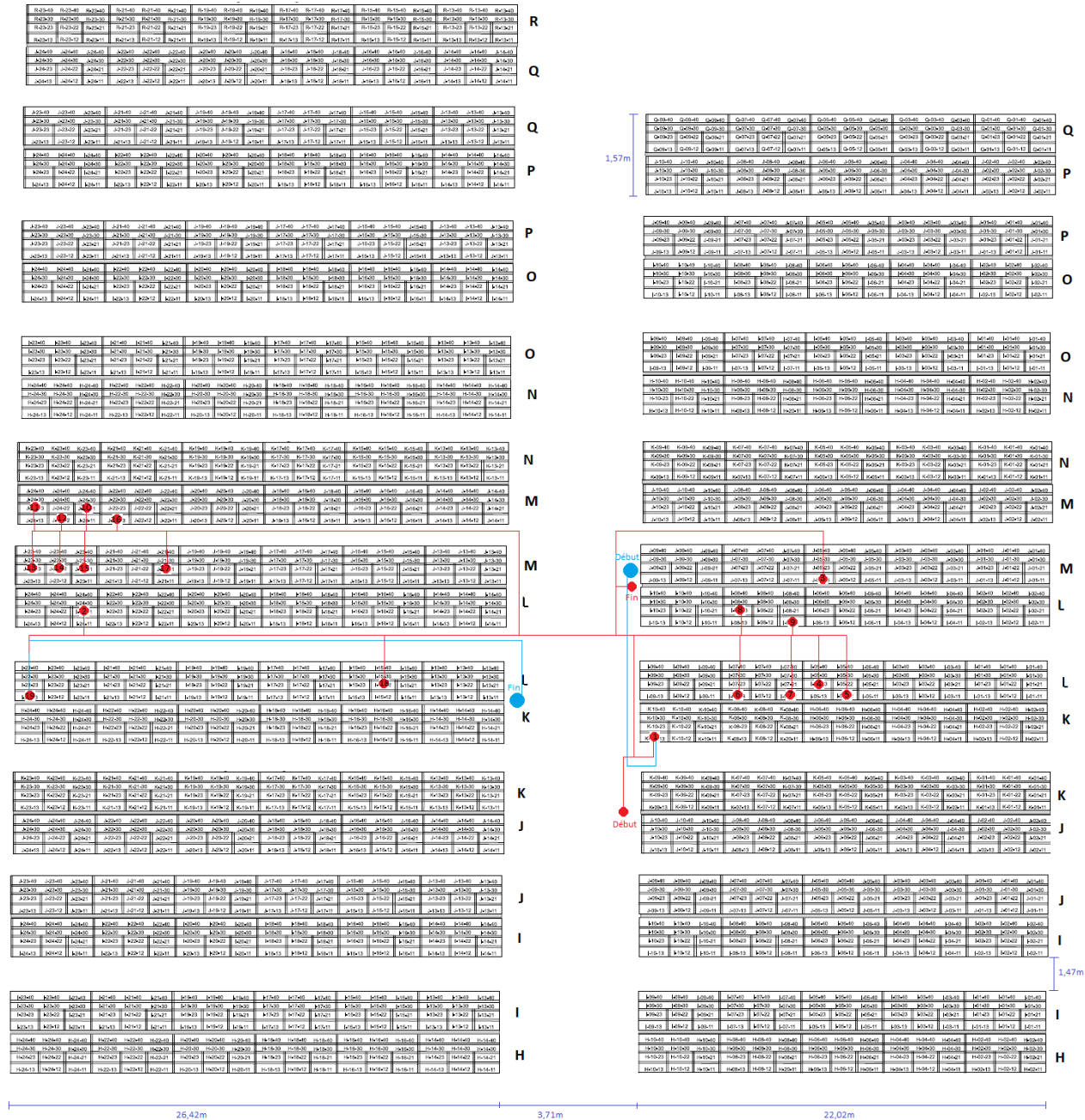
Encore une fois, je ne m'attends pas à ce que les réponses fournies soient exactes. Je cherche à apprendre ce que l'on entend du plancher, donc les connaissances métier sur le sujet.

Merci pour votre temps!

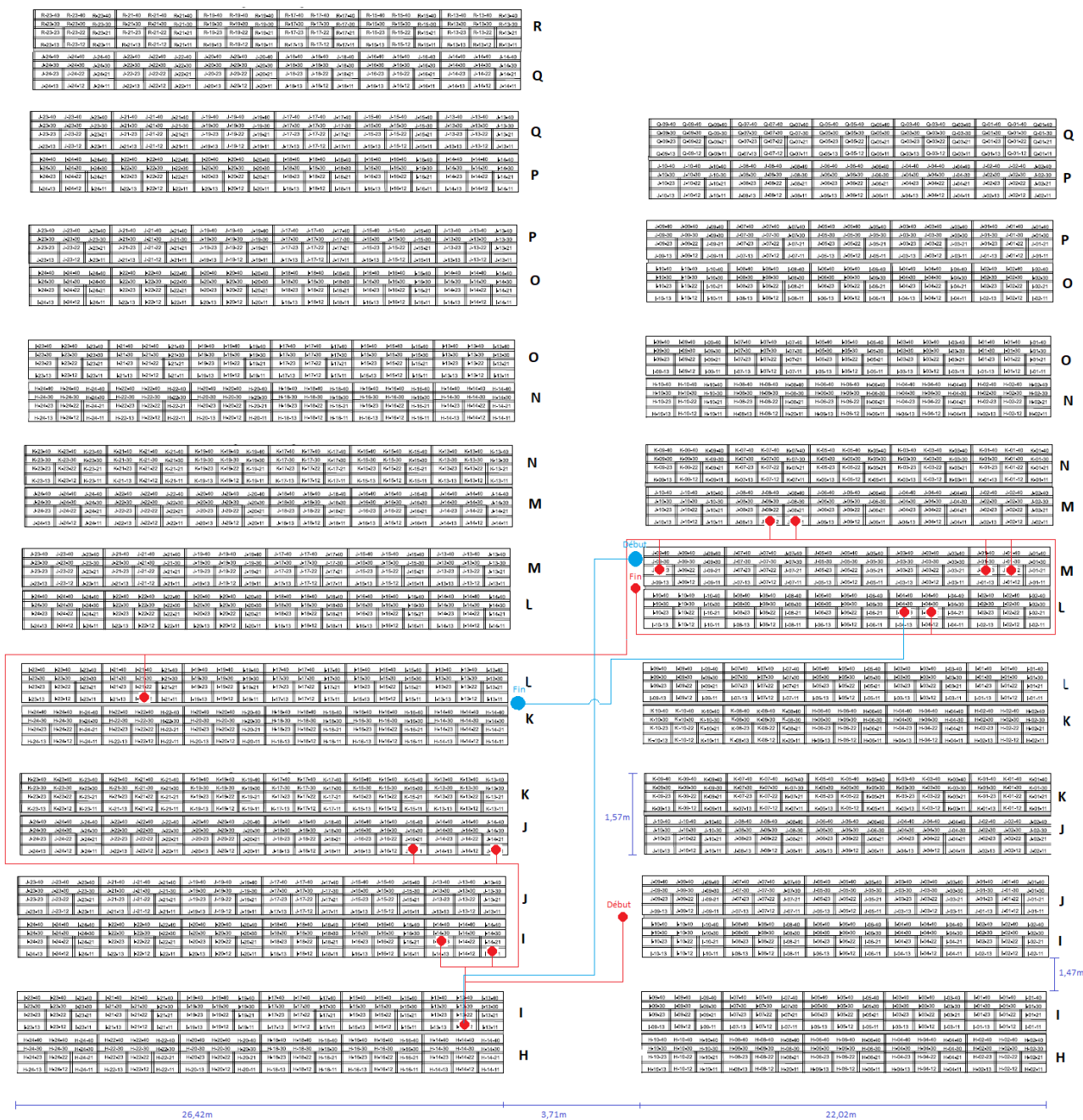
Marie-Jane Bélanger

Étudiante à la maîtrise en génie industriel

ANNEXE B – CARTES DES DÉPLACEMENTS



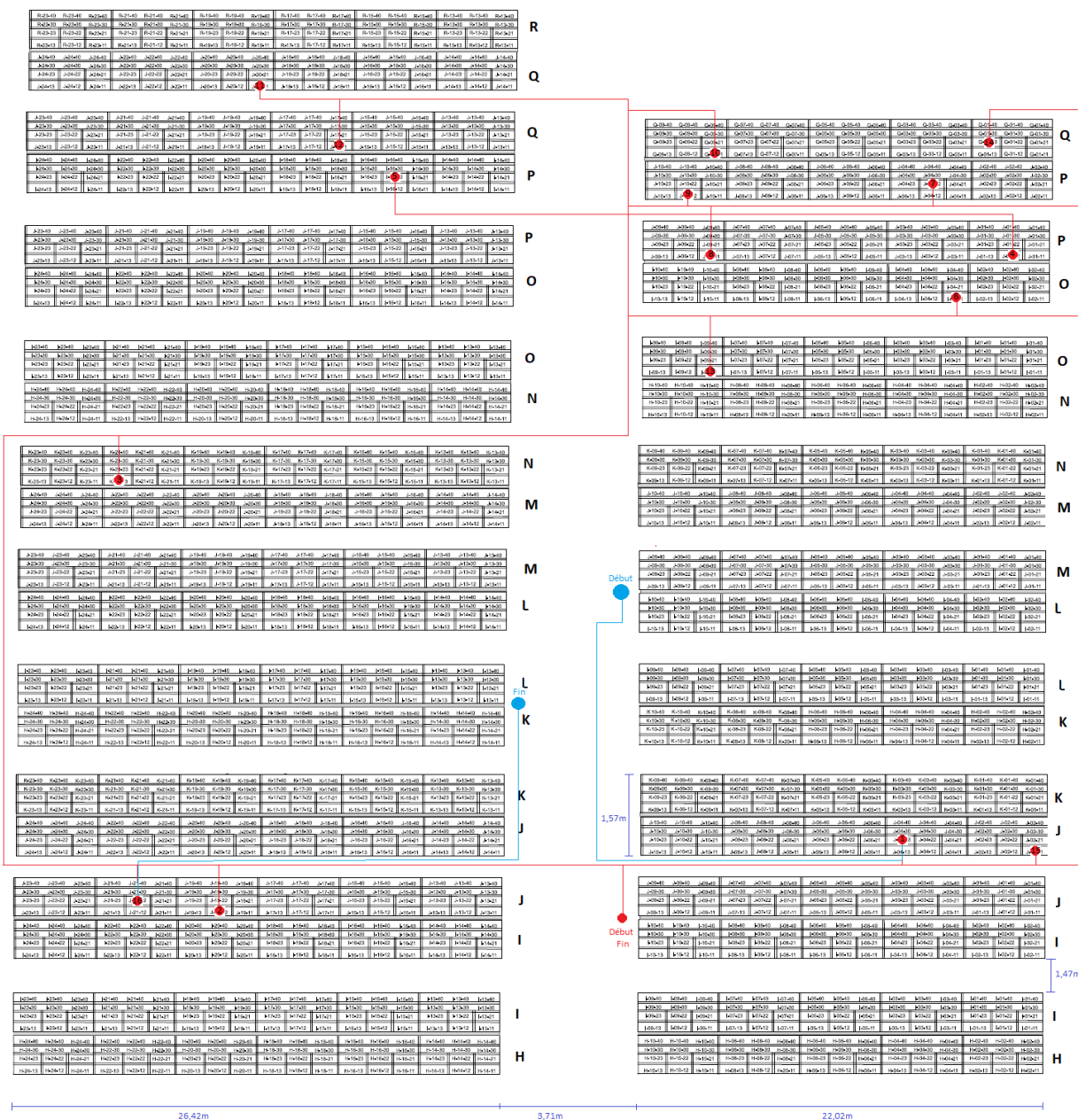
Ligne rouge : trajet réel. Ligne bleue : trajet simulé
 Figure B.1 : Déplacements de la vague 1



Ligne rouge : trajet réel. Ligne bleue : trajet simulé
 Figure B.2 : Déplacements de la vague 2



Ligne rouge : trajet réel. Ligne bleue : trajet simulé
 Figure B.3 : Déplacements de la vague 3



Ligne rouge : trajet réel. Ligne bleue : trajet simulé
 Figure B.4 : Déplacements de la vague 4