



**Titre:** Estimation des distances lors de la préparation de commande  
Title:

**Auteur:** Maher Saoudi  
Author:

**Date:** 2017

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Saoudi, M. (2017). Estimation des distances lors de la préparation de commande  
Citation: [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.  
<https://publications.polymtl.ca/2827/>

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

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/2827/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de  
recherche:** Diane Riopel  
Advisors:

**Programme:** Maîtrise recherche en génie industriel  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ESTIMATION DES DISTANCES LORS DE LA PRÉPARATION DE COMMANDE

MAHER SAOUDI

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUEES

(GÉNIE INDUSTRIEL)

NOVEMBRE 2017

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ESTIMATION DES DISTANCES LORS DE LA PRÉPARATION DE COMMANDE

présenté par : SAOUDI Maher

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

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

M. AGARD Bruno, Doctorat, président

Mme RIOPEL Diane, Doctorat, membre et directrice de recherche

M. GAMACHE Michel, Ph. D, membre et codirecteur de recherche

M. ADJENGUE Luc-Désiré, Ph. D, membre

## DÉDICACE

*À ma famille.*

## **REMERCIEMENTS**

J'aimerais remercier mes directeurs de recherche Diane Riopel et Michel Gamache de m'avoir guidé et consacré leurs temps précieux dans l'ensemble de mes travaux de recherche afin d'accomplir ce projet. Je désire exprimer mes gratitude pour leur encadrement remarquable et leurs conseils précieux qui m'ont orienté tout au long de ces deux années sur le plan soit professionnel soit personnel.

Ensuite, je souhaite remercier énormément Moustapha Ahmed Bouh, mon collègue de bureau, pour ses conseils et son aide.

Je tiens aussi à remercier tous mes professeurs à l'École Polytechnique, mes camarades de classe, et mes collègues de bureau.

## RÉSUMÉ

Le système de préparation de commande est l'un des processus les plus importants dans le fonctionnement d'un entrepôt. Dans un contexte où les entreprises cherchent à optimiser chaque fonctionnement, le processus de préparation de commande ne fait pas l'exception et les entreprises doivent constamment réévaluer la performance des systèmes établis. Plusieurs axes d'amélioration se posent. Les quatre plus pertinents ont été listés dans ce travail : (1) l'implantation de la zone d'entreposage, (2) la méthode de préparation de commande, (3) le modèle de circulation et (4) la politique de localisation des stocks. Le concepteur se trouvera finalement en face d'un système de préparation de commande dont il doit mesurer la performance. La revue de littérature présente plusieurs indicateurs qui ont été regroupés en six classes : indicateurs du temps, de distance, de rendement, de coût, techniques et orientés-clients. Le choix entre ces indicateurs se fait de plusieurs façons qui ne se basent pas sur une méthodologie précise. En plus, il n'y a pas de relations claires entre le choix des indicateurs et l'axe d'amélioration retenu. Par conséquent, le suivi de plusieurs indicateurs à la fois semble nécessaire. À travers ce mémoire, nous présentons un outil analytique pour estimer la distance parcourue et suivre l'un des plus importants indicateurs de performance. À cette fin, un exemple d'entrepôt, que nous jugeons représentatif de plusieurs entrepôts, a été choisi avec un jeu de données générées aléatoirement. Finalement, les résultats donnés par l'outil analytique ont été comparés avec des résultats de simulation.

## **ABSTRACT**

The order picking system is one of the most important processes in the operation of a warehouse. In a context where companies seek to optimize each operation, the order picking process is no exception and companies must constantly re-evaluate the performance of established systems. There are several areas for improvement. The four most relevant ones are listed in this work: (1) warehouse layout, (2) order preparation method, (3) circulation model and (4) location policy stocks. The designer is finally faced with a command preparation system whose performance must be evaluated. The literature review presents several indicators that have been grouped into six classes: time, distance, performance, cost, technical and customer-oriented indicators. The choice between these indicators is made in several ways that are not based on a specific methodology. In addition, there is no clear relationship between the choice of indicators and the improvement axis. Therefore, the monitoring of several indicators at a time seems necessary. Through this paper, we present an analytical tool to estimate the distance traveled and to follow one of the most important performance indicators. To this end, an example of a warehouse, which we consider representative of warehouses found in the industry, was selected with a randomly generated data set. Finally, the results given by the analytical tool were compared with simulation results.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	iii
REMERCIEMENTS .....	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT .....	vi
TABLE DES MATIÈRES .....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	xii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION .....	1
1.1 Description du cas d'étude .....	2
1.2 Problématique.....	4
1.3 Objectif du mémoire.....	5
1.4 Structure du mémoire .....	5
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	6
2.1 Introduction .....	6
2.2 Système de préparation de commande .....	7
2.3 Axes d'amélioration des systèmes de préparation de commande .....	8
2.3.1 Politique d'entreposage de la marchandise .....	8
2.3.2 Modèle de circulation.....	9
2.3.3 Méthode de préparation de commande .....	10
2.3.4 Implantation .....	11
2.4 Indicateurs de performance .....	11
2.4.1 Classes d'indicateurs.....	11



2.4.2	Choix des indicateurs .....	14
2.5	Outil de simulation .....	16
2.6	Conclusion .....	17
CHAPITRE 3	ESTIMATION DE DISTANCE .....	18
3.1	Introduction .....	18
3.2	Modèle analytique d'estimation de distance .....	18
3.2.1	Stratégies de circulation .....	20
3.2.2	Hypothèses .....	22
3.2.3	Notation .....	23
3.2.4	Distance de base <b><i>DSB</i></b> .....	25
3.2.5	Distance entre les allées <b><i>DSA</i></b> .....	25
3.2.6	Distance dans les allées <b><i>DSW</i></b> .....	27
3.2.7	Distance verticale <b><i>DSV</i></b> .....	30
3.3	Forme générique des formules de distance .....	32
3.3.1	Distance entre les allées .....	33
3.3.2	Distance dans les allées .....	33
3.3.3	Distance verticale .....	34
3.4	Conclusion .....	35
CHAPITRE 4	RÉSULTATS .....	36
4.1	Introduction .....	36
4.2	Méthodologie générale .....	36
4.3	Jeux de données .....	36
4.4	Modèle analytique et simulation .....	38
4.5	Résultats .....	39

4.6	Résultats pour la stratégie <b>S1</b> .....	40
4.7	Résultats pour la stratégie <b>S2</b> .....	42
4.8	Résultats pour la stratégie <b>S3</b> .....	44
4.9	Résultats pour la stratégie <b>S4</b> .....	45
4.10	Conclusion .....	47
CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....		48
BIBLIOGRAPHIE .....		49

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 : Fréquences d'accès dans une allée de service .....	37
Tableau 4.2 : Exemple de liste de commandes .....	38
Tableau 4.3 : Données utilisées pour l'entrepôt .....	38
Tableau 4.4 : Lois de probabilité pour les classes des commandes tests .....	39
Tableau 4.5 : Erreur relative des distances horizontales pour $S1$ .....	40
Tableau 4.6 : Erreur relative des distances verticales pour $S1$ .....	41
Tableau 4.7 : Erreur relative des distances horizontales pour $S2$ .....	43
Tableau 4.8 : Erreur relative des distances verticales pour $S2$ .....	44
Tableau 4.9 : Erreur relative des distances horizontales pour $S3$ .....	45
Tableau 4.10 : Erreur relative des distances verticales pour $S4$ .....	46

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1.1 : Implantation à bloc unique .....	2
Figure 1.2 : Implantation à double bloc .....	3
Figure 1.3 : Exemple d'un chariot de magasinier (Crown Equipment Corporation., 2013) .....	4
Figure 2.1 : Classification des systèmes de préparation de commande .....	6
Figure 2.2 : Proportions des choix des axes d'amélioration .....	8
Figure 2.3 : Pourcentage d'utilisation des indicateurs pour les articles à un seul indicateur .....	14
Figure 3.1 : Distribution empirique des fréquences d'accès le long d'une allée .....	19
Figure 3.2 : Fonction de densité représentant la fréquence d'accès le long d'une allée (figure à titre indicatif) .....	20
Figure 3.3 : Dents de peigne avec répétitions (stratégie S1) .....	21
Figure 3.4 : : Dents de peigne sans répétition (stratégie S2) .....	21
Figure 3.5 : : Traversée avec sauts (stratégie S3) .....	22
Figure 3.6 : Traversée sans saut (stratégie S4) .....	22
Figure 3.7 : Composantes de distance .....	23
Figure 3.8 : Notation de distance pour les deux implantations possibles .....	24
Figure 4.1 : : Comparaison des distances horizontales pour la stratégie S1 .....	40
Figure 4.2 : Comparaison des distances verticales pour la stratégie S1 .....	41
Figure 4.3 : Comparaison des distances horizontales pour la stratégie S2 .....	42
Figure 4.4 : Comparaison des distances verticales pour la stratégie S2 .....	43
Figure 4.5 : Comparaison des distances horizontales pour la stratégie S3 .....	45
Figure 4.6 : Comparaison des distances horizontales pour la stratégie S4 .....	46

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

UGS	Unité de gestion de stock
S	Stratégie
FA	Fréquence d'accès
$N^{UGS}$	Nombre d'UGS dans l'entrepôt
$N_a^{UGS}$	Nombre d'UGS par allée
$N_c^{UGS}$	Nombre d'UGS par colonne
$N$	Nombre moyen de lignes par commande arrondi à l'entier le plus près
$N_a$	Nombre d'allées
$N_c$	Nombre de colonnes par allée
$N_n$	Nombre de niveaux
$i$	Numéro de l'allée de $1 \dots, N_a$
$j$	Numéro de colonne de $1 \dots, N_c$
$k$	Numéro de niveau de $1 \dots, N_n$
$r$	Nombre de lignes à prélever dans une allée $i$ de $0 \dots, \min\{N, N_a^{UGS}\}$
$s$	Nombre de lignes à prélever dans une colonne $j$ de $0 \dots, \min\{N, N_c^{UGS}\}$
$U_A$	Unité de distance horizontale entre les allées
$U_W$	Unité de distance horizontale dans une allée de service
$U_V$	Unité de distance verticale
$L$	Distance avant d'entrer dans une allée de service
$L_b$	Distance de base de l'entrepôt entre le point E/S et l'allée de service 1.
$k_b$	Indice de niveau à partir duquel un déplacement vertical est considéré de 1 à $N_n$
$P_a(i)$	Probabilité d'accès à une allée $i$
$P_c(i, j)$	Probabilité d'accès à une colonne $j$ dans une allée de service $i$
$P_n(i, j, k)$	Probabilité d'accès à un niveau $k$ dans une colonne $j$ dans une allée de service $i$
$P_p(r)$	Probabilité d'accès à une allée de service $i$ si $r$ UGS doit y être prélevées
$P_l(s)$	Probabilité d'accès à une colonne avec $s$ UGS doit y être prélevées

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

La préparation de commande est une activité qui fait partie du quotidien de tout le monde. Chaque fois qu'une personne magasine, elle est, sans s'en rendre compte, en train d'exécuter des tâches de préparation de commande. En effet, les éléments qui caractérisent l'activité de magasinage sont les mêmes pour les systèmes de préparation de commande. Le magasin ou le supermarché reconstitue dans ce cas un entrepôt ou un centre de distribution. L'acheteur incarne le préposé de préparation de commande. La liste d'achats représente la liste de prélèvement dans le système de préparation de commande. Dans ce cadre et pour certaines personnes, le fait de magasiner est perçu comme une charge de plus et une activité fatigante. Ces personnes ont tendance à optimiser leurs expériences de magasinage. Ils essaient de minimiser le temps passé dans le magasin, faire moins d'erreurs dans les produits à acheter, parcourir le moins de distance et minimiser le nombre de visites à rendre aux supermarchés. Afin d'alléger les tâches de magasinage, certaines pratiques sont suivies, telles que regrouper les achats par semaine ou suivre un trajet qui permet le moins d'aller-retour au même endroit dans les rayons. À une plus grande échelle, les entreprises partagent les mêmes préoccupations que ces gens. En effet, ces entreprises font affaire avec des systèmes qui engendrent des coûts qui représentent plus de 50 % des coûts liés à l'entreposage (De Koster et al., 2007). En outre, les responsables des entrepôts considèrent le temps alloué à la préparation de commande comme du gaspillage parce qu'il n'y a aucune valeur ajoutée aux produits pendant ce temps-là (De Koster et al., 2007). En plus, la préparation de commande est une activité qui nécessite beaucoup d'effort physique ainsi que beaucoup de déplacements dans l'entrepôt. Pour ces raisons et pour plusieurs autres, les entreprises essaient de façon continue de bien concevoir ou d'améliorer leurs systèmes de préparation de commande.

Dans ce contexte, les entreprises cherchent à avoir de meilleurs outils d'aide à la décision qui permettent de mesurer l'impact de leurs choix. Ces outils d'aide à la décision se basent sur la mesure et l'estimation des indicateurs de performance des systèmes de préparation de commande. En améliorant ces indicateurs, les entreprises demeurent compétitives sur le marché et garantissent un meilleur service à la clientèle. Ces indicateurs se regroupent principalement deux types d'outils. Un premier groupe est axé sur la gestion des opérations du système de préparation de commande sur une base quotidienne. Ces outils se basent sur des indicateurs de niveau opérationnel. Un

deuxième groupe d'indicateurs d'ordre stratégique est utilisé comme l'outil d'aide à la décision pour des problèmes de conception.

Dans ce mémoire, nous présentons les indicateurs de performance d'ordre stratégique sur lesquels les créateurs se basent pour concevoir des systèmes de préparation de commande. Nous présentons aussi un modèle qui permet d'estimer un maximum de ces indicateurs de performance pour ces systèmes.

## 1.1 Description du cas d'étude

Notre travail de recherche est effectué sur un modèle d'entrepôt que nous jugeons représentatif de plusieurs entrepôts réels. Les détails du modèle de l'entrepôt sont des détails factices, mais qui traduisent des réalités existantes.

Dans le cadre de ce projet, nous prenons une entreprise fictive. Notre entreprise gère son propre entrepôt. Cet entrepôt est caractérisé par une implantation classique avec une configuration à bloc unique ou à doubles blocs. Il inclut un point entrée/sortie (E/S). Le point E/S est le lieu de départ du préparateur et il également le lieu de retour. Cet entrepôt est composé de palettiers à plusieurs niveaux. Ces derniers nécessitent l'utilisation une machine avec un humain à bord pour les atteindre. L'exemple de l'implantation pour des entrepôts typiques est représenté par les figures 1.1 et 1.2.



Figure 1.1.1 : Implantation à bloc unique

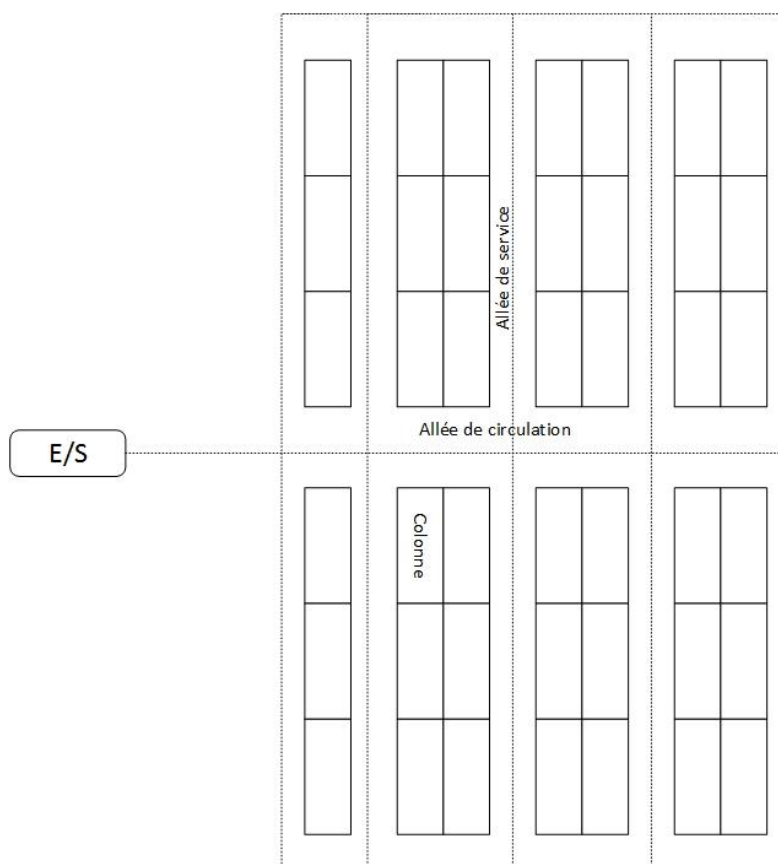


Figure 1.2 : Implantation à double bloc

Dans cet entrepôt, la préparation de commande se fait d'une manière statique. Une fois que la liste de prélèvements est prête, le préparateur se dirige vers la zone d'entreposage pour ramasser la commande. Ensuite, le préparateur amène les produits vers la zone de consolidation de commande. La préparation de commande se fait à l'aide d'un chariot de magasinier qui permet d'atteindre les produits entreposés aux niveaux supérieurs des palettiers (figure 1.3). Le prélèvement des produits se fait principalement selon deux stratégies de circulation : (1) en dents de peigne (figure 3.3 et figure 3.4) et (2) en alterné (figure 3.5 et figure 3.6). L'entrepôt en question compte plusieurs unités de gestion de stock (UGS). Chaque UGS est assignée de manière permanente à un emplacement d'entreposage.





Figure 1.3 : Exemple d'un chariot de magasinier (Crown Equipment Corporation., 2013)

## 1.2 Problématique

Dans le cadre des travaux de conception des systèmes de préparation de commande, les concepteurs focalisent leur effort d'amélioration généralement sur un seul facteur d'amélioration. Les décisions prises ont pour but d'optimiser un indicateur sans tenir compte du comportement des autres indicateurs. Cependant, il est possible de mesurer les différents indicateurs de performance soit à travers la simulation, soit par des modèles d'estimation. À ce sujet, les outils de simulation ont l'avantage de donner des résultats plus précis et permettre un suivi de plusieurs facteurs en même temps. Par contre, l'utilisation de ces outils reste limitée dans le cadre d'élaboration des modèles mathématiques d'optimisation.

Dans le cas des modèles mathématiques d'estimation, les principales difficultés résident dans :

- La complexité d'estimer de manière précise les indicateurs de performance. En effet, l'estimation se base sur des probabilités ne présentent pas, en général, la réalité à 100 %.
- La complexité d'inclure différents indicateurs sous la même formule mathématique.
- La complexité de faire un modèle d'estimation dans tous les cas possibles.
- La non-existence d'un jeu de données pour effectuer des tests sur le système d'estimation de performance.

### 1.3 Objectif du mémoire

L'objectif principal du mémoire est d'élaborer des modèles mathématiques qui permettent l'estimation de plusieurs indicateurs dans le cadre des deux types d'implantation.

Pour atteindre cet objectif, nous proposons la démarche suivante :

- Chercher les indicateurs de performance utilisés dans les systèmes de préparation de commande.
- Classer les indicateurs de performance selon des critères de ressemblances.
- Élaborer des modèles mathématiques qui permettent l'estimation de plusieurs indicateurs de performance.
- Intégrer les modèles mathématiques d'estimation sous la même formule.
- Valider les modèles à l'aide de la simulation.
- Faciliter l'expérience utilisateur pour la manipulation des modèles par le développement d'un outil Excel.

### 1.4 Structure du mémoire

Le mémoire est structuré de la manière suivante. Le chapitre 2 présente une revue de littérature des systèmes de préparation de commande ainsi que les indicateurs de performance utilisés dans ces systèmes. Ces derniers sont présentés en plus de leurs stratégies de choix. Le chapitre 3 est consacré à la présentation des modèles mathématiques d'estimation de certains indicateurs pour quelques scénarios. Dans ce chapitre, nous présentons la démarche pour modéliser l'entrepôt. Au chapitre 4, nous présentons les modèles de simulation développés pour valider les résultats d'estimation. Dans le chapitre 5, nous présentons des critiques, une conclusion et une ouverture sur de potentielles recherches.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

### 2.1 Introduction

La préparation de commande peut être vue comme étant une activité qui consiste à prélever un nombre défini de produits d'un entrepôt ou d'un centre de distribution (Goetschalckx & Ashayeri, 1989). Les produits sont prélevés pour répondre à un besoin client (Marchet et al., 2011). La préparation de commande inclut des tâches de planification, d'affectation des produits dans des zones d'entreposage, de prélèvement des articles et de consolidation de commandes (Galiardi et al., 2008). À une échelle industrielle, la préparation de commande est une activité qui s'exerce dans les entrepôts ainsi que dans les centres de distribution. De Koster (2004) classifie la préparation de commande sur deux grandes catégories : (1) la préparation de commande employant des humains et (2) la préparation de commande employant des machines. Le premier système se compose de deux sous-catégories : préparateur-aux-produits, là où le préparateur se déplace vers les emplacements d'entreposage pour ramasser les produits dans la liste des commandes et produits-au-préparateur, là où les produits sont amenés au préparateur par un moyen automatique. Les préparateur-aux-produits sont également subdivisés en des systèmes à un seul niveau et des systèmes à plusieurs niveaux.

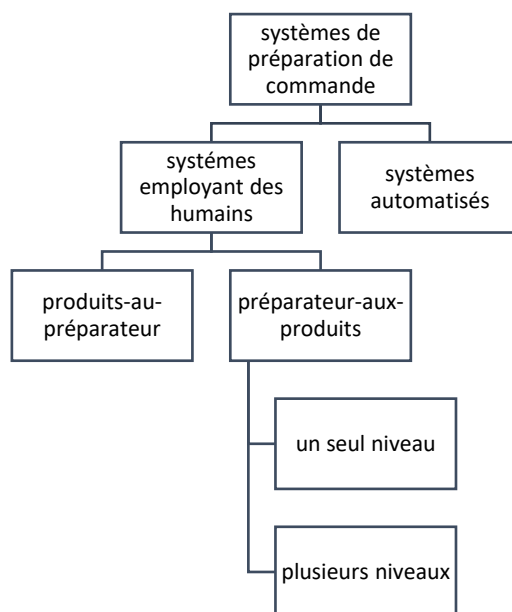


Figure 2.1 : Classification des systèmes de préparation de commande

Dans le reste de ce chapitre, plus de détails ont été apportés concernant les opérations de préparation de commande ainsi que les spécificités de ces systèmes. En outre, une revue a été présentée sur les indicateurs de performance utilisés dans le cadre de mesure de l'efficacité des systèmes de préparation de commande.

L'objectif de ce chapitre est de présenter une revue de littérature sur les indicateurs de performance dans un entrepôt ou un centre de distribution. Ce travail de revue a fait l'objet d'un article de conférence présenté lors du Congrès international de génie industriel CIGI2017. Cette revue a été faite sur 50 articles, publiés entre 2006 et 2016. Ces articles ont été trouvés par le mot clé « order picking ». La plupart des articles, presque 60 %, sont issus de ces trois journaux scientifiques : (1) « European journal of operational research », (2) « IIE Transactions » et (3) « Computers and industrial engineering ». Le nombre d'articles retenues varie entre 2 et 7 par an sauf pour l'année 2012 où nous avons sélectionné 12 articles ainsi que l'année 2015 où nous n'avons retenu qu'un seul article. Nous avons privilégié les articles qui ont utilisé des indicateurs de performance et où il y a un choix d'un ou plusieurs axes d'amélioration. L'état de l'art s'intéresse précisément aux indicateurs de performance proposés dans la littérature. Dans le contexte présenté à l'introduction, les concepteurs des systèmes de préparation de commande ont le choix de travailler avec plusieurs axes d'amélioration. Suite aux actions d'amélioration apportées à un ou plusieurs axes, le concepteur se trouve finalement en face d'une configuration complète d'un système de préparation de commande dont ils doivent mesurer la performance. À ce moment, ils peuvent choisir entre plusieurs indicateurs.

## **2.2 Système de préparation de commande**

L'activité de préparation de commande est toujours considérée comme une activité coûteuse. Les coûts engendrés par la préparation de commande au sein des sociétés sont estimés à plus de 50 % des coûts liés à l'entreposage (De Koster et al., 2007). L'activité de préparation de commande se caractérise par beaucoup d'effort physique. En effet, de nombreux déplacements sont nécessaires et impliquent une circulation active dans les allées afin d'atteindre les produits de la liste de sélection. Le temps de travail lié aux opérations de préparation de commande est considéré comme du gaspillage puisqu'il n'apporte aucune valeur ajoutée à la marchandise (De Koster et al., 2007). La préparation de commande est une activité qui affecte directement le taux de satisfaction du

client. Autrement dit, tout dysfonctionnement (retard, commande non conforme) engendre un mécontentement chez la clientèle.

## 2.3 Axes d'amélioration des systèmes de préparation de commande

L'amélioration des systèmes de préparation de commande se fait à travers quatre axes de changement : (1) l'implantation de la zone d'entreposage, (2) la méthode de préparation de commande, (3) le modèle de circulation et (4) la politique de localisation des stocks. La plupart des articles consultés se sont limités à ses quatre axes de conception. Certains articles ont essayé d'apporter des changements sur plusieurs axes en parallèle ; par contre, la grande majorité, ce qui représente plus que 70 % des articles, s'est concentrée sur un seul axe. La détermination de l'axe sur lequel on doit apporter des améliorations au système de préparation de commande est une problématique assez délicate. En effet, le choix d'un axe en particulier ne fait pas consensus parmi les articles considérés. Les proportions des choix des axes d'amélioration dans les articles consultés sont présentées dans la figure 2.2.

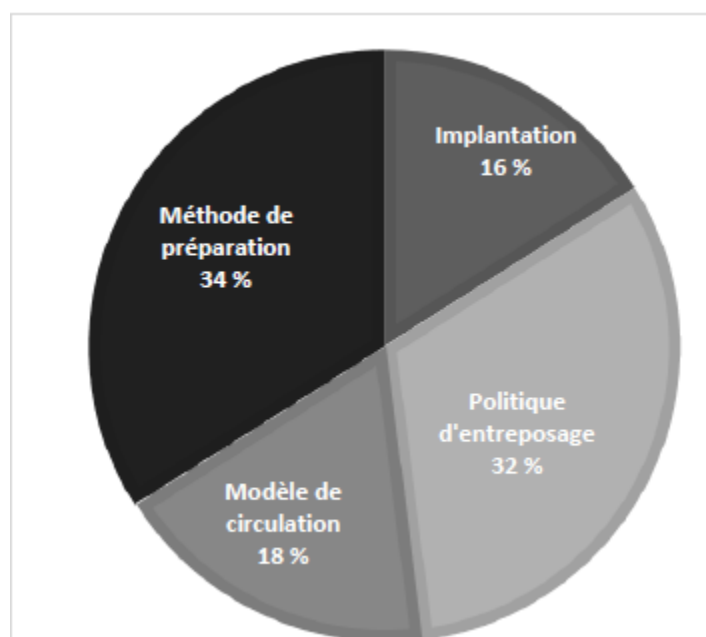


Figure 2.2 : Proportions des choix des axes d'amélioration

### 2.3.1 Politique d'entreposage de la marchandise

La politique d'entreposage de la marchandise définit la façon dont les produits sont assignés dans les zones d'entreposage. Cette politique tend à rendre les opérations de préparation de commande

plus efficaces. À ce propos, elle permet une réduction importante des efforts fournis qui sont causés par les longues distances parcourues (Pan et al., 2012; Pan & Wu, 2009). Elle permet aussi une réduction des coûts de prélèvement des produits (Glock & Grosse, 2012). En outre, le choix de la bonne politique permet de gagner en temps de préparation de commande (Pan & Wu, 2009). Les politiques de localisation des produits sont regroupées principalement selon trois catégories : une localisation dédiée, une localisation aléatoire, une localisation mi-aléatoire — mi-dédiée (localisation par classe).

- Localisation aléatoire : Cette méthode assigne la marchandise entrante à l'entrepôt ou au centre de distribution de façon aléatoire. Tous les produits ont une probabilité égale d'être affectés à une place d'entreposage quelconque (De Koster et al., 2007).
- Localisation dédiée : Cette méthode affecte les produits à des endroits fixes. Dans ce cas, la zone d'entreposage est réservée à ce produit, même s'il est en rupture de stock (De Koster et al., 2007).
- Localisation mi-aléatoire — mi-dédiée : Cette méthode de localisation est une combinaison des deux méthodes présentées précédemment. Elle se base sur le principe d'ordonner la marchandise selon des classes. Les zones d'entreposage sont dédiées à chaque classe. Au sein de la même classe, les produits sont entreposés de façon aléatoire (De Koster et al., 2007).

### **2.3.2 Modèle de circulation**

Le modèle de circulation décrit la manière avec laquelle le commis parcourt des allées de la zone de préparation de commande. Le choix du modèle permet d'agir sur plusieurs critères de performance du système de préparation de commande. En effet, les déplacements entre les emplacements d'entreposage sont fatigants. D'ailleurs, selon (Bartholdi & Hackman, 24), ils comptent pour plus de 55 % de l'effort physique fourni pour les opérations de préparation de commande (Theys et al., 2010). De plus, le temps de parcours des distances représente 50 % du temps total de la préparation de commande (Tompkins et al., 2010). En conséquence, le choix d'un bon modèle de préparation de commande est important pour le bon fonctionnement du système, car il influence la circulation. Les modèles de circulation peuvent être classés sous trois circuits de base : linéaire, alterné, dents de peigne.

- Linéaire : un circuit où l'opérateur défile devant toutes les références.
- Alternée : un circuit où les références sont visitées alternativement à gauche et à droite d'une allée qui est en sens unique.
- Dents de peigne : un circuit où la pénétration dans les allées est réduite. Par conséquent les produits les plus fréquents sont placés près de l'allée centrale.

### 2.3.3 Méthode de préparation de commande

La méthode de préparation de commande représente le procédé avec lequel les articles sont extraits du stock, regroupés et emballés pour l'expédition chez le client. Des recherches ont prouvé que des changements appliqués sur le modèle de circulation, tels que l'allotissement de commande, peuvent réduire significativement les distances parcourues. Ils peuvent aussi réduire le temps de préparation de commande de 30% (Bukchin et al., 2012). En outre, (Hu et al., 2009) affirment que des techniques comme la préparation par zone et l'allotissement ont un impact majeur sur les performances du système de préparation de commande. Par conséquent, il faut donner de l'importance à la sélection de la méthode de préparation. À cet égard, nous pouvons classer les méthodes de préparation de commande selon quatre groupes : (1) un préparateur – une commande, (2) plusieurs préparateurs – une commande, (3) un préparateur — plusieurs commandes, (4) plusieurs préparateurs — plusieurs commandes.

- Un préparateur — une commande : le commis de préparation fait le tour de la zone d'entreposage pour prélever une commande client.
- Plusieurs préparateurs — une commande : la commande client passe par différentes zones. À chaque zone, un commis prélève une partie de la commande.
- Un préparateur — plusieurs commandes : des commandes clients sont consolidées dans une seule commande fictive. Cette dernière est prélevée par un seul commis.
- Plusieurs préparateurs — plusieurs commandes : les commandes clients sont consolidées dans une seule commande. Cette dernière est traitée par différents commis dans différentes zones.

### **2.3.4 Implantation**

Selon (Riopel & Croteau, 2008), l'implantation est la détermination rationnelle des emplacements réservés aux matériels, aux installations, aux machines, aux points d'entreposage d'un entrepôt ou d'un centre de distribution. L'implantation a pour objectif d'assurer une efficacité et une flexibilité de l'utilisation de l'espace tout en restant, autant que possible, le plus économique (Smith, 1998). Des changements apportés à l'implantation de la zone d'entreposage peuvent engendrer des réductions importantes des distances parcourues. D'ailleurs, dans leur recherche, (Hu et al., 2009) ont prouvé qu'il est possible de réduire la distance parcourue par le simple ajout d'une allée transversale. En parallèle, l'implantation de la zone d'entreposage peut freiner toute tentative d'amélioration des autres axes (Chan & Chan, 2011).

## **2.4 Indicateurs de performance**

### **2.4.1 Classes d'indicateurs**

Les indicateurs de performance sont des représentations des données recueillies. Ces données passent par des processus de sélection, de calcul et de traitement. Les données à l'état brut peuvent être trompeuses. Elles sont difficiles à évaluer et n'aident pas à optimiser les systèmes de préparation de commande (Ten Hompel & Schmidt, 2007). À partir des différents indicateurs de performance, un concepteur peut sélectionner ceux qui sont les plus significatifs et en accord avec les objectifs des organisations. Les indicateurs sélectionnés sont appelés ainsi des indicateurs de performance clés. Dans la littérature, les indicateurs utilisés pour mesurer la performance des systèmes de préparation de commande sont très nombreux et diversifiés. Pour cette raison, nous les avons regroupés en six classes : indicateurs du temps, indicateurs de distance, indicateurs de coût, indicateurs de rendement, indicateurs techniques et indicateurs orientés clients.

Dans chacune des classes, les indicateurs sont calculés généralement par des formules mathématiques (analytiques) ou même des simulations comme c'est le cas dans Bartholdi & Hackman (2006). Les formules pour calculer les indicateurs changent légèrement d'un système de préparation de commande à un autre. Cela dépend de plusieurs facteurs tels que l'implantation de la zone d'entreposage, le nombre de préparateurs, les hypothèses choisies (e.g. le temps de prélèvement, la vitesse de déplacement, la prise en considération du blocage).



- Indicateurs du temps : Les indicateurs du temps sont des indicateurs qui présentent des informations sur la durée des opérations reliées aux activités de préparation de commande. Les indicateurs du temps sont parfois privilégiés sur les indicateurs de distance (Hong et al., 2012). En effet, dans un cadre ayant un système à plusieurs préparateurs, un phénomène de congestion peut apparaître. Dans un système ayant une congestion significative, si on se base uniquement sur des indicateurs qui mesurent la distance, il sera impossible de détecter et de prendre en compte ce phénomène. Cela peut biaiser les décisions prises à la lumière des informations collectées par les indicateurs de distance. Dans la littérature, ces indicateurs prennent plusieurs formes telles que le temps total de prélèvement (Bartholdi & Hackman, 2006), le temps total de distance parcourue (Muppani & Adil, 2008), le temps moyen pour compléter une commande (Lu et al., 2016) et le temps moyen de cycle (Claeys et al., 2016).
- Indicateurs de distance : Les indicateurs de distance sont des indicateurs qui mesurent le trajet parcouru par un commis ou par une machine de prélèvement automatique. Les indicateurs de distance peuvent donner des informations sur l'intensité physique du travail dans le cas où les déplacements se font sans machine. Ils présentent aussi des informations sur les coûts des opérations de préparation de commande (Lu et al., 2016). Les déplacements dans la préparation de commande sont à la fois des déplacements horizontaux et verticaux. De façon générale, dans la revue de littérature, les déplacements verticaux ne sont pas pris en considération. Il n'y a que les déplacements horizontaux qui figurent dans les formules de calcul. Dans les articles consultés, différentes formes d'indicateurs ont été utilisées. Parmi ces indicateurs, nous notons les mesures suivantes : distance totale parcourue par un préparateur (Berglund & Batta, 2012) et la distance moyenne parcourue par commande (Hong et al., 2012).
- Indicateurs de coût : Les indicateurs de coût représentent des mesures pour les dépenses engendrées par les opérations de préparation de commande ou par une partie de ces opérations. Le calcul des coûts inclut généralement les frais de l'utilisation de l'espace et les frais dus à la main-d'œuvre (Mowrey & Parikh, 2014) (Muppani & Adil, 2008). Des coûts additionnels peuvent parfois s'ajouter tels que les frais des heures supplémentaires et les frais de commandes non conformes. Les indicateurs de coût répondent généralement à des objectifs de mesure financière. Ils remplacent parfois les indicateurs du temps ou de

distance. En effet, le temps de préparation de commande ou la distance sont parfois remplacés par leurs coûts équivalents. Un avantage des indicateurs de coût remarqué dans la revue de littérature est qu'ils peuvent rassembler différents facteurs tels que le temps, la distance et la satisfaction du client en un seul indicateur.

- Indicateurs de rendement : Les indicateurs de rendement sont des indicateurs qui enregistrent la cadence avec laquelle les commandes sont préparées. Les mesures de rendement donnent une idée de la fluidité des opérations (Koo, 2009). Ils présentent des informations sur la productivité du système. En effet, ils comparent les résultats obtenus avec les ressources utilisées (Yu & De Koster, 2010). Par exemple, ces ressources peuvent être le nombre d'heures de travail ou de formation des préparateurs de commande (Grosse et al., 2013). Le rendement du système peut aider un gestionnaire à se décider sur la nécessité de l'automatisation (Gue et al., 2006). Dans la littérature, les indicateurs de rendement sont exprimés sous la forme d'une cadence de préparation de commande telle que le nombre de produits prélevés par jour dans (Koo, 2009).
- Indicateurs techniques : Les indicateurs techniques sont des indicateurs qui donnent des informations sur un problème précis du système de préparation de commande. Ils servent à suivre la performance dans une partie spécifique du système de préparation de commande. Par ces mesures, il est possible de repérer l'utilisation inefficace de quelques ressources. Ces mesures peuvent concerner l'usage du temps ou de l'espace. Dans les articles considérés par ce travail de recherche, quelques indicateurs techniques ont été repérés tels que le pourcentage du temps de blocage d'un opérateur (Yu & De Koster, 2010) et le taux d'utilisation de l'espace.
- Indicateurs orientés clients : Les indicateurs orientés clients visent à mesurer la satisfaction des clients. Ils révèlent des informations sur la capacité du système de préparation à respecter l'engagement envers les clients. Cet engagement consiste à délivrer le bon produit au bon moment. Dans différents articles, de multiples indicateurs orientés clients ont été utilisés tels que le retard total d'un ensemble de commandes clients (Henn & Schmid, 2013), le nombre de ruptures de stock (Gagliardi et al., 2008) ou nombre d'erreurs dans la liste de sélection (Grosse et al., 2013).

## 2.4.2 Choix des indicateurs

Dans la littérature, l'utilisation de ces classes d'indicateurs n'a pas été faite d'une manière égale. Certaines classes ont été exploitées plus que les autres. En effet, deux classes (indicateurs du temps et indicateurs de distance) représentent plus que 70 % des indicateurs utilisés dans les articles recensés. Parmi ces deux classes, les chercheurs font davantage appel à l'indicateur du temps. Cette large utilisation est probablement justifiée par le fait que ces indicateurs tiennent compte de la congestion et ils sont facilement transformables en données monétaires.

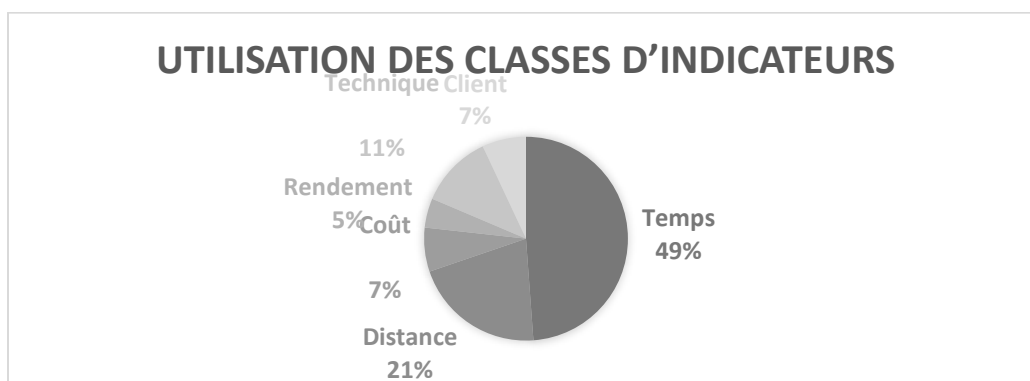


Figure 2.3 : Pourcentage d'utilisation des indicateurs pour les articles à un seul indicateur

Dans un travail de conception des systèmes de préparation de commande, une panoplie d'indicateurs existent et ils ont été listés et classés à la section précédente. Afin de bien suivre la performance des systèmes de préparation de commande, il faut bien choisir les mesures de performance parmi celles qui sont disponibles. Les chercheurs ont tendance à utiliser un seul indicateur pour suivre la performance des systèmes de préparation de commande. Dans certains cas, ils ont eu recours à plusieurs indicateurs. À ce propos, la justification pour le choix d'un indicateur n'est pas toujours présente. Certes, il y a différentes façons pour expliquer le choix d'une mesure de performance, mais cela reste des essais assez timides. Certains articles justifient le choix du fait que l'indicateur est souvent utilisé dans des articles scientifiques similaires (Pan et al., 2012). D'autres présentent l'indicateur de performance sélectionné comme étant un indicateur largement utilisé dans des problèmes de ce genre (Hwang & Cho, 2006). Dans certains cas, par exemple (Lu et al., 2016), les avantages d'un indicateur de performance sont listés pour expliquer la raison pour laquelle un tel indicateur a été sélectionné. Dans d'autres cas, on met en lumière les inconvénients des autres indicateurs afin de justifier le choix d'un indicateur de performance ou pour atténuer les défauts de ce dernier (Hong et al., 2012).

Dans cette revue de la littérature, il n'a pas été possible de trouver des relations directes entre le cas traité par un article et le choix d'un indicateur. Dans le but de chercher des liens entre les systèmes de préparation de commande et les mesures de suivi de la performance, nous avons étudié l'influence des axes de changement retenus ainsi que les configurations des systèmes de préparation de commande sur le choix des indicateurs de performance.

#### **2.4.2.1 Influence des axes de changement**

Comme présenté dans la deuxième section de la revue de littérature, il existe quatre axes principaux qui permettent d'apporter des changements sur un système de préparation de commande. Ces axes sont (1) l'implantation de la zone d'entreposage, (2) la méthode de préparation de commande, (3) le modèle de circulation et (4) la politique de localisation des stocks. À travers les articles consultés, nous avons cherché la possibilité que le choix d'un axe d'amélioration puisse influencer le choix des indicateurs de performance. Dans ce but, nous avons réalisé une analyse factorielle des correspondances (AFC) en utilisant le logiciel d'analyse de données XLSTAT. L'AFC est une analyse qui vise à étudier la correspondance entre deux ensembles d'éléments à travers un tableau réduit de données appelé tableau des fréquences. Dans les cellules de ce tableau, nous présentons le nombre d'articles qui ont à la fois utilisé la même classe d'indicateurs et qui ont choisi le même axe d'amélioration. Les deux ensembles, sujets de notre étude, sont un ensemble pour les classes d'indicateurs de performance et un ensemble pour les axes d'amélioration utilisés dans les articles. Avant de consulter les résultats de l'analyse, il faut passer par un test de  $\chi^2$  pour s'assurer de l'existence d'une corrélation entre ces deux ensembles. Les résultats de ce test montrent que le lien entre le choix des indicateurs de performance et le choix des axes d'amélioration est assez faible. En effet, la probabilité de rejeter l'hypothèse que les deux ensembles sont indépendants sachant qu'elle est vraie est assez élevée et dépasse les 80 %. On peut conclure que les chercheurs ne se basent pas sur le choix d'un des axes d'amélioration pour choisir l'indicateur adéquat.

#### **2.4.2.2 Influence de la configuration de système**

Dans chaque axe d'amélioration, il y a un modèle ou une méthode de travail qui doit être mise en place. L'ensemble de ces méthodes et de ces modèles représente la configuration du système de préparation de commande. Cette configuration est le résultat, d'une part, des opérations d'amélioration et, d'autre part, de l'état du choix précédent qui existe déjà dans l'entrepôt ou centre de distribution. Dans la revue de la littérature, chaque article retenu présente une ou plusieurs

configurations de système de préparation de commande. À travers ces articles, nous avons cherché un lien possible entre la configuration des systèmes de préparation de commande et le choix des indicateurs. Dans ce but, nous avons utilisé une analyse des correspondances multiples (ACM). Cette analyse traite les correspondances entre des individus et des variables qualitatives, qui sont ici les configurations des systèmes de préparation de commande. L'ACM peut aussi traiter seulement les correspondances entre les variables. Cette analyse s'applique sur un tableau de codage condensé. Ce tableau est fait d'individus en lignes et de variables en colonnes. Dans le présent cas, les individus sont les articles retenus. Les variables utilisées sont la politique de localisation, le modèle de circulation, la méthode de préparation et la classe d'indicateur choisie. Les cellules du tableau indiquent la modalité d'une variable traitée dans un article. Par exemple, l'article *i* possède la modalité « aléatoire » de la variable « politique d'entreposage ». L'analyse a été faite à l'aide du logiciel XLSTAT.

Finalement, nous obtenons un graphique symétrique des variables. L'interprétation de ce graphe permet de présenter les liaisons qui les rassemblent. À ce propos, à l'aide de cette présentation, nous pouvons tirer certaines informations. La qualité des informations présentées est parfois limitée par la petite taille de l'échantillon. Finalement, nous avons pu constater que les liens entre les indicateurs de performance utilisés et les configurations des systèmes de préparation de commande ne sont pas évidents. En effet, il y a une faible corrélation entre certaines classes d'indicateurs de performance et les autres variables.

## 2.5 Outil de simulation

La simulation c'est la modélisation informatique sur un ordinateur ou un réseau dans le but de simuler un système ou un processus réel. Dans le but de valider le modèle à la fin de projet un logiciel de de simulation nommé **Flexsim** a été utilisé. Ce logiciel présente quatre avantages.

1. En outre de la simulation 2D, Flexsim permet de créer des visualisation 3D. Ces simulations 3D sont créer directement sans post-traitement.
2. Flexsim permet de construire des modèles par glisser-déposer. Il présente une plateforme utilisateur intuitive.
3. Flexsim donne la possibilité de crée une librairie d'objets personnalisés.
4. Flexsim permet de créer des tableaux de bord facilement.

## 2.6 Conclusion

Dans la revue de littérature, le processus de préparation de commande représente le cœur d'activité d'un entrepôt ou un centre de distribution. Dans le but de mesurer la performance de ce processus, plusieurs indicateurs de performance ont été présentés. Ces indicateurs ont été classés et l'analyse sur le choix de ces indicateurs a été faite. L'utilisation de ces indicateurs n'est pas équitable. En effet et comme ce qui a été présenté dans ce chapitre, les indicateurs de temps et de distance sont les plus utilisés. Dans la suite, un modèle analytique d'estimation de distance parcourue est présenté.

## **CHAPITRE 3 ESTIMATION DE DISTANCE**

### **3.1 Introduction**

Dans la revue de littérature sur les problèmes de préparation de commande, 66 % des articles parlent de la mesure de distance et de temps. Ces indicateurs représentent les deux classes d'indicateurs les plus importantes dans la mesure de performance. Dans ce contexte, ce chapitre a pour objectif de présenter un modèle analytique générique pour estimer la distance moyenne parcourue dans un entrepôt pour la préparation de commande. Plusieurs travaux de recherche ont été faits sur des modèles d'estimation de distance. La plupart de ces modèles partent du principe que la politique d'entreposage est aléatoire. Ces modèles d'estimation servent généralement dans des problèmes d'optimisation de « slotting » ou pour comparer des stratégies de circulation.

### **3.2 Modèle analytique d'estimation de distance**

Dans la littérature, la mesure de distance est le deuxième indicateur de performance le plus utilisé. L'estimation de distance permet de donner une idée sur le travail à fournir soit par un préposé de préparation de commande, soit par une machine de prélèvement. Le modèle analytique présenté dans ce travail est basé en partie sur celui de Sadowsky & Ten Hompel, (2011).

Dans le modèle d'estimation proposé, l'entrepôt est composé d'un ensemble de positions physiques d'entreposage. Chaque allée est composée d'un nombre de ces positions. Chacune de ces allées est composée de plusieurs colonnes qui sont un ensemble de positions d'entreposage superposées sur de différents niveaux. À chaque position, une « fréquence d'accès » est assignée. Cette fréquence est définie par le nombre moyen de fois dont un préposé de préparation de commande a besoin de visiter une position d'entreposage dans une période de temps (Sadowsky & Ten Hompel, 2011).

Dans le travail présenté par Sadowsky & Ten Hompel (2011), les positions d'entreposage sont accessibles par un préparateur qui se déplace au niveau du sol et elles ne nécessitent pas de déplacements verticaux. Par contre, le modèle proposé dans le mémoire permet d'estimer la distance verticale parcourue en plus de la distance horizontale. En outre, ce modèle propose de voir la distribution des fréquences d'accès comme une distribution empirique (figure 3.1) contrairement à celui proposé par Sadowsky & Ten Hompel (2011) où la distribution des fréquences d'accès dans les allées est présentée sous la forme d'une fonction de densité exponentielle (figure 3.2). Les

deux figures sont données à titre d'exemple. La distance est fonction du nombre de colonnes dans l'allée. Le modèle permet plus de flexibilité dans l'estimation des distances en travaillant avec des fréquences qui ne sont pas assimilables à des fonctions de densité. En effet, dans la réalité, les fréquences d'accès sont liées des positions d'entreposage. Cependant, les fonctions de densité sont une simplification de la réalité. Parfois cette simplification est possible, mais dans plusieurs d'autres cas, il n'est pas possible de faire des approximations.

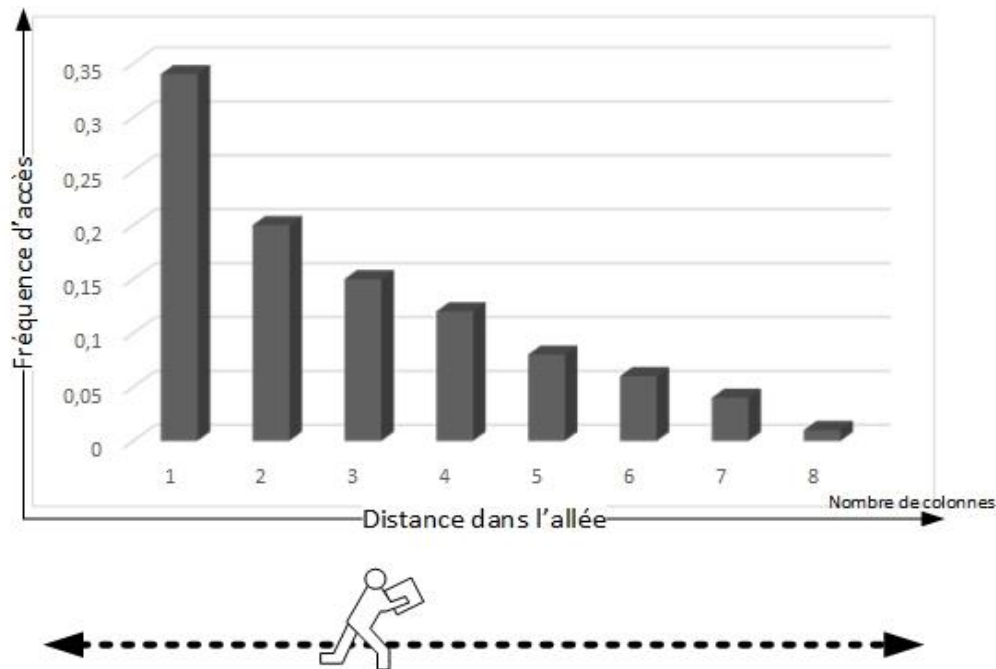


Figure 3.1 : Distribution empirique des fréquences d'accès le long d'une allée



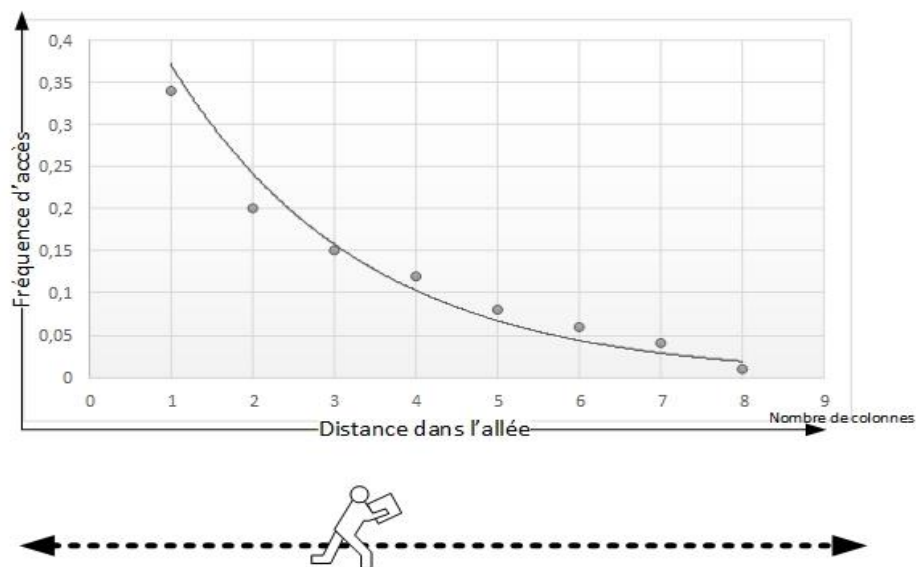
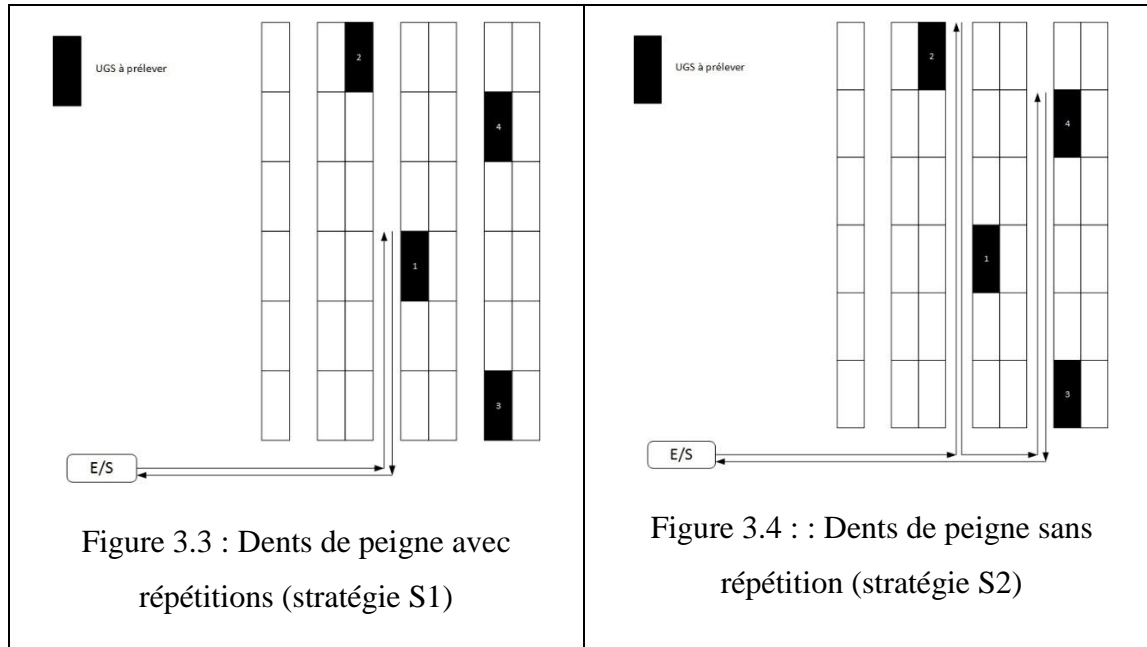


Figure 3.2 : Fonction de densité représentant la fréquence d'accès le long d'une allée (figure à titre indicatif)

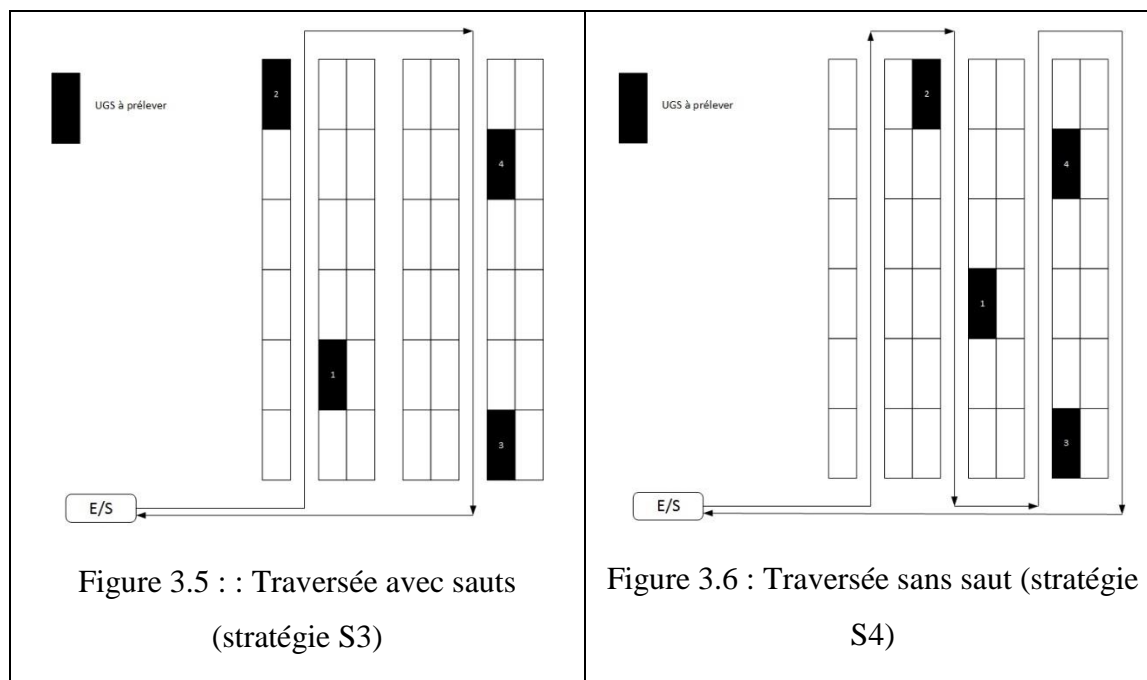
### 3.2.1 Stratégies de circulation

Dans le modèle d'estimation des distances, les stratégies de circulation considérées sont la circulation en dents de peigne et en traversée. Pour chaque stratégie de circulation, des caractères spécifiques sont définis.

Dans le contexte d'une circulation en dents de peigne, deux stratégies différentes sont distinguées : une stratégie avec répétitions, notée *S1*, (figure 3.3) et une autre sans répétition, notée *S2*, (figure 3.4). Pour la première, le préposé de préparation de commande se déplace à chaque fois pour récupérer une seule unité de gestion de stock (UGS). Le préparateur cherche l'UGS 1 et la transporte jusqu'au point d'entrée sortie E/S avant d'aller chercher l'UGS 2. Ce genre de stratégie est utilisé dans le cas où le poids ou le volume des UGS est assez important et le préparateur ne peut pas en prélever plusieurs à la fois. Par exemple, cette stratégie est applicable dans le cas de prélèvement de palette entière. Pour la deuxième stratégie, sans répétition, le préparateur finit sa liste de prélèvements en un seul tour en suivant le parcours en dents de peigne en pénétrant dans les allées où des UGS sont à prélever.



Dans le cas d'une stratégie de circulation en traversée, deux stratégies sont distinguées : avec sauts, notée *S3*, (figure 3.5) et sans saut, notée *S4*, (figure 3.6). Dans le cas d'une stratégie avec sauts, le commis de préparation de commande ignore les allées où il n'y a pas d'UGS à prélever, pour se rendre le plus rapidement aux prochaines UGS de la commande. Dans le cas contraire, la stratégie sans saut consiste à passer par toutes les allées, même si ce n'est pas nécessaire, en suivant une forme de S avant de revenir au point E/S.



Il est à noter qu'il n'y a pas de retournement du chariot de prélèvement dans une allée de service.

### 3.2.2 Hypothèses

Dans le but d'élaborer le modèle analytique qui se base sur des calculs de probabilités, les hypothèses suivantes sont faites.

- H1 : L'entrepôt est constitué de multiples palettiers identiques à simple profondeur.
- H2 : Chaque palettier est constitué d'un ensemble de colonnes à plusieurs niveaux.
- H3 : Un niveau dans une colonne correspond à une position d'entreposage.
- H4 : Les dimensions pour chaque position d'entreposage sont identiques.
- H5 : Chaque position d'entreposage contient une seule UGS.
- H6 : Une UGS est présente dans une seule position d'entreposage dans tout l'entrepôt.
- H7 : Toutes les allées de service ont la même largeur qui permet de faire les prélèvements de chaque côté sans déplacement latéral.
- H8 : Les UGS dans des positions d'entreposage face à face dans une même allée de service ont des fréquences d'accès similaires.
- H9 : Le chariot de magasinier peut contenir tous les produits de la commande.

- H10 : Les allées de circulation sont en double sens.

### 3.2.3 Notation

La distance  $D_S$  à estimer pour les stratégies  $S$  est la somme de quatre composantes.

$$D_S = D_S^B + D_S^A + D_S^W + D_S^V$$

où  $D_S^B$  est la distance de base,  $D_S^A$  est la distance entre les allées,  $D_S^W$  est la distance dans les allées et  $D_S^V$  est la distance verticale (Figure 3.7).

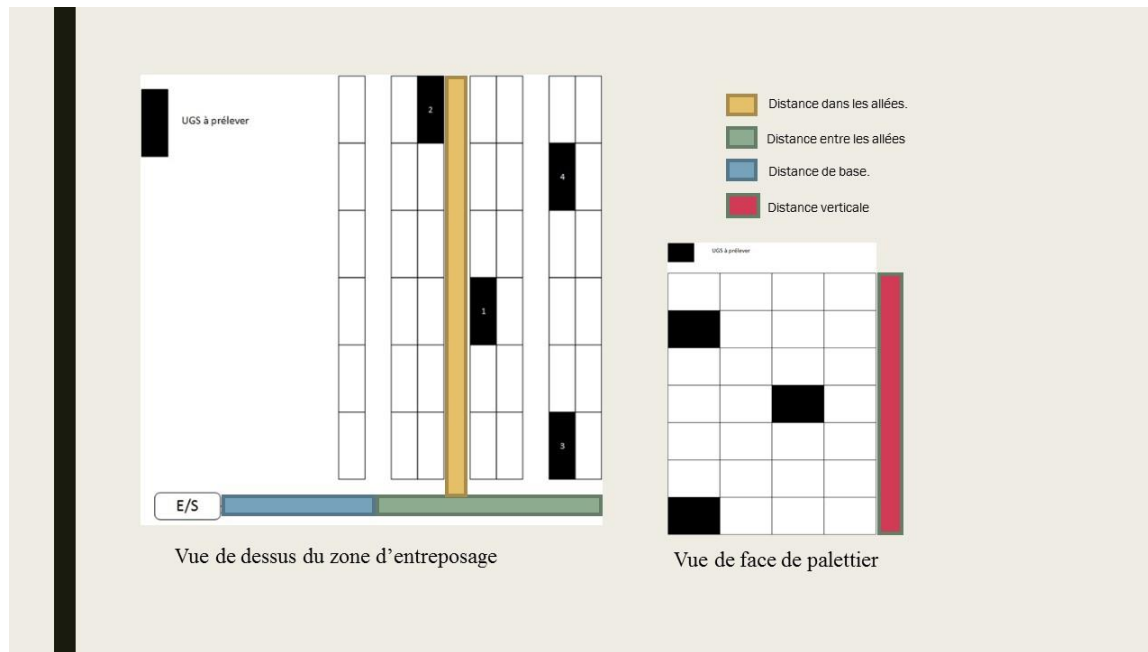


Figure 3.7 : Composantes de distance

Le calcul de chacune de ces composantes est détaillé dans les sous-sections qui suivent. Les formules de calcul de ces composantes sont valides pour les deux configurations d'entrepôt présentées dans la figure 3.8.

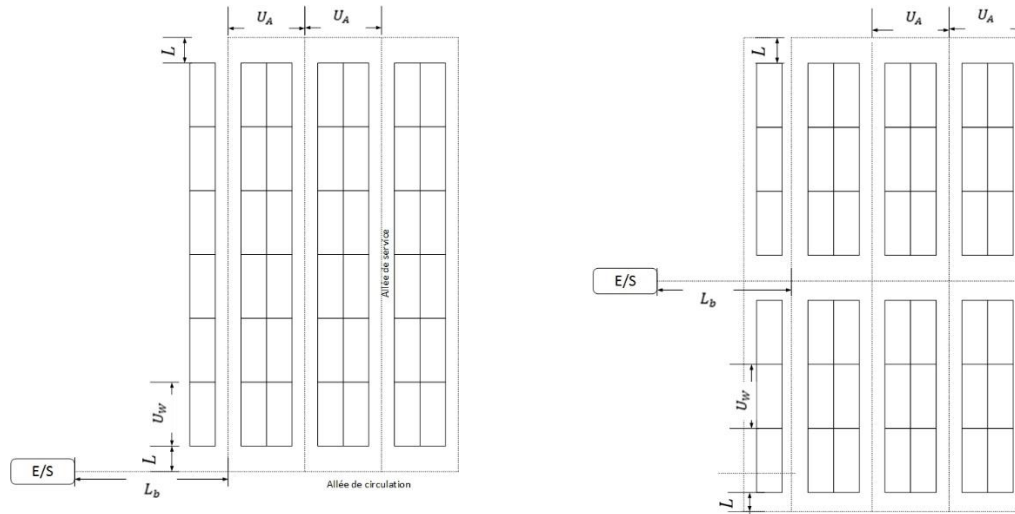


Figure 3.8 : Notation de distance pour les deux implantations possibles

La notation nécessaire au modèle est la suivante :

$N^{UGS}$	Nombre d'UGS dans l'entrepôt
$N_a^{UGS}$	Nombre d'UGS par allée
$N_c^{UGS}$	Nombre d'UGS par colonne
$N$	Nombre moyen de lignes par commande arrondi à l'entier le plus près
$N_a$	Nombre d'allées
$N_c$	Nombre de colonnes par allée
$N_n$	Nombre de niveaux
$i$	Numéro de l'allée de $1 \dots, N_a$
$j$	Numéro de colonne de $1 \dots, N_c$
$k$	Numéro de niveau de $1 \dots, N_n$
$r$	Nombre de lignes à prélever dans une allée $i$ de $0 \dots, \min\{N, N_a^{UGS}\}$
$s$	Nombre de lignes à prélever dans une colonne $j$ de $0 \dots, \min\{N, N_c^{UGS}\}$
$U_A$	Unité de distance horizontale entre les allées
$U_W$	Unité de distance horizontale dans une allée de service
$U_V$	Unité de distance verticale
$L$	Distance avant d'entrer dans une allée de service
$L_b$	Distance de base de l'entrepôt entre le point E/S et l'allée de service 1.
$k_b$	Indice de niveau à partir duquel un déplacement vertical est considéré de 1 à $N_n$
$P_a(i)$	Probabilité d'accès à une allée $i$
$P_c(i, j)$	Probabilité d'accès à une colonne $j$ dans une allée de service $i$

$P_n(i, j, k)$	Probabilité d'accès à un niveau $k$ dans une colonne $j$ dans une allée de service $i$
$P_p(r)$	Probabilité d'accès à une allée de service si $r$ UGS doivent y être prélevées
$P_l(s)$	Probabilité d'accès à une colonne si $s$ UGS doivent y être prélevées

### 3.2.4 Distance de base $D_S^B$

La distance de base est celle comprise entre le point E/S et l'emplacement de première allée de service, notée  $L_b$  sur la figure 3.7. La distance de base totale  $D_S^B$  pour une commande dépend du nombre de fois que le préparateur fait des voyages entre la zone d'entreposage et le point de consolidation E/S. Pour une commande, cette distance est constante.

Pour la stratégie  $S1$ ,  $N$  aller-retour seront nécessaires pour prélever toutes les UGS d'une commande, on obtient alors :

$$D_{S1}^B = N * 2 * L_b \quad (1)$$

Dans les trois autres stratégies, la distance de base est

$$D_{S2}^B = D_{S3}^B = D_{S4}^B = 2 * L_b \quad (2)$$

### 3.2.5 Distance entre les allées $D_S^A$

La distance entre les allées de service est celle parcourue par le préparateur de commande pour se déplacer d'une allée de service à une autre. Cette distance est calculée selon la stratégie de circulation.

Pour la stratégie  $S1$ , la distance entre les allées est décrite par la distance entre l'emplacement de la première allée de service et l'allée dans laquelle se trouve l'UGS à prélever. Si  $N$  UGS sont prélevées en moyenne par commande, on a alors :

$$D_{S1}^A = N * 2 * L1$$

où  $L1$  est la distance entre l'allée de service 1 et l'allée  $i$  pondérée par la probabilité d'accès à cette allée

$$L1 = \sum_{i=1}^{N_a} U_A * (i - 1) * P_a(i)$$

D'où

$$D_{S1}^A = N * 2 * \sum_{i=1}^{N_a} U_A * (i - 1) * P_a(i) \quad (3)$$

Dans la stratégie  $S2$  et  $S3$ , la distance entre les allées de service est décrite par la distance maximale qu'un commis doit parcourir pour accéder à l'allée de service contenant l'UGS à prélever la plus éloignée.

$$D_{S2}^A = D_{S3}^A = 2 * L2$$

où  $L2$  est égale à la distance de début de la zone d'entreposage jusqu'à l'allée  $i$  pondérée par la probabilité que l'allée  $i$  soit l'allée le plus éloigné à atteindre.

$$L2 = \sum_{i=1}^{N_a} \left( U_A * (i - 1) * \left[ \sum_{\alpha=1}^i P_a(\alpha) \right]^{N-1} * \left( 1 - \left( \sum_{\Omega=1; \Omega \neq i}^{N_a} P_a(\Omega) \right)^N \right) \right)$$

où

$[\sum_{\alpha=1}^i P_a(\alpha)]^{N-1}$  est la probabilité de prélever  $N - 1$  articles avant l'allée  $i$  et  $(1 - (\sum_{\Omega=1; \Omega \neq i}^{N_a} P_a(\Omega))^N)$  est la probabilité de prélever le nième article dans l'allée  $i$ .

D'où

$$D_{S2}^A = D_{S3}^A = 2 * \sum_{i=1}^{N_a} \left( U_A * (i - 1) * \left[ \sum_{\alpha=1}^i P_a(\alpha) \right]^{N-1} * \left( 1 - \left( \sum_{\Omega=1; \Omega \neq i}^{N_a} P_a(\Omega) \right)^N \right) \right). \quad (4)$$

Pour la stratégie  $S4$ , la distance entre les allées est la distance maximale qu'un commis atteint pour accéder à l'allée la plus éloignée  $N_a$  :

$$D_{S4}^A = 2 * L3$$

où

$$L3 = U_A * (N_a - 1).$$

On a alors

$$D_{S4}^A = 2 * U_A * (N_a - 1). \quad (5)$$

### 3.2.6 Distance dans les allées $D_S^W$

La distance dans les allées est la distance parcourue par un commis de préparation de commande pour chercher une (des) UGS à l'intérieur d'une allée.

Pour la stratégie  $S1$ , cette distance est la mesure du trajet qui sépare le début de l'allée et la position de l'UGS à prélever.

$$D_{S1}^W = 2 * L4$$

où  $L4$ , la distance pour arriver à un article dans l'allée, est égale à une distance de base, notée  $L$ , plus l'estimation de distance à parcourir, notée  $L5$ .

$$L4 = L5 + L$$

$$D_{S1}^W = 2 * (L5 + L)$$

où  $L5$  est la somme de la distance entre le début de l'allée et la position de la colonne  $j$ . Cette somme est pondérée par la probabilité d'accès à la colonne  $j$  dans l'allée  $i$ .

$$L5(i) = \sum_{j=1}^{N_c} [U_W * j * P_c(i, j)]$$

$$D_{S1}^W(i) = 2 * \left( \sum_{j=1}^{N_c} [U_W * j * P_c(i, j)] + L \right) \quad (6)$$

Dans la stratégie  $S2$ , c'est la distance maximale que traverse un préparateur de commande pour chercher l'UGS la plus éloignée dans cette allée :

$$D_{S2}^W = 2 * (L6 + L7).$$



Dans cette équation,  $L6$  est égale à une distance de base, notée  $L$ , multipliée par la probabilité de prélever au moins une UGS dans l'allée

$$L6 = L * \sum_{r=1}^N P_p(r).$$

Or

$$\sum_{r=0}^N P_p(r) = 1$$

$$\sum_{r=1}^N P_p(r) + P_p(0) = 1$$

$$\sum_{r=1}^N P_p(r) = 1 - P_p(0).$$

Donc

$$L6 = L * (1 - P_p(0))$$

D'autre part,  $L7$  est égale à la somme de l'estimation de la distance maximale, notée  $L8$ , pour prélever,  $r$  UGS de la colonne  $j$ , pondérée par la probabilité d'accès à une allée lorsqu'il y a  $r$  UGS à prélever :

$$L7 = \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{r=1}^N (L8 * P_p(r)).$$

$L8$  est la distance entre le début de l'allée et la colonne  $j$  où se trouve l'UGS la plus éloignée dans l'allée, pondérée par la probabilité que la colonne  $j$  contienne le dernier des  $r$  UGS à prélever :

$$L8 = U_w * j * P_{max}(j, r).$$

Or

$$P_{max}(j, r) = \left[ \sum_{\alpha=1}^j P_c(i, \alpha) \right]^{r-1} * P_c(i, j) * r$$

où  $[\sum_{\alpha=1}^j P_c(i, \alpha)]^{r-1}$  est la probabilité de prélever  $r - 1$  UGS avant la position  $j$  et  $P_c(i, j)$  est la probabilité de prélever une UGS à la position  $j$ .

$$L8(i, j) = U_W * j * [\sum_{\alpha=1}^j P_c(i, \alpha)]^{r-1} * P_c(i, j) * r.$$

D'où

$$L7(i) = \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{r=1}^{\min(N, N_a^{UGS})} \left( U_W * j * [\sum_{\alpha=1}^j P_c(i, \alpha)]^{r-1} * P_c(i, j) * r * P_p(r) \right).$$

Donc

$$D_{S2}^W(i) = 2 * \left[ \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{r=1}^{\min(N, N_a^{UGS})} \left( U_W * j * [\sum_{\alpha=1}^j P_c(i, \alpha)]^{r-1} * P_c(i, j) * r * P_p(r) \right) + L \right] * (1 - P_p(0)) \quad (7)$$

où  $P_p(r)$  est la probabilité de prélever  $r$  UGS d'une allée à partir d'un total de  $N$  lignes d'UGS d'une commande. Le calcul de la probabilité est assimilé au calcul de probabilité dans une urne sans remise. Dans ce cas, nous avons deux types d'UGS :  $N_a^{UGS}$  UGS dans l'allée en question, considérées par le calcul, et  $N^{UGS} - N_a^{UGS}$  UGS dans les autres allées. Une commande de  $N$  lignes est prélevée de l'entrepôt. Pour déterminer la probabilité que ce nombre de lignes  $N$  contienne un nombre  $r$  d'UGS à prélever dans une allée, il faut compter toutes les combinaisons possibles. Le nombre de cas possibles pour prélever  $r$  UGS d'une allée contenant  $N_a^{UGS}$  UGS est le coefficient binomial de  $N_a^{UGS}$  et  $r$ ,  $\binom{N_a^{UGS}}{r}$ .

Le nombre de cas possibles de prélever les autres UGS,  $N - r$ , des autres allées contenant  $N^{UGS} - N_a^{UGS}$  UGS est le coefficient binomial de  $N^{UGS} - N_a^{UGS}$  et  $N - r$ ,  $\binom{N^{UGS} - N_a^{UGS}}{N - r}$ .

Le nombre de combinaisons possibles pour prélever les  $r$  UGS des  $N$  lignes de UGS est

$$\binom{N_a^{UGS}}{r} \binom{N^{UGS} - N_a^{UGS}}{N - r}.$$

Le nombre total de combinaisons pour prélever  $N$  UGS d'un entrepôt de  $N^{UGS}$  UGS est le coefficient binomial de  $N^{UGS}$  et  $N$ ,  $\binom{N^{UGS}}{N}$ .

Donc la probabilité  $P_p(r) = \frac{\binom{N_a^{UGS}}{r} \binom{N^{UGS}-N_a^{UGS}}{N-r}}{\binom{N^{UGS}}{N}}$  par conséquence  $P_p(0) = \frac{\binom{N^{UGS}-N_a^{UGS}}{N}}{\binom{N^{UGS}}{N}}$ .

Pour la stratégie S3, la distance dans l'allée est égale à la longueur totale de l'allée. Dans une stratégie avec plusieurs allées, nous comptons que les allées où il y a des UGS à prélever :

$$D_{S3}^W = L9 * (1 - P_p(0))$$

où  $L9$  , l'estimation de distance pour parcourir toute l'allée, est la distance totale de l'allée multipliée par la probabilité d'accéder à cette allée avec au moins une UGS à prélever

$$L9 = 2 * L + U_W * N_c.$$

On a alors

$$D_{S3}^W = (2 * L + U_W * N_c) * (1 - P_p(0))$$

$$D_{S3}^W = (2 * L + U_W * N_c) * \left(1 - \frac{\binom{N^{UGS}-N_a^{UGS}}{N}}{\binom{N^{UGS}}{N}}\right).$$

Pour la stratégie S4, la distance dans l'allée est égale à la longueur totale de l'allée. Dans une stratégie avec plusieurs allées, nous considérons toutes les allées dans l'entrepôt :

$$D_{S4}^W = (2 * L + U_W * N_c). \quad (8)$$

### 3.2.7 Distance verticale $D_S^V$

C'est la distance parcourue par le préparateur de commande dans sa montée et sa descente pour chercher les articles qui ne sont pas entreposés à la hauteur humaine. Pour l'estimation de la distance verticale, nous avons bâti nos modèles sur la même logique d'estimation pour les distances horizontales.

Pour la stratégie 1, la distance verticale est la distance de montée et descente d'un commis pour chercher une UGS placée dans un niveau supérieur à sa hauteur.

$$D_{S1}^V = 2 * L10$$

où  $L10$  est la distance parcourue pour atteindre les UGS dans une commande qui est égale à la somme des distances pour chercher un article dans un niveau  $k$ . Cette dernière est pondérée par la probabilité de prélever cette UGS de cette position, multipliée par le nombre moyen de lignes de commande.

$$L10(i, j) = \sum_{k=k_b}^{N_n} U_V * (k - 1) * P_n(i, j, k)$$

$$D_{S1}^V(i, j) = 2 * \sum_{k=k_b}^{N_n} U_V * (k - 1) * P_n(i, j, k) \quad (9)$$

Dans les trois autres stratégies, la distance verticale est la distance maximale de montée et de descente d'un préparateur de commande pour chercher l'UGS la plus élevée à prélever dans une colonne.

$$D_{S2}^V = D_{S3}^V = D_{S4}^V = 2 * L11 \quad (10)$$

où  $L11$  est la distance pour atteindre l'UGS le plus haut dans une colonne.  $L11$  est égale la somme d'estimation de distance maximale entre le niveau initial,  $k_b$ , et le niveau  $k$ , notée  $L12$ , pour prélever  $r$  UGS multipliée par la probabilité d'accès à une colonne avec  $r$  UGS à prélever.

$$L11 = \sum_{s=1}^{\min(N, N_c^{UGS})} \sum_{k=k_b}^{N_n} L12 * P_l(s)$$

$$L11 = \sum_{s=1}^{\min(N, Mb)} \sum_{k=k_b}^{N_n} L12 * \frac{\binom{N_c^{UGS}}{N} \binom{N^{UGS} - N_c^{UGS}}{N-s}}{\binom{N^{UGS}}{N}}$$

où  $L12$  est l'estimation de distance entre le niveau initial de la colonne  $j$ , notée  $k_b$ , et le niveau  $k$ , pondéré par la probabilité que le niveau  $k$  contienne la dernière UGS à prélever.

$$L12 = U_V * (k - b) * Pnmax(k, s)$$

$$Pnmax(k, s) = s * \left[ \sum_{\alpha=1}^j P_n(i, j, \alpha) \right]^{s-1} * P_n(i, j, k)$$

$$L12 = U_V * (k - b) * s * \left[ \sum_{\alpha=1}^j P_n(i, j, \alpha) \right]^{s-1} * P_n(i, j, k)$$

$$L11(i, j) = \sum_{s=1}^{\min(N, N_c^{UGS})} \sum_{k=k_b}^{N_n} U_V * (k - 1) * s * \left[ \sum_{\alpha=1}^j P_n(i, j, \alpha) \right]^{s-1} * P_n(i, j, k) * P_1(s)$$

D'où

$$\begin{aligned} D_{S2}^V(i, j) &= D_{S3}^V(i, j) = D_{S4}^V(i, j) \\ &= 2 \sum_{s=1}^{\min(N, N_c^{UGS})} \sum_{k=k_b}^{N_n} U_V * (k - 1) * s * \left[ \sum_{\alpha=1}^k P_n(i, j, \alpha) \right]^{s-1} * P_n(i, j, k) \\ &\quad * \frac{\binom{N_c^{UGS}}{N} \binom{N^{UGS} - N_c^{UGS}}{N - s}}{\binom{N^{UGS}}{N}} \end{aligned}$$

### 3.3 Forme générique des formules de distance

Dans une optique de généralisation des formules analytiques d'estimation de distance, on propose trois formules génériques soit une pour la distance entre les allées, une pour distance dans l'allée et une pour la distance verticale. Les trois formules génériques utilisent des paramètres  $\beta$  dont les valeurs varient selon la stratégie de circulation utilisée.

### 3.3.1 Distance entre les allées

$D_S^A = 2 * \left[ \sum_{i=\beta_1}^{N_a} U_A * (i - 1) * (\beta_2 * P_a(i) + \beta_3 * \sum_{p=1, p \neq i}^{N_a} P_a(p) * \beta_4 * [\sum_{\alpha=1}^i P_a(\alpha)]^{N-1} \right]$		
<b>S1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\beta_1 = 1</math></li> <li>▪ <math>\beta_2 = 1</math></li> <li>▪ <math>\beta_3 = 0</math></li> <li>▪ <math>\beta_4 = 1 / [\sum_{\alpha=1}^j P_a(\alpha)]^{N-1}</math></li> </ul>	$D_{S1}^A = 2 * \sum_{i=1}^{N_a} U_A * (i - 1) * P_a(i)$
<b>S2, S3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\beta_1 = 1</math></li> <li>▪ <math>\beta_2 = 1/P_a(i)</math></li> <li>▪ <math>\beta_3 = -1</math></li> <li>▪ <math>\beta_4 = 1</math></li> </ul>	$D_{S2}^A = D_{S3}^A = 2 * \left[ \sum_{i=1}^{N_a} U_A * (i - 1) * [\sum_{\alpha=1}^i P_a(\alpha)]^{N-1} * (1 - (\sum_{\Omega=1; \Omega \neq i}^{N_a} P_a(\Omega))^N) \right]$
<b>S4</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\beta_1 = N_a</math></li> <li>▪ <math>\beta_2 = 1</math></li> <li>▪ <math>\beta_3 = 1</math></li> <li>▪ <math>\beta_4 = 1 / [\sum_{\alpha=1}^j P_a(\alpha)]^{N-1}</math></li> </ul>	$D_{S4}^A = 2 * U_A * (N_a - 1)$

### 3.3.2 Distance dans les allées

$$D_S^W(i) = 2 * \left[ \sum_{j=\beta_5}^{N_c} \sum_{r=1}^{\beta_5} \left( U_W * j * [\sum_{\alpha=1}^j P_c(i, \alpha)]^{r-1} * P_c(i, j) / \beta_7 * r * (P_p(r) + \beta_8 * P_p(0)) \right) + L * (1 - (1 - \beta_9) * P_p(0)) \right]$$

<b>S1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\beta_5 = 1</math></li> <li>▪ <math>\beta_6 = 1</math></li> <li>▪ <math>\beta_7 = 1</math></li> <li>▪ <math>\beta_8 = 1</math></li> <li>▪ <math>\beta_9 = 0</math></li> </ul>	$D_{S1}^W = 2 * \left( \sum_{j=1}^{N_c} (U_W * j * P_c(i, j)) + L \right)$
<b>S2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\beta_5 = 1</math></li> <li>▪ <math>\beta_6 = \min(N, N_a^{UGS})</math></li> <li>▪ <math>\beta_7 = 1</math></li> <li>▪ <math>\beta_8 = 0</math></li> <li>▪ <math>\beta_9 = 1</math></li> </ul>	$D_{S2}^W(i) = 2 * \left[ \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{r=1}^{\min(N, N_a^{UGS})} \left( U_W * j \right. \right. \\ \left. \left. * \left[ \sum_{\alpha=1}^j P_c(i, \alpha) \right] * P_c(i, j) * r \right. \right. \\ \left. \left. * (Pp(r)) \right) + L * (1 - Pp(0)) \right]$
<b>S3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\beta_5 = N_c</math></li> <li>▪ <math>\beta_6 = 1</math></li> <li>▪ <math>\beta_7 = 2 * P(N_c)</math></li> <li>▪ <math>\beta_8 = 1</math></li> <li>▪ <math>\beta_9 = 0</math></li> </ul>	$D_{S3}^W = (2 * L + U_W * N_c) * \left( 1 - \frac{(N^{UGS} - N_a^{UGS})}{N} \right)$
<b>S4</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\beta_5 = N_c</math></li> <li>▪ <math>\beta_6 = 1</math></li> <li>▪ <math>\beta_7 = 2 * P(N_c)</math></li> <li>▪ <math>\beta_8 = 1</math></li> <li>▪ <math>\beta_9 = 1</math></li> </ul>	$D_{S4}^W = (2 * L + U_W * N_c)$

### 3.3.3 Distance verticale

$D_S^V(i, j) = 2 * \left[ \sum_{s=1}^{\beta_{10}} \sum_{k=b}^{N_n} U_v * (k - 1) * s * \left[ \sum_{\alpha=1}^k P_n(i, j, \alpha) \right]^{s-1} * P_n(k) * (P_l(s) + \beta_{11} * P_l(s)) \right]$		
<b>S1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\beta_{10} = 1</math></li> <li>▪ <math>\beta_{11} = 1</math></li> </ul>	$D_{S1}^V(i, j) = 2 * \sum_{k=b}^{N_n} U_v * (k - 1) * P_n(i, j, k)$

<b>S2, S3 et S4</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\beta_{10} = \min(N, N_c^{UGS})</math></li> <li>▪ <math>\beta_{11} = 1</math></li> </ul>	$D_{S2}^V(i, j) = D_{S3}^V(i, j) = D_{S4}^V(i, j)$ $= 2 \sum_{s=1}^{\min(N, N_c^{UGS})} \sum_{k=b}^{N_n} U_V * (k - 1) * s$ $* \left[ \sum_{\alpha=1}^k P_n(i, j, \alpha) \right]^{s-1} * P_n(i, j, k) * P_l(s)$
-------------------------	---	--

### 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, plusieurs modèles d'estimation de la distance parcourue dans le cadre de préparation de commande ont été présentés. Chaque modèle est approprié à une stratégie de circulation. Dans le chapitre suivant, ces modèles analytiques sont validés en effectuant une comparaison entre les résultats d'estimation et de simulation.



## CHAPITRE 4 RÉSULTATS

### 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, le modèle analytique d'estimation de distance décrit au chapitre précédent est validé. À cette fin, le modèle analytique est implémenté puis les résultats sont comparés à ceux d'une simulation faite par un logiciel de simulation nommé FLEXSIM. Le modèle analytique et la simulation sont alimentés par un jeu de données qui a été créé dans le cadre de ce travail de recherche.

### 4.2 Méthodologie générale

Pour tester les formules analytiques, une certaine démarche de validation a été suivie. Cette démarche consiste à suivre les étapes suivantes.

1. Création d'un jeu de données : ce jeu de donnée consiste à attribuer à chaque localisation d'entreposage une fréquence d'accès. L'attribution de ces fréquences est basée sur certaines contraintes. Elle est rendue possible grâce à la programmation par contraintes.
2. En se basant sur le jeu de données, l'estimation des distances est calculée par les formules analytiques en utilisant la programmation VBA sous Excel.
3. Pour comparer les résultats de l'estimation avec des résultats de la simulation, des données de commandes clients ont été créées.
4. Les commandes clients ont été utilisées pour faire tourner le programme de simulation, Flexsim.

### 4.3 Jeux de données

Dans un contexte où un jeu de données industrielles n'a pas été disponible pour effectuer nos tests, un jeu de données fictif a été utilisé. Dans le cadre des deux stratégies en dents de peigne,  $S1$  et  $S2$ , le jeu de données correspond à un ensemble de tableaux de fréquences d'accès. Pour ces deux stratégies, les fréquences d'accès aux allées de services sont considérées comme égales  $\frac{1}{N_a}$ . La dispersion des fréquences d'accès (FA) dans les allées a été basée sur la logique de déplacement de Tchebychev : les positions d'entreposage qui sont plus proches de l'allée de circulation

principale ont plus de chance d'être visitées. Le tableau 4.1 représente une allée avec quatre colonnes et sept niveaux. Selon Tchebychev, FA UGS 1  $\geq$  FA UGS 8  $\geq$  FA UGS 15  $\geq$  FA UGS 22. En plus, les niveaux les plus proches du sol ont une fréquence d'accès (FA) plus élevée que ceux du haut : FA UGS 1 FA UGS 2  $\geq$  ...  $\geq$  FA UGS 7.

Tableau 4.1 : Fréquences d'accès dans une allée de service

FA UGS 7	FA UGS 14	FA UGS 21	FA UGS 28
FA UGS 6	FA UGS 13	FA UGS 20	FA UGS 27
FA UGS 5	FA UGS 12	FA UGS 19	FA UGS 26
FA UGS 4	FA UGS 11	FA UGS 18	FA UGS 25
FA UGS 3	FA UGS 10	FA UGS 17	FA UGS 24
FA UGS 2	FA UGS 9	FA UGS 16	FA UGS 23
FA UGS 1	FA UGS 8	FA UGS 15	FA UGS 22

Pour les deux stratégies en traversée, *S3* et *S4*, les fréquences d'accès aux allées sont aussi égales. La dispersion des fréquences dans les allées est différente de la dispersion pour les deux premières stratégies. En effet, puisque l'entrée dans une allée peut être effectuée des deux côtés, les fréquences d'accès pour les colonnes sont égales. Par rapport aux niveaux, la logique d'avoir les UGS les plus fréquentes en bas reste la même.

Les fréquences d'accès élaborées sont utilisées par le modèle analytique d'estimation de distance. À partir de ces fréquences d'accès, des historiques de commandes fictives ont été générés. Ces historiques de commandes ont été créés à l'aide de la programmation par contraintes. Le programme par contraintes a été fait avec l'outil d'optimisation AIMMS. Ce programme génère à chaque fois une liste de 80 commandes en respectant les contraintes imposées par les fréquences d'accès pour chaque UGS dans les tableaux de fréquences d'accès. Dans le but de faire plusieurs tests, plusieurs listes de commandes ont été créées en variant le nombre moyen de lignes à prélever et en variant en plus la dispersion de ce nombre moyen. Chaque liste de commandes est composée de lignes d'UGS à prélever. D'ailleurs, la commande indique seulement les UGS prélevées et non pas la quantité à prélever (tableau 4.2). En effet puisque le but de modèle est d'estimer la distance,

une fois le préparateur est rendu à la position de prélèvement de l'UGS, la quantité à prélever n'a aucune influence sur la distance parcourue sauf dans le cas de  $S1$ .

Tableau 4.2 : Exemple de liste de commandes

No de commande	UGS1	UGS2	UGS3	UGS4	.....	UGSN <sup>UGS</sup>
1			X	X		
2	X		X			X
3		X				
4				X		
...	X					
80		X	X			X

#### 4.4 Modèle analytique et simulation

Pour le modèle analytique et la simulation, l'entrepôt choisi correspond à la configuration présentée à la figure 1.1 avec une allée de circulation sur le côté. Dans un but de simplification, cet entrepôt choisi est composé de quatre allées de service. Dans chaque allée de service, il y a quatre colonnes. Chaque colonne est composée de sept niveaux. Ces niveaux représentent le nombre de niveaux maximum que le chariot magasinier (i.e celui indiqué précédemment) peut atteindre. Dans les calculs analytiques et la simulation, on peut négliger la distance de base parcourue.

En se basant sur l'exemple d'entrepôt choisi, les formules analytiques du modèle d'estimation de distance sont implémentées à l'aide d'Excel en langage VBA. Ces formules sont alimentées par les tableaux de fréquences d'accès ainsi que les paramètres liés aux caractéristiques de l'entrepôt (tableau 4.3).

Tableau 4.3 : Données utilisées pour l'entrepôt

$N^{UGS}$	$N_a^{UGS}$	$N_c^{UGS}$	$N_a$	$N_c$	$N_n$	$U_A$	$U_W$	$U_V$	$L$
-----------	-------------	-------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-----

112	28	7	4	4	7	200	50	56	25
-----	----	---	---	---	---	-----	----	----	----

La simulation des systèmes de préparation de commande proposés a été faite à l'aide du logiciel de simulation Flexsim. En termes de données, ce logiciel est alimenté par l'historique de commandes générées.

## 4.5 Résultats

Pour les deux premières stratégies, les tests ont été effectués sur des commandes dont le nombre moyen de lignes par commande ( $N$ ) est 5, 10, 20 et 40, respectivement. La dispersion par rapport à cette moyenne est présentée dans le tableau suivant. Pour les deux dernières stratégies, d'autres listes de commandes avec des lois de probabilité différentes ont été utilisées.

Tableau 4.4 : Lois de probabilité pour les classes des commandes tests

Classe	Nombre moyen de lignes par commande $N$			
	5	10	20	40
Classe A	NORM(5, 0.831)	NORM(10, 0.866)	NORM(20, 0.866)	NORM(40, 1.64)
Classe B	NORM(5, 1.49)	NORM(10, 1.63)	NORM(20, 1.58)	NORM(40, 2.06)
Classe C	NORM(5, 1.71)	NORM(10, 1.94)	NORM(20, 2.07)	NORM(40, 2.45)

Les cellules de ce tableau représentent la loi de distribution du nombre de lignes dans chaque cas. La distribution du nombre de lignes pour toutes les valeurs de 1 à  $N$  suit une loi normale avec différents écarts-types. Selon les écarts-types, les listes des commandes ont été classées sous des classes A, B et C, respectivement; soit des plus petits écarts-types aux plus grands.

Puisque la simulation ne permet pas de retourner une mesure de distance parcourue pour chacun de types de déplacement (déplacement horizontal entre les allées et déplacement horizontal dans les allées), la comparaison est alors faite sur deux niveaux : déplacement horizontal et déplacement

vertical. Le but de ces comparaisons est d'assurer l'exactitude des valeurs retournées par les modèles analytiques d'estimation de distance.

## 4.6 Résultats pour la stratégie S1

Dans cette partie, une comparaison entre la distance horizontale parcourue et la distance horizontale estimée pour la stratégie S1 est effectuée. Dans cette comparaison, la distance horizontale estimée inclut la distance entre les allées  $D_{S1}^A$  plus la distance dans les allées  $D_{S1}^W$ . Donc, la comparaison se fait par rapport à la somme  $D_{S1}^A + D_{S1}^W$ . La comparaison est faite en variant le nombre moyen de lignes par commande  $N$ .

Selon la figure 4.1, les valeurs des distances horizontales estimées sont assez proches des valeurs des distances simulées.

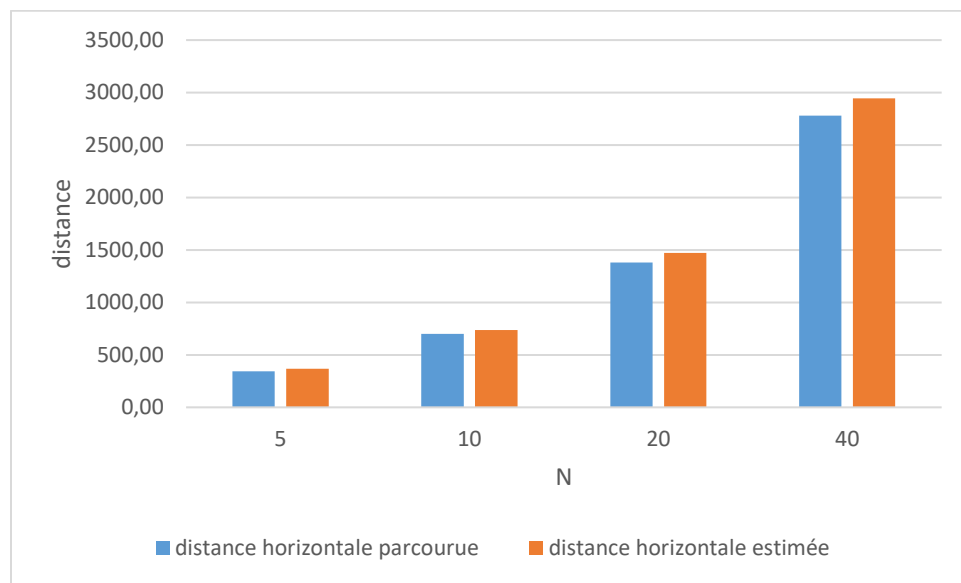


Figure 4.1 : : Comparaison des distances horizontales pour la stratégie S1

Comme le montre le tableau 4.5, l'erreur maximale entre la distance simulée et la distance estimée est égale à 6,96 %. Par conséquent, les résultats donnés par les deux formules analytiques  $D_{S1}^A$  et  $D_{S1}^W$  présentent des valeurs assez raisonnables.

Tableau 4.5 : Erreur relative des distances horizontales pour S1

$N$	5	10	20	40

Pourcentage d'erreur	-6,96 %	-4,98 %	-6,22 %	-5,66 %
----------------------	---------	---------	---------	---------

Une comparaison entre la distance verticale parcourue et la distance verticale estimée a également été réalisée. Pour ces tests, la distance horizontale estimée est égale à la distance  $D_{S1}^V$ . La comparaison des distances verticales se fait avec la variation du nombre moyen de lignes par commande  $N$ .

Selon la figure 4.2, les résultats d'estimation de la distance verticale sont assez proches des résultats de simulation de la distance verticale.

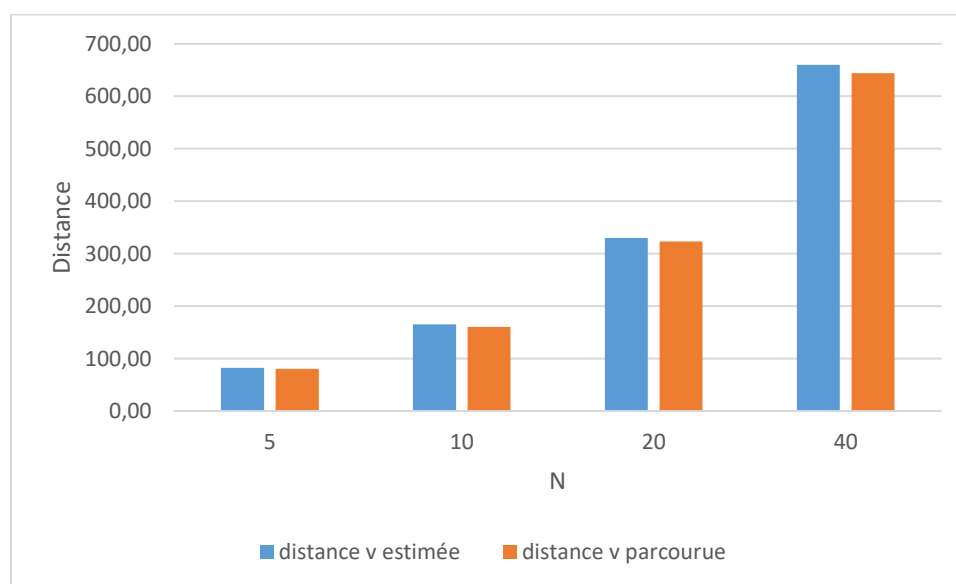


Figure 4.2 : Comparaison des distances verticales pour la stratégie S1

En faisant référence au tableau 4.6, l'erreur maximale enregistrée entre la distance verticale simulée et celle estimée est égale à 2,86 %. Par conséquent, les résultats de la formule analytique  $D_{S1}^A$  présentent de bonnes valeurs.

Tableau 4.6 : Erreur relative des distances verticales pour S1

$N$	5	10	20	40
Pourcentage d'erreur	2,86 %	2,86 %	2,13 %	2,49 %

## 4.7 Résultats pour la stratégie S2

Dans cette partie, une comparaison entre la distance horizontale parcourue et la distance horizontale estimée pour la stratégie S2 est effectuée. Dans les tests qui suivent, la distance horizontale estimée inclut la distance entre les allées  $D_{S2}^A$  et la distance dans les allées  $D_{S2}^W$ . Donc, la comparaison se fait par rapport à la somme  $D_{S2}^A + D_{S2}^W$ . La comparaison est faite en variant le nombre moyen de lignes par commande  $N$ . Cette comparaison se fait aussi par rapport à un autre axe de variation. Les résultats sont évalués selon la dispersion du nombre de lignes par commande par rapport au nombre moyen de lignes par commande  $N$ . En allant de la classe A vers la classe C, l'écart-type augmente et la dispersion autour de la moyenne est plus significative.

Selon les résultats présentés dans la figure 4.3, les valeurs de la distance horizontale estimée sont assez proches des valeurs de la distance simulée pour différents nombres moyens de lignes par commande  $N$  ainsi que pour les différentes classes.

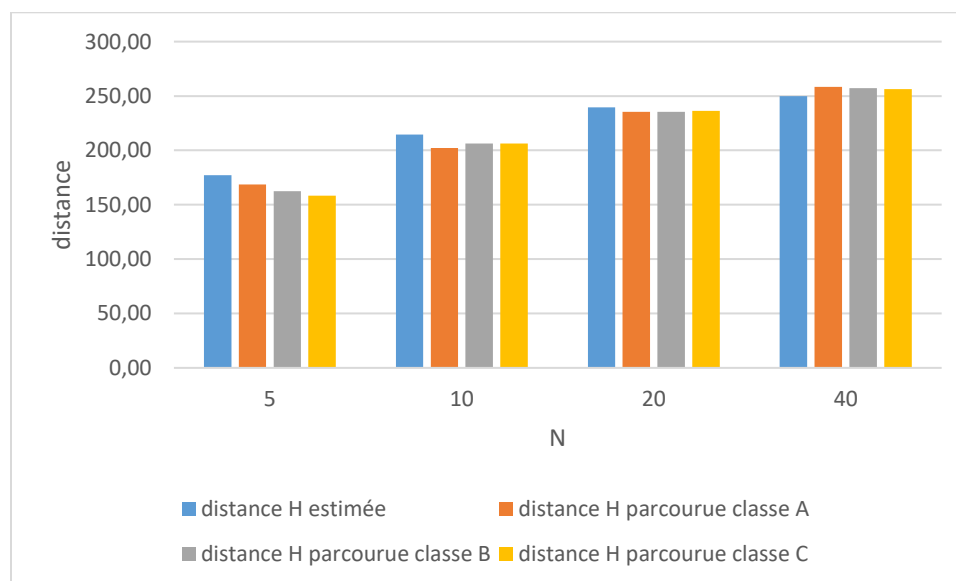


Figure 4.3 : Comparaison des distances horizontales pour la stratégie S2

En regardant les pourcentages d'erreur entre les valeurs de la distance horizontale simulée et celles de la distance horizontale estimée (voir le tableau 4.7), nous constatons que les résultats sont assez proches pour la plupart des cas, sauf pour les valeurs avec les classes B et C pour  $N = 5$ , où l'erreur atteint 11 %.

Tableau 4.7 : Erreur relative des distances horizontales pour S2

$N$	5	10	20	40
Pourcentage d'erreur classe A	4,71 %	5,83 %	1,74 %	-3,33 %
Pourcentage d'erreur classe B	8,24 %	3,88 %	1,74 %	-2,92 %
Pourcentage d'erreur classe C	10,59 %	3,88 %	1,30 %	-2,50 %

Une comparaison entre la distance verticale parcourue et celle estimée a également été réalisée. Pour ces tests, la distance verticale estimée est égale à la distance  $D_{S2}^V$ . La comparaison des distances verticales se fait avec la variation du nombre moyen de lignes par commande  $N$ . En outre, cette comparaison se fait par rapport à un autre axe de variation. Les résultats sont évalués par rapport à la dispersion du nombre de lignes par commande et le nombre moyen de lignes par commande  $N$ . En allant de la classe A vers la classe C, l'écart-type augmente et la dispersion autour de la moyenne est plus significative.

Comme le montre la figure 4.4, les résultats d'estimation de la distance verticale et les résultats de simulation de la distance verticale sont assez semblables.

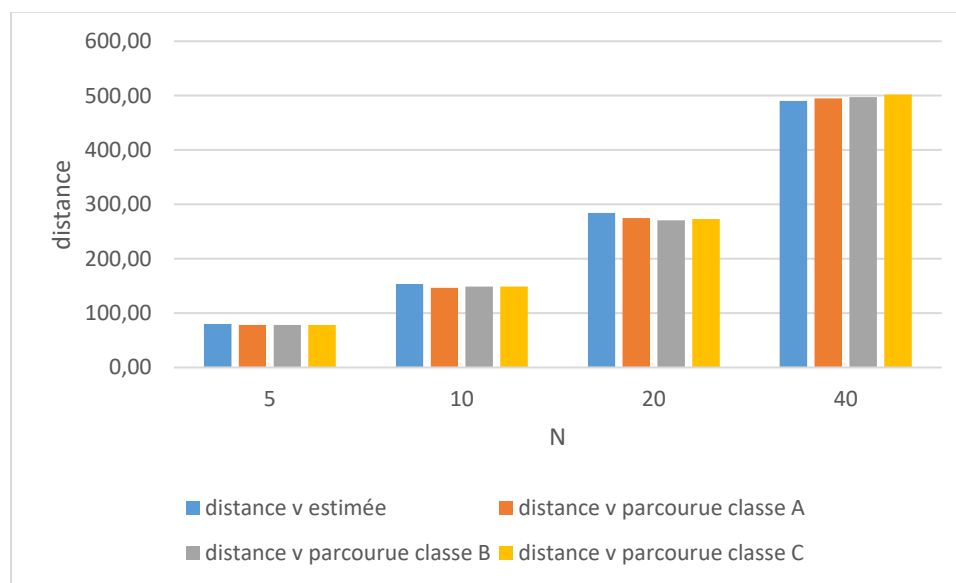


Figure 4.4 : Comparaison des distances verticales pour la stratégie S2

En se basant sur les données présentées dans le tableau 4.8 l'erreur maximale enregistrée entre la distance verticale simulée et celle estimée est égale à 4,48 %. Par conséquent, la formule analytique



$D_{S2}^V$  semble fournir une bonne estimation des distances verticales. Cette formule a également été utilisée pour estimer la distance verticale pour les stratégies  $S3$  et  $S4$ . Nous pouvons ainsi valider les résultats de  $D_{S3}^V$  et  $D_{S4}^V$  aussi.

Tableau 4.8 : Erreur relative des distances verticales pour  $S2$

$N$	5	10	20	40
Pourcentage d'erreur classe A	2,86 %	4,48 %	3,23 %	-0,93 %
Pourcentage d'erreur classe B	2,86 %	2,99 %	4,84 %	-1,40 %
Pourcentage d'erreur classe C	2,86 %	2,99 %	4,03 %	-2,34 %

## 4.8 Résultats pour la stratégie $S3$

Dans cette section, une comparaison entre la distance horizontale parcourue et la distance horizontale estimée pour la stratégie  $S3$  est effectuée. La distance horizontale estimée inclut la distance entre les allées  $D_{S3}^A$  et la distance dans les allées  $D_{S3}^W$ . Donc, la comparaison se fait par rapport à la somme  $D_{S3}^A + D_{S3}^W$ . La comparaison est faite en variant le nombre moyen de lignes par commande  $N$ . Cette comparaison se fait aussi par rapport à un autre axe de variation. Les résultats sont évalués selon la dispersion due nombre de lignes par commande par rapport au nombre moyen de lignes par commande  $N$ . En allant de la classe A vers la classe C, l'écart-type augmente et la dispersion autour de la moyenne est plus significative.

Selon les résultats présentés à la figure 4.5, les valeurs de la distance horizontale estimée sont assez proches des valeurs de la distance simulée pour les différentes valeurs du nombre moyen de lignes par commande  $N$  ainsi que les différentes classes.

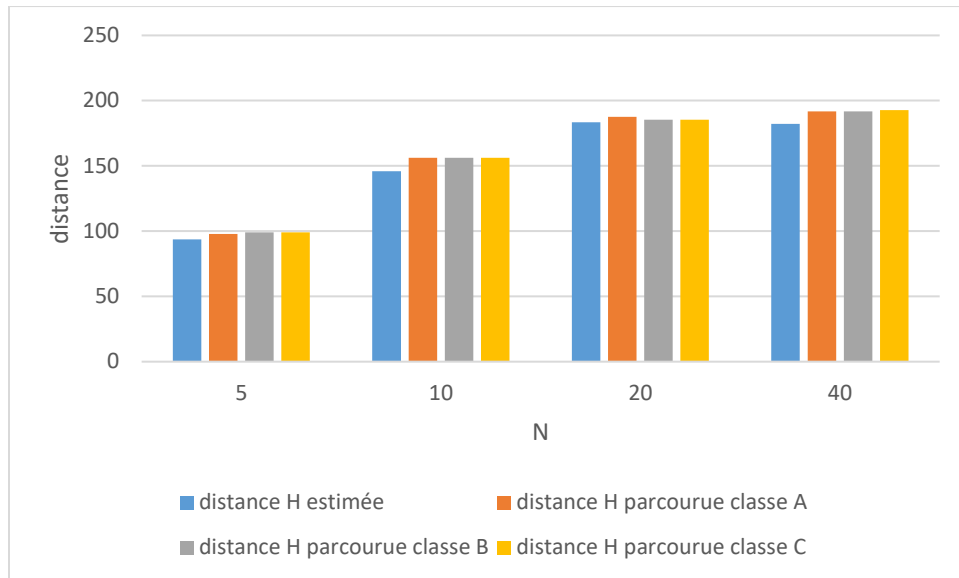


Figure 4.5 : Comparaison des distances horizontales pour la stratégie S3

Comme le montre le tableau 4.9, l'erreur maximale entre la distance simulée et la distance estimée est égale à 7 %. Par conséquent, les résultats obtenus par les deux formules analytiques  $D_{S3}^A$  et  $D_{S3}^W$  présentent une bonne estimation des distances horizontales.

Tableau 4.9 : Erreur relative des distances horizontales pour S3

$N$	5	10	20	40
Pourcentage d'erreur classe A	-4,20 %	-6,87 %	-2,27 %	-5,50 %
Pourcentage d'erreur classe B	-4,90 %	-7,50 %	-1,14 %	-5,50 %
Pourcentage d'erreur classe C	-4,90 %	-7,50 %	-1,14 %	-6,00 %

## 4.9 Résultats pour la stratégie S4

Dans cette section, une comparaison entre la distance horizontale parcourue et la distance horizontale estimée pour la stratégie S4 est effectuée. La distance horizontale estimée inclut la distance entre les allées  $D_{S4}^A$  et la distance dans les allées  $D_{S4}^W$ . Donc, la comparaison se fait par rapport à la somme  $D_{S4}^A + D_{S4}^W$ . La comparaison est faite en variant le nombre moyen de lignes par commande  $N$ . Cette comparaison se fait aussi par rapport à un autre axe : les résultats sont évalués

selon la dispersion du nombre de lignes par commande par rapport au nombre moyen de lignes par commande  $N$ . En allant de la classe A vers la classe C, l'écart-type augmente et la dispersion autour de la moyenne est plus significative.

Selon les résultats présentés dans la figure 4.6, les valeurs des distances horizontales estimées sont assez semblables aux valeurs des distances simulées pour les différents nombres moyens de lignes par commande  $N$  ainsi que les différentes classes.

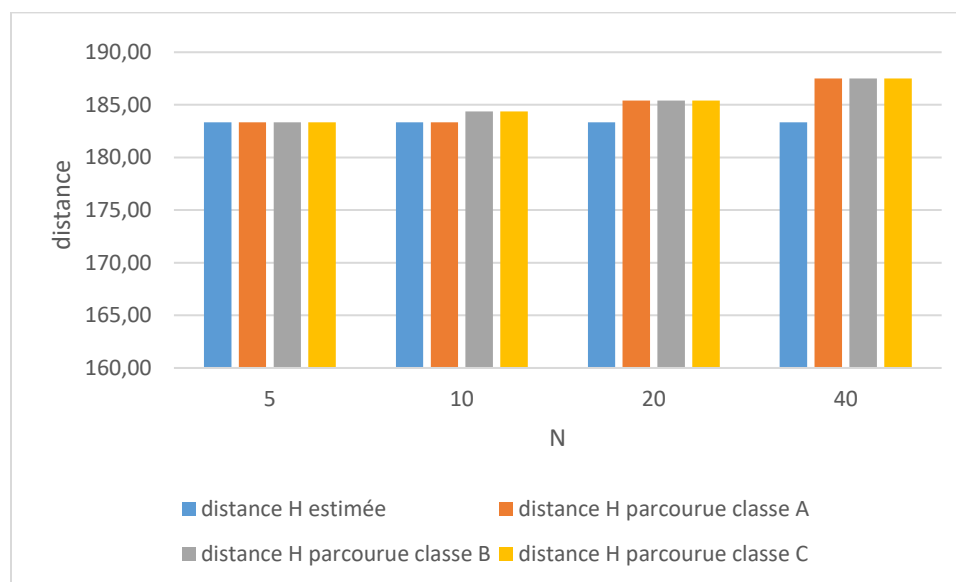


Figure 4.6 : Comparaison des distances horizontales pour la stratégie  $S4$

En regardant les pourcentages d'erreur (tableau 4.10) entre les valeurs de la distance verticale simulée et la distance verticale estimée, nous constatons que les résultats sont identiques dans plusieurs cas et que le taux d'erreur maximale ne dépasse pas -2,27 %, ce qui indique que les formules d'estimation des distances horizontales  $D_{S4}^A$  et  $D_{S4}^W$  sont assez robustes.

Tableau 4.10 : Erreur relative des distances verticales pour  $S4$

$N$	5	10	20	40
Pourcentage d'erreur classe A	0,00 %	0,00 %	-1,14 %	-2,27 %
Pourcentage d'erreur classe B	0,00 %	-0,57 %	-1,14 %	-2,27 %
Pourcentage d'erreur classe C	0,00 %	-0,57 %	-1,14 %	-2,27 %

## **4.10 Conclusion**

Les résultats présentés tout au long de ce chapitre démontrent la capacité des modèles analytiques à estimer les distances à parcourir dans un contexte de préparation de commande. Les résultats estimés ont été comparés à des valeurs tirées de la simulation. Les valeurs des deux méthodes sont proches, mais cela n'empêche que dans la plupart des cas il existe des écarts. Ces différences entre les résultats de simulation et les résultats estimés sont expliqués par le fait que le modèle d'estimation est basé sur certaines hypothèses simplificatrices

## CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La préparation de commande est une activité assez coûteuse qui nécessite une intensité d'effort physique. Des multitudes de recherches sont faites pour améliorer l'exécution de cette activité et optimiser ses paramètres. Nous avons présenté dans ce travail les indicateurs de performance utilisés dans les articles scientifiques entre 2006 et 2016. Outre cela, nous avons essayé d'expliquer les choix des indicateurs à travers les explications présentées par les chercheurs et des analyses statistiques sur ces choix. Ainsi nous avons proposé un outil analytique pour estimer l'un des indicateurs le plus important : la distance parcourue.

Selon la revue de littérature, les indicateurs qui mesurent la performance des systèmes de préparation de commande sont assez diversifiés et couvrent plusieurs aspects. Mais malheureusement, il n'existe pas un processus de choix des indicateurs de performance pour des projets portant sur la préparation de commande. Pour remédier à cela, une des solutions possibles était de suivre plusieurs indicateurs à la fois, mais surtout suivre les indicateurs les plus privilégiés tels que le temps et la distance. Ces deux indicateurs sont les plus abondants dans la littérature, on en déduit qu'ils sont plus significatifs pour les concepteurs et permettent une mesure plus rigoureuse.

Le modèle d'estimation proposé dans ce mémoire est un pas de plus pour le développement d'outils de mesure et d'estimation de performance. Ces modèles peuvent couvrir une bonne partie des cas possibles d'utilisation d'indicateurs. Il rajoute une nouvelle dimension d'estimation qui est la distance verticale à côté de l'estimation de distance horizontale. En outre, ces modèles évitent les approximations des fréquences d'accès en des fonctions continues en utilisant des distributions de fréquences d'accès empiriques.

En plus, ces modèles analytiques développés pour estimer la distance parcourue serviront comme base solide pour développer des modèles analytiques permettant d'estimer le temps. Un travail de recherche peut être entamé sur ce sujet.

Pour conclure, les indicateurs de performance resteront la boussole qui oriente les décisions des cadres. Il faut donc donner plus d'attention au choix des indicateurs de performance pour les systèmes de préparation de commande. Il faut être conscient qu'ils sont des indicateurs stratégiques qui influencent les choix des décideurs d'une entreprise et qu'un mauvais choix des indicateurs peut causer beaucoup d'ennui.

## BIBLIOGRAPHIE

- Bartholdi, J., & Hackman, S. Warehouse & Distribution Science (2006). Release 0.76.
- Berglund, P., & Batta, R. (2012). Optimal placement of warehouse cross-aisles in a picker-to-part warehouse with class-based storage. *IIE Transactions*, 44(2), 107-120.
- Bukchin, Y., Khmelnitsky, E., & Yakuel, P. (2012). Optimizing a dynamic order-picking process. *European Journal of Operational Research*, 219(2), 335-346.
- Chan, F. T., & Chan, H. K. (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.
- Claeys, D., Adan, I., & Boxma, O. (2016). Stochastic bounds for order flow times in parts-to-picker warehouses with remotely located order-picking workstations. *European Journal of Operational Research*, 254(3), 895-906.
- Crown Equipment Corporation. (2013). SP 3500 SP 4000 SERIES. Ohio, USA: Crown Equipment Corporation.
- 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.
- Gagliardi, J.-P., Ruiz, A., & Renaud, J. (2008). Space allocation and stock replenishment synchronization in a distribution center. *International Journal of Production Economics*, 115(1), 19-27.
- Glock, C. H., & Grosse, E. H. (2012). Storage policies and order picking strategies in U-shaped order-picking systems with a movable base. *International Journal of Production Research*, 50(16), 4344-4357.
- Goetschalckx, M., & Ashayeri, J. (1989). Classification and design of order picking. *Logistics World*, 2(2), 99-106.
- Grosse, E. H., Glock, C. H., & Jaber, M. Y. (2013). The effect of worker learning and forgetting on storage reassignment decisions in order picking systems. *Computers & Industrial Engineering*, 66(4), 653-662.
- Gue, K. R., Meller, R. D., & Skufca, J. D. (2006). The effects of pick density on order picking areas with narrow aisles. *IIE transactions*, 38(10), 859-868.
- Henn, S., & Schmid, V. (2013). Metaheuristics for order batching and sequencing in manual order picking systems. *Computers & Industrial Engineering*, 66(2), 338-351.
- Hong, S., Johnson, A. L., & Peters, B. A. (2012). Batch picking in narrow-aisle order picking systems with consideration for picker blocking. *European Journal of Operational Research*, 221(3), 557-570.
- Hu, K.-Y., Chang, T.-H., Fu, H.-P., & Yeh, H. (2009). Improvement order picking in mobile storage systems with a middle cross aisle. *International Journal of Production Research*, 47(4), 1089-1104.
- Hwang, H. S., & Cho, G. S. (2006). A performance evaluation model for order picking warehouse design. *Computers & Industrial Engineering*, 51(2), 335-342.

- Koo, P.-H. (2009). The use of bucket brigades in zone order picking systems. *OR spectrum*, 31(4), 759-774.
- Lu, W., McFarlane, D., Giannikas, V., & Zhang, Q. (2016). An algorithm for dynamic order-picking in warehouse operations. *European Journal of Operational Research*, 248(1), 107-122.
- Marchet, G., Melacini, M., & Perotti, S. (2011). A model for design and performance estimation of pick-and-sort order picking systems. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 22(2), 261-282.
- Mowrey, C. H., & Parikh, P. J. (2014). Mixed-width aisle configurations for order picking in distribution centers. *European Journal of Operational Research*, 232(1), 87-97.
- Muppani, V. R., & Adil, G. K. (2008). A branch and bound algorithm for class based storage location assignment. *European Journal of Operational Research*, 189(2), 492-507.
- Pan, J. C.-H., Shih, P.-H., & Wu, M.-H. (2012). Storage assignment problem with travel distance and blocking considerations for a picker-to-part order picking system. *Computers & Industrial Engineering*, 62(2), 527-535.
- Pan, J. C.-H., & Wu, M.-H. (2009). A study of storage assignment problem for an order picking line in a pick-and-pass warehousing system. *Computers & Industrial Engineering*, 57(1), 261-268.
- Riopel, D., & Croteau, C. (2008). Dictionnaire illustré des activités de l'entreprise. Français—anglais: Paris, Presses internationales Polytechnique.
- Sadowsky, V., & Ten Hompel, M. (2011). Calculation of the average travel distance in a low-level picker-to-part system considering any distribution function within the aisles. *Logistics Journal: Reviewed*.
- Smith, J. D. (1998). *The warehouse management handbook*: Tompkins press.
- Ten Hompel, M., & Schmidt, T. (2007). *Warehouse management: Automation and organisation of warehouse and order picking systems*: Springer.
- Theys, C., Bräysy, O., Dullaert, W., & Raa, B. (2010). Using a TSP heuristic for routing order pickers in warehouses. *European Journal of Operational Research*, 200(3), 755-763.
- Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., & Tanchoco, J. M. A. (2010). *Facilities planning*: John Wiley & Sons.
- Yu, M., & De Koster, R. (2010). Enhancing performance in order picking processes by dynamic storage systems. *International Journal of Production Research*, 48(16), 4785-4806.