POLYPUBLIE
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Conception d'entrepôt : sélection des équipements de manutention et d'entreposage
Auteur: Author:	Moustapha Ahmed Bouh
Date:	2017
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Ahmed Bouh, M. (2017). Conception d'entrepôt : sélection des équipements de manutention et d'entreposage [Ph.D. thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/2946/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/2946/
Directeurs de recherche: Advisors:	Diane Riopel
Programme: Program:	Doctorat en génie industriel

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CONCEPTION D'ENTREPÔT :

SÉLECTION DES ÉQUIPEMENTS DE MANUTENTION ET D'ENTREPOSAGE

MOUSTAPHA AHMED BOUH

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIÆ DOCTOR

(GÉNIE INDUSTRIEL)

DÉCEMBRE 2017

© Moustapha Ahmed Bouh, 2017.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

CONCEPTION D'ENTREPÔT :

SÉLECTION DES ÉQUIPEMENTS DE MANUTENTION ET D'ENTREPOSAGE

présentée par : AHMED BOUH Moustapha

en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiæ Doctor

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

M. FRAYRET Jean-Marc, Ph. D., président

Mme RIOPEL Diane, Doctorat, membre et directrice de recherche

M. BALAZINSKI Marek, Docteur ès Sc., membre

M. ABDUL-NOUR Georges, Ph. D., membre externe

DÉDICACE

À ma maman et mon papa,

À mes grands-mères et grands-pères,

À ma sœur et mes frères,

À mes cousines et cousins,

À mes tantes et oncles,

À toute ma famille,

À ma grande famille.

REMERCIEMENTS

« الحمد لله ربّ العالمين »

« Louange à ALLAH, Seigneur de l’univers »

J’aimerais préciser qu’une ou deux pages ne suffiraient pas pour exprimer mes remerciements et gratitudes, mais j’essaierai d’être concis.

Je tiens à remercier Mme Diane Riopel, directrice de recherche de cette thèse, pour sa rigueur et son professionnalisme. Elle a été exceptionnelle à tous égards.

Je remercie les membres du jury M. Jean-Marc Frayret, M. Marek Balazinski et M. Georges Abdul-Nour d’avoir accepté d’examiner ce travail.

Je remercie M. Jean Foucher de l’entreprise Équipement BONI pour sa collaboration dans le cadre de validation des résultats.

J’exprime également mon appréciation de mon séjour au sein du Département de mathématiques et de génie industriel et de son équipe.

Enfin, les prières et le soutien de mes parents, famille, et grande famille m'ont été d'une miséricorde et c’est à eux que je dédie cette réussite pour les remercier.

RÉSUMÉ

L’entreposage est une activité nécessaire tout au long du cycle de vie d’un produit. Il est entreposé plusieurs fois dans la chaîne logistique sous forme de matières premières. Il est ensuite entreposé durant le processus de fabrication sous différentes formes (pièce, sous-ensemble, produit fini). Il est finalement entreposé en tant que produit fini chez les intervenants de distribution (grossistes, détaillants, etc.) avant d’être livré chez le consommateur. Le produit séjourne durant une bonne partie de sa vie dans les entrepôts sous toutes ses formes.

Les coûts logistiques pèsent sur les entreprises. Ils peuvent être réduits en améliorant par exemple le processus de sélection des équipements logistiques. Il n'est pas toujours nécessaire de disposer d'équipements de manutention et d'entreposage coûteux et hautement automatisés. Selon la littérature du domaine, les concepteurs d’entrepôt et d’usine ont besoin d'outils d'aide à la décision pour choisir l'équipement convenable. L'équipement convenable désigne l'équipement le plus approprié à une opération spécifique de manutention ou d’entreposage de charges. Il possède les caractéristiques techniques requises et respecte les contraintes d'exploitation et d'environnement tout en étant rentable.

Une revue de littérature regroupant 74 articles publiés entre 1985 et 2017 et traitant la sélection des équipements de manutention et d’entreposage est réalisée. Elle porte sur cinq différents aspects : buts ou problèmes abordés dans la sélection des équipements de manutention et d’entreposage; données d’entrée; méthodes de sélection; applications des solutions proposées; et validation des propositions. Elle a permis de mettre en évidence ce qui est accompli dans ce domaine jusqu’à aujourd’hui et élaborer des recommandations de recherche. À partir de ces recommandations, différentes contributions sont faites dans cette thèse.

Une large collecte de données sur les systèmes d’entreposage destinés aux charges palettisées a été faite pour réaliser leurs fiches techniques. Un système d’entreposage est un équipement d’entreposage couplé à un équipement de manutention. Une validation de ces fiches techniques par l’entreprise Équipement BONI a été obtenue. Une méthodologie de sélection des systèmes d’entreposage destinés aux charges palettisées est proposée. Une extraction automatique de règles de sélection des systèmes desdits systèmes d’entreposage destinés aux charges palettisées est réalisée. Une méthodologie de sélection des équipements d’entreposage destinés aux petites

charges est aussi proposée. Finalement, une évaluation du processus de sélection des équipements de manutention et d'entreposage dans un contexte 4.0 est réalisée.

Différentes techniques et méthodes ont été adaptées pour réaliser ces contributions. Le raisonnement en logique floue est adopté afin de contourner le problème d'incertitude et d'imprécision des données. Les techniques et méthodes d'intelligence artificielle sont exploitées telles que le système basé sur la connaissance de la famille des systèmes experts et l'algorithme de classification de type apprentissage machine C4.5. Les méthodes d'aide à la décision multicritère à savoir FTOPSIS et AHP sont aussi adaptées aux différents problèmes.

Les propositions de cette thèse sont pour la plupart des premiers essais dans ce domaine. Les défauts de la charge palettisée sont tenus compte lors de la sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées aux côtés des autres critères pour la première fois dans la littérature. Les défauts de la charge palettisée sont : défauts de construction; défauts de forme; défauts d'occupation de la surface de la palette; autres types de défauts; défauts d'emballage des colis et état de la palette. L'application des techniques d'exploration de données (Data mining) au problème de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées est aussi une première tentative. La contextualisation de la sélection des équipements de manutention et d'entreposage dans l'ère de la quatrième révolution industrielle indique l'aspect évolutif des problèmes logistiques.

Les travaux de cette thèse pourront servir d'inspiration à d'autres efforts de recherche pour contribuer davantage à améliorer les outils d'aide à la décision destinés aux concepteurs d'entrepôt et d'usine. Une mise à jour continue des bases de données est nécessaire afin d'intégrer les avancements technologiques. Les méthodologies de sélection proposées pourraient être programmées en langage informatique afin d'automatiser les processus.

ABSTRACT

Warehousing is a necessary activity throughout the life cycle of a product. The product is warehoused as a raw material at the supplier or at different locations during the supply chain. It is then warehoused during the production process in various forms (part, sub-assembly, finished product). It is finally warehoused as a finished product in different locations (wholesalers, retailers, etc.) before being delivered to the consumer. The product stays in warehouses during a considerable part of its life.

Logistics costs represent a significant percentage of a manufactured product's total cost. To reduce costs, savings in logistics equipment could be found. This is possible with an efficient equipment selection. Costly, highly automated material handling equipment or warehousing equipment is not always necessary. According to the literature of the field, warehouse or plant designers need decision aid tools to better select suitable equipment. Suitable equipment refers to the most appropriate equipment for a material handling or warehousing operation, and it possesses the required technical characteristics and respects the operation and environmental constraints while being cost effective.

A literature review including a selection of 74 papers published between 1985 and 2017 and addressing the material handling equipment selection is realized. It covers five different aspects: aims or issues addressed in the selection of material handling and warehousing equipment; input data; methods for selecting; applications of proposed solutions; and validation of proposals. It enabled us to know what has been done up to now in this field and make further research suggestions. Based on these suggestions, different contributions are made in this thesis.

A widespread collection of data on warehousing systems designed for palletized loads is made to elaborate their technical data sheets. A warehousing system is a warehousing equipment coupled with material handling equipment. These technical data sheets have been validated by Equipment BONI Inc. A methodology for the selection of warehousing systems designed for palletized loads is proposed. Rules for the selection of warehousing systems designed for palletized loads are automatically extracted. A methodology for the selection of warehousing equipment designed for small loads is proposed. Finally, an evaluation of the selection process of material handling and warehousing equipment in a 4.0 environment is realized.

Different techniques and methods have been adapted to make these contributions. The reasoning in fuzzy logic is adopted to bypass the problem of uncertainty and vagueness of the data. Artificial intelligence techniques and methods are utilized such as knowledge-based system and Machine learning classification algorithm C4.5. Multi-criteria decision support methods FTOPSIS and AHP are also adapted for the problems.

The proposals of this thesis are mostly first attempts in this field. For the first time in the literature, the defects of the palletized load are considered alongside other criteria when selecting warehousing systems designed for palletized loads. The defects of the palletized load are: construction defects; shape defects; pallet surface occupation defects; other types of defects; packing defects and condition of the pallet. The application of data mining techniques to the selection problem of warehousing systems designed for palletized loads is also a first attempt. The contextualization in the fourth industrial revolution era indicates the evolutionary aspect of logistics problems such as the material handling and warehousing equipment selection problem.

The works of this thesis could serve as inspiration for other research efforts to further contribute in improving decision support tools for warehouse or plant designers. A continuous update of the databases is necessary to integrate technological advancements. The proposed selection methodologies could be programmed in computer language to automate processes.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ V

ABSTRACT VII

TABLE DES MATIÈRES IX

LISTE DES TABLEAUX XIV

LISTE DES FIGURES XVI

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XVII

LISTE DES ANNEXES XXIII

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 Contexte 1

1.2 Enjeux 3

1.3 Problématique et besoin de recherche 4

1.4 Objectifs de la thèse 6

1.5 Organisation de la thèse 6

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 7

2.1 Introduction 7

2.2 Méthodologie de recherche d'articles 9

2.3 Buts ou problèmes abordés dans la sélection des équipements de manutention et d'entreposage 10

2.3.1 Installation 10

2.3.2 Unité de charge 12

2.3.3 Intégration de la manutention et de l'entreposage 14
2.4 Données d'entrée 17
2.4.1 Équipements de manutention 17
2.4.2 Équipements d'entreposage 22
2.4.3 Caractéristiques 24
2.4.4 Sommaire des données d'entrée 27
2.5 Méthodes 27
2.5.1 Programmation mathématique (PM) 29
2.5.2 Intelligence artificielle (IA) 32
2.5.3 Méthodes d'aide à la décision multicritère (MADM) 36
2.5.4 Simulation (Sim) 38
2.5.5 Autres 38
2.6 Applications 39
2.6.1 Collaboration 39
2.6.2 Recherche 40
2.7 Validation des systèmes 41
2.8 Constats 41
2.9 Suggestions de recherche 43
2.10 Conclusion 44
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE ET CONTRIUBTIONS 46
3.1 Méthodologie de recherche 46
3.2 Contributions 48
CHAPITRE 4 FICHES TECHNIQUES DES SYSTÈMES D'ENTREPOSAGE DESTINÉS AUX CHARGES PALETTISÉES 49
4.1 Introduction 49

4.2 Systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées 50

4.2.1 Équipements d'entreposage destinés aux charges palettisées 51

4.2.2 Équipements de manutention destinés aux charges palettisées 53

4.3 Critères de caractérisation 53

4.3.1 Critères de la charge palettisée 54

4.3.2 Critères de l'équipement d'entreposage destiné aux charges palettisées 56

4.3.3 Critères de l'équipement de manutention destiné aux charges palettisées 59

4.3.4 Caractéristiques du milieu 60

4.4 Fiches techniques des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées 61

4.4.1 Aperçu général 61

4.4.2 Présentation des fiches techniques des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées 62

4.5 Conclusion 64

CHAPITRE 5 SÉLECTION DES SYSTÈMES D'ENTREPOSAGE DESTINÉS AUX CHARGES PALETTISÉES 65

5.1 Introduction 65

5.2 Description du problème 66

5.3 Données d'entrée 67

5.3.1 Systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées 67

5.3.2 Critères de sélection caractérisant les systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées 67

5.4 Approche de modélisation 69

5.5 Méthodologie de sélection 72

5.5.1 Phase 1 : SBC 72

5.5.2 Phase 2 : méthode FTOPSIS 74

5.6 Exemple illustratif 77

5.7 Analyse de sensibilité illustrative de l'impact des poids 80

5.8 Conclusion et recommandations 82

CHAPITRE 6 EXTRACTION DE RÈGLES DE SÉLECTION DES SYSTÈMES D'ENTREPOSAGE DESTINÉS AUX CHARGES PALETTISÉES 84

6.1 Introduction 84

6.2 Systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées et critères de caractérisation 85

6.3 Caractérisation à l'aide du langage vulgaire 86

6.4 Extraction d'information 88

6.5 Base de données 89

6.6 Arbre de décision 91

6.7 Guide de sélection des cas particuliers des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées 94

6.8 Discussion 96

6.9 Conclusion 97

CHAPITRE 7 SÉLECTION DES ÉQUIPEMENTS D'ENTREPOSAGE DESTINÉS AUX PETITES CHARGES 99

7.1 Introduction 99

7.2 Description du problème 100

7.3 Données d'entrée 102

7.3.1 Équipements d'entreposage destinés aux petites charges 102

7.3.2 Critères de sélection caractérisant les équipements d'entreposage destinés aux petites charges 103

7.4 Méthodologie de sélection 110

7.4.1 Phase 1 : SBC 110

7.4.2 Phase 2 : méthode AHP 111

7.5 Exemple illustratif 116

7.6 Conclusion et discussion 120

CHAPITRE 8 DÉFIS DE SÉLECTION DES ÉQUIPEMENTS DE MANUTENTION ET D'ENTREPOSAGE EN CONTEXTE 4.0 122

8.1 Introduction 122

8.2 Industrie 4.0 124

8.3 Logistique 4.0 125

8.4 Défis de sélection des équipements de manutention et d'entreposage en contexte 4.0126

8.4.1 Connectivité 127

8.4.2 Automatisation 128

8.4.3 Système d'alimentation 129

8.4.4 Sécurité informatique 129

8.5 Équipements de manutention face aux défis de sélection en contexte 4.0 130

8.6 Équipements d'entreposage face aux défis de sélection en contexte 4.0 132

8.7 Conclusion 136

CHAPITRE 9 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 137

BIBLIOGRAPHIE 141

ANNEXES 155

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Buts ou problèmes abordés en sélection des ÉME, méthodes, et applications 15

Tableau 2.2 : Description des catégories des équipements de manutention 19

Tableau 2.3 : Statistiques des types d'équipements de manutention des articles 22

Tableau 2.4 : Description des catégories d'équipements d'entreposage 23

Tableau 2.5 : Statistiques des types d'équipements d'entreposage des articles 24

Tableau 2.6 : Statistiques des caractéristiques de sélection 27

Tableau 2.7 : Méthodes déjà utilisées et méthodes potentielles.....28

Tableau 5.1 : Systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées 67

Tableau 5.2 : Critères de sélection et caractéristiques des systèmes d'entreposage destinés aux charges selon les critères 68

Tableau 5.3 : Connaissances sur les systèmes d'entreposage selon les critères critiques 73

Tableau 5.4 : Connaissances sur les systèmes d'entreposage selon les critères de performance ...74

Tableau 5.5 : Matrice floue du cas étudié 79

Tableau 5.6 : Matrice floue normalisée du cas étudié.....79

Tableau 5.7 : Matrice floue normalisée pondérée du cas étudié 79

Tableau 5.8 : Distances et coefficients de proximité relative 80

Tableau 5.9 : Poids des dix cas 81

Tableau 5.10 : Coefficients de proximité relative des dix cas 82

Tableau 5.11 : Classement des possibilités des dix cas.....82

Tableau 6.1 : Critères prenant plusieurs valeurs pour le système d'entreposage S_1 selon la base de connaissances 91

Tableau 6.2 : Exemples d'énumération des cas possibles pour le système d'entreposage S_1 91

Tableau 6.3 : Matrice de confusion du test de l'arbre de décision pour la sélection des cas particuliers des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées 94

Tableau 7.1 : Équipements d'entreposage destinés aux petites charges 103

Tableau 7.2 : Critères de sélection et caractéristiques des équipements d'entreposage destinés aux petites charges 109

Tableau 7.3 : Connaissances sur les équipements d'entreposage destinés aux petites charges par rapport aux critères critiques de présélection 111

Tableau 7.4 : Échelle de valeurs (Saaty, 2008) 113

Tableau 7.5 : Indices aléatoires RI (Saaty, 1980) 114

Tableau 7.6 : Matrice de comparaison par paire des critères 118

Tableau 7.7 : Matrice de comparaison des équipements selon le critère précision de prélèvement $CP3*$ 118

Tableau 7.8 : Matrice de comparaison des équipements selon le critère de reconfigurabilité $CP4*$ 118

Tableau 7.9 : Matrice de comparaison des équipements selon le critère de protection et sécurité des items $CP12*$ 119

Tableau 7.10 : Résultats des vecteurs de priorité selon différentes méthodes de priorisation 119

Tableau 7.11 : Résultats des critères d'évaluation des méthodes de priorisation 119

Tableau 8.1 : Comparaison entre industrie 4.0 et logistique 4.0 125

Tableau 8.2 : Comparaison des batteries Lithium-ion et plomb-acide 129

Tableau 8.3 : Équipements de manutention, connectivité, automatisation et système d'alimentation, sécurité informatique 131

Tableau 8.4 : Équipements d'entreposage, connectivité, automatisation, système d'alimentation, sécurité informatique 135

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Décisions majeures de la conception d'entrepôt (Gu et al., 2010).....6

Figure 2.1 : Démarche globale de la revue de littérature 9

Figure 2.2 : Statistiques sur les installations 12

Figure 2.3 : Statistiques sur les unités de charge.....13

Figure 2.4 : Statistiques sur l'intégration de la manutention et de l'entreposage.....15

Figure 2.5 : Statistiques des méthodes utilisées et potentielles.....32

Figure 2.6 : Fréquence d'utilisation des méthodes par catégorie 35

Figure 2.7 : Approches de modélisation.....37

Figure 4.1 : Démarche globale de réalisation des fiches techniques des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées 50

Figure 5.1 : Démarche globale de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées 66

Figure 5.2 : Représentation trapézoïdale d'un ensemble flou 71

Figure 5.3 : Représentation triangulaire d'un ensemble flou 71

Figure 5.4 : Représentation des ensembles flous du critère Accessibilité à chaque palette.....71

Figure 6.1 : Démarche d'extraction des règles de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées 85

Figure 6.2 : L'arbre de décision pour la sélection des cas particuliers des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées 93

Figure 7.1 : Démarche globale de sélection des équipements d'entreposage destinés aux petites charges.....100

Figure 7.2 : Décomposition hiérarchique 117

Figure 8.1 : Démarche globale de l'évaluation des capacités d'adaptation des équipements de manutention et d'entreposage au contexte 4.0 124

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AHP	Analytical hierarchy process
AL	Appareils de levage
AS/RS	Systèmes d'entreposage automatisés
ASE	Autres systèmes d'entreposage
AVS/RS	Autonomous vehicle storage and retrieval system
C	Petite caisse ou petit carton
CA_1	Limite de la hauteur
CA_2	Besoins d'espace au-dessus de la charge pour le prélèvement
CA_3	Méthode de rotation de stock
CA_4	Nombre d'UGS dans une petite zone
CA_5	Besoins en travailleurs
CA_6	Nombre d'allées
CA_7	Débit
CA_8	Niveau d'automatisation
Cas 1	Limitée par la stabilité de la charge palettisée ; limitée par la capacité des colis ; limitée par la capacité de la palette
Cas 2	Limitée par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé ; limitée par la hauteur disponible du bâtiment
Cas 3	Limitée par la hauteur disponible du bâtiment
CC_1 / C_1	Défauts de construction de paletée tolérés
CC_2 / C_2	Défauts de forme de paletée tolérés
CC_3 / C_3	Défauts d'occupation de la surface de la palette tolérés
CC_4 / C_4	Autres types de défauts de paletée tolérés

CC_5 / C_5	Défauts d'emballage des colis tolérés
CC_6 / C_6	État de palette toléré
CC_7 / C_7	Méthode de rotation des stocks
CC_8 / C_8	Agression des charges palettisées
CC_9 / C_9	Hauteur de la travée
CC_{10} / C_{10}	Profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées)
CC_{11} / C_{11}	Nombre de références idéalement requis
CC_{12} / C_{12}	Nombre de charges palettisées par référence idéalement requis
CC_{13} / C_{13}	Flux des charges palettisées idéalement requis
CC_1^*	Opérateur et stock
CC_2^*	Équipement de manutention
CC_3°	Options additionnelles
CLL	Charge large et lourde
CM	Chariots de manutention
CMPC	Chariot de manutention pour petites charges
CMS	Cellular manufacturing system
CP	Charge palettisée
CP_1 / C_{14}	Accessibilité à chaque palette
CP_2 / C_{15}	Utilisation de l'espace
CP_3 / C_{16}	Flexibilité aux changements
CP_4 / C_{17}	Coefficient d'occupation des alvéoles
CP_5 / C_{18}	Coût d'installation
CP_6 / C_{19}	Vitesse d'opération

CP_1^*	Coût initial
CP_2^*	Coût d'espace
CP_3^*	Précision du prélèvement
CP_4^*	Reconfigurabilité
CP_5^*	Difficulté lors de l'installation
CP_6^*	Besoins en maintenance
CP_7^*	Taux d'utilisation de l'espace
CP_8^*	Taux d'utilisation des dimensions internes de l'équipement
CP_9^*	Taux d'utilisation du volume cubique du bâtiment
CP_{10}^*	Problèmes de supervision
CP_{11}^*	Problèmes de design de la manutention
CP_{12}^*	Sécurité et protection des items
CTCI	Convoyeurs / transporteurs pour charges isolées
CTCV	Convoyeurs / transporteurs pour charges en vrac
E	Entrepôt
E_1	Étagère d'entreposage
E_2	Cabinet d'entreposage à tiroirs
E_3	Rayonnage dynamique pour petites charges
E_4	Carrousel horizontal
E_5	Carrousel vertical
E_6	Carrousel à rotation indépendante
E_7	Machine de préparation de commande
E_8	Système d'entreposage automatisé pour petites charges
É	Équipement

ÉC	Équipements de canalisation
ÉME	Équipements de manutention et d’entreposage
ÉMEA	Équipement de manutention et d’entreposage automatisé
FMC	Flexible manufacturing cells
FMS	Atelier flexible (flexible manufacturing system)
G	Général
GD	Gauche / droite
I 4.0	Industrie 4.0
IAu	Industrie automobile
IA	Intelligence artificielle
IAE	Industrie de l’assemblage de l’électronique
IFA	Industrie du fer et de l’acier
IMS	Integrated manufacturing system
K	Kit
KS	Kitting system
L 4.0	Logistique 4.0
Ma	Manufacture
MADM	Méthode d’aide à la décision multicritère
ME	Manutention et entreposage
Mi	Milieu
MM	Manutention manuelle
Mo	Mouvement
MRS	Milk-run system
P	Pièce individuelle

Pa	Palettiers
PM	Programmation mathématique
R	Robots de manutention
S_1	Entreposage de masse avec chariot élévateur standard
S_2	Palettier à simple profondeur avec chariot élévateur standard
S_3	Palettier à double profondeur avec chariot élévateur standard
S_4	Palettier à simple profondeur avec chariot élévateur pour allées étroites
S_5	Palettier à accumulation statique ouvert sur une face avec chariot élévateur standard
S_6	Palettier à accumulation statique ouvert sur deux faces avec chariot élévateur standard
S_7	Palettier à accumulation dynamique avec chariot élévateur standard
S_8	Palettier à gravité inversée avec chariot élévateur standard
S_9	Palettier satellite ouvert sur une face avec chariot élévateur standard
S_{10}	Palettier satellite ouvert sur deux faces avec chariot élévateur standard
S_{11}	Palettier mobile avec chariot élévateur standard
S_{12}	Système d’entreposage automatisé à simple profondeur
S_{13}	Système d’entreposage automatisé à double profondeur
S_{14}	Système d’entreposage automatisé à accumulation dynamique
S_{15}	Système d’entreposage automatisé à accumulation statique
SBC	Système basé sur la connaissance
SE	Système expert
SECV	Systèmes d’entreposage de charges en vrac
SÉE	Spécifique aux équipements d’entreposage
Sim	Simulation

SME	Système de manutention et d’entreposage
SMEA	Système de manutention et d’entreposage automatisé
SMEI	Système de manutention et d’entreposage intégré
S/R machine	Équipement de manutention pour les AS/RS
SVGA	Systèmes de véhicules à guidage automatique
FTOPSIS	Fuzzy technique for order preference by similarity to ideal solution
UC	Unité de charge
UGS	Unité de gestion de stocks
V	Vrac
VGA	Véhicule à guidage automatique

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A – NUMÉROS DES ARTICLES 155

ANNEXE B – PROCESSUS D'HARMONISATION DES DONNÉES 157

ANNEXE C – ÉQUIPEMENTS DE MANUTENTION DANS LES ARTICLES 160

ANNEXE D – ÉQUIPEMENTS D'ENTREPOSAGE DANS LES ARTICLES 167

ANNEXE E – CARACTÉRISTIQUES DANS LES ARTICLES 169

ANNEXE F – SOMMAIRE DES DONNÉES D'ENTRÉE 176

ANNEXE G – FICHES TECHNIQUES DES SYSTÈMES D'ENTREPOSAGE DESTINÉS AUX CHARGES PALETISSÉES 179

ANNEXE H – EXTRAIT DE LA BASE DE DONNÉES D'EXTRACTION DE RÈGLES DE SÉLECTION DES SYSTÈMES D'ENTREPOSAGE DESTINÉS AUX CHARGES PALETTISÉES 194

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

« Si pendant longtemps la priorité des entreprises était axée sur les moyens de production, elles se concentrent actuellement beaucoup plus sur les fonctions logistiques » (Georges, 2002).

1.1 Contexte

La logistique est définie comme étant le processus permettant d'assurer le flux efficient des biens et de l'information du point d'origine au point de consommation, en passant par l'ensemble des points d'entreposage et de distribution. Les biens peuvent être des matières premières, des produits semi-finis, des produits finis, des produits invendus, des produits en fin de vie et des déchets de production. La logistique ne s'occupe pas de la fabrication ou de la transformation des produits, activité qui relève de la production. Elle est responsable de fournir les produits au bon moment, au bon endroit, au moindre coût et avec la qualité souhaitée (Riopel & Croteau, 2013; Syndicat des industries de matériels de manutention, 1983a; Tompkins, White, Bozer, & Tanchoco, 2010). Le concept et le domaine d'application de la logistique changent avec le développement industriel. Elle prend maintenant en compte tout le cycle de vie du produit avec l'introduction de la logistique inverse (Riopel, Chouinard, Marcotte, & Ait-Kadi, 2011). L'entreposage et la manutention sont deux des fonctions logistiques.

La fonction entreposage est l'action de regrouper les biens ou les marchandises qui constituent le stock dans un entrepôt. De préférence, ces derniers sont disposés dans un ordre déterminé et dans des conditions matérielles favorables à leur conservation et à leur prélèvement (Riopel & Croteau, 2013). Les termes entreposage et stockage sont parfois considérés comme étant des synonymes dans la gestion des stocks. En effet, la différence résiderait dans une simple question de durée. L'entreposage se voudrait provisoire tandis que le stockage présenterait une solution à temps indéfini. Le terme entrepôt de stockage est un pléonasme, car le stockage peut aussi se faire dans un entrepôt (Riopel & Croteau, 2013).

La fonction manutention est l'action de déplacer automatiquement, mécaniquement ou manuellement, à l'aide d'appareils de manutention, des biens sur une faible distance et généralement à l'intérieur d'un bâtiment tel que l'entrepôt. La manutention est différente de la manipulation et du transport. La manipulation se limite aux déplacements effectués dans l'aire d'un

poste de travail, tandis que le transport correspond aux déplacements sur de longues distances et généralement à l'extérieur (Riopel & Croteau, 2013).

Toutes les chaînes logistiques possèdent au moins un ou plusieurs entrepôts (Roux, 2011). L'entreposage des biens est aussi vieux que l'histoire (Tompkins & Smith, 1998). L'entrepôt a pour but le rangement et l'entreposage des biens, ainsi que la protection de celles-ci contre les pertes, les vols, les dommages, la détérioration et les intempéries. Il permet de réguler l'offre et la demande en disposant des stocks de marchandises à proximité du lieu des clients ou des consommateurs. Grâce à l'entrepôt, il est possible de respecter les délais, de mieux réagir aux fortes réactivités du marché et d'optimiser les coûts logistiques (Tompkins et al., 2010).

Les fonctions principales de l'entrepôt sont la réception des biens arrivant de l'extérieur, leur entreposage pour un temps fini, le prélèvement de ces derniers pour la préparation de commande, et leur expédition à des clients. D'autres activités pouvant être considérées comme des sous-fonctions sont aussi réalisées dans l'entrepôt telles que l'inspection et le contrôle qualité, la mise en quarantaine, le triage, l'emballage, etc. (Ballou, 2004; Bowersox, Closs, & Cooper, 2002; Chopra & Meindl, 2004; Coyle, Bardi, & Langley, 2003; Johnson, Wood, Wardlow, & Murphy, 1999; Simchi-Levi, Kaminsky, & Simchi-Levi, 2003; Stock & Lambert, 2001).

Les produits entreposés peuvent être sous forme de charges isolées ou en vrac. Les charges isolées sont le regroupement de plusieurs produits unitaires dans des cartons, par exemple, afin de faciliter le transport, la manutention, l'entreposage et la livraison. Lorsque plusieurs charges isolées sont regroupées sur une palette, elles forment une charge palettisée. Une charge palettisée est un ensemble constitué par une palette, ou un autre support apparenté, et la paletée qu'elle supporte (Riopel & Croteau, 2013). Les produits en vrac sont le plus souvent des minerais qui sont ni arrimés ni emballés. Leur rassemblement peut se faire soit en tas soit en silos. Les matériaux ne forment pas les mêmes tas, il faudra veiller sur l'angle au sommet et à la valeur de la surface de la base pour éviter tout danger d'éboulement, principalement à la reprise. Les silos permettent d'éviter ses inconvénients et d'augmenter la quantité stockée. Lorsque les produits en vrac sont conditionnés dans des sacs, des conteneurs ou d'autres types d'emballage, ils forment naturellement des charges isolées (Syndicat des industries de matériels de manutention, 1983b). Les types de produits considérés dans chaque chapitre de cette thèse sont définis et précisés respectivement.

1.2 Enjeux

La manutention et l'entreposage sont devenus des instruments stratégiques pour plusieurs entreprises afin de renforcer leur compétitivité dans le marché (Tompkins & Smith, 1998). Les coûts de manutention sont estimés entre 15 et 70 % du coût total du produit manufacturier (Tompkins et al., 2010). De leur côté, Manley et al. (2008) indiquent que le coût de manutention et d'entreposage est responsable de 30 à 60 % du coût du produit. Pour réduire les coûts logistiques, il est nécessaire de maîtriser les coûts de l'entrepôt et prendre les bonnes décisions lors de l'investissement sur les équipements d'entrepôt. Au Canada, les investissements accumulés en capital sur l'ensemble des immobilisations du secteur du transport et entreposage se chiffrent en milliards $ (Gouvernement du Canada, 2016).

Sur le chemin vers l'excellence, l'entrepôt rencontre de plus en plus de défis qui l'amènent à s'adapter. Tompkins et Smith (1998) dénombrent quelques-uns de ces défis :

- Augmentation significative et continue du nombre des unités de gestion de stocks (UGS);
- Exigences accrues du service à la clientèle;
- Demandes de réduction des inventaires;
- Demandes d'augmentation de l'efficience des opérations et de l'utilisation des espaces de l'entrepôt;
- Demandes d'augmentation de la personnalisation des produits;
- Besoin d'intégrer davantage l'entrepôt et les réseaux logistiques;
- Réduction des délais et du transbordement;
- Changement de philosophie du flux poussé vers le flux tiré et le juste-à-temps;
- Réduction du nombre de niveaux dans le réseau logistique vers de plus en plus la livraison directe au client ou au consommateur;
- Disponibilité de tierces parties efficientes fournissant de l'entreposage;
- Augmentation significative du nombre d'équipements de manutention et d'entreposage disponible et des options;
- Utilisation accrue des technologies de l'information et de communication (EDI, identification automatique, systèmes d'information, etc.);
- Partenariat et intégration virtuelle des inventaires des partenaires;
- Emphase accrue sur le marché global et les exigences des livraisons diversifiées.

D’autres défis plus récents apparaissent avec l’évolution technologique et les nouveaux concepts. Les progrès dans l'analyse des données massives offrent des opportunités pour mieux maîtriser les processus logistiques. L’industrie 4.0 crée de nouvelles exigences et une adaptation des systèmes existants est nécessaire (Greengard, 2015; Khan & Turowski, 2016). Une évaluation du niveau de maturité des équipements de manutention et d’entreposage vis-à-vis du contexte 4.0 est faite dans cette thèse.

Certaines entreprises estiment que l’entrepôt est sans valeur ajoutée. Elles le considèrent comme un mal nécessaire. Elles classifient ses coûts comme des coûts indirects. Or, l’absence des fonctions manutention et entreposage coûte à l’entreprise. Il en est déduit que ses fonctions possèdent une certaine valeur. Il s’agit, précisément, d’une valeur d’échange. Cette dernière réside dans le fait d’obtenir le bon produit dans la bonne place au bon moment. La manutention et l’entreposage fournissent le temps et l’espace nécessaires pour la prospérité de l’entreprise (Syndicat des industries de matériels de manutention, 1983a; Tompkins & Smith, 1998).

Il est d’usage de chercher à minimiser les coûts et les pertes au sein de l’entrepôt. Ce travail peut se faire en limitant de plusieurs manières les mouvements de manutention et d’entreposage.

(1) Combiner les mouvements de manutention et d’entreposage à d’autres activités telles que l’emballage, le tri, la consolidation, etc.;
(2) Réduire les distances;
(3) Rationaliser le choix des équipements de manutention et d’entreposage à implanter.

La rationalisation du choix des équipements de manutention et d’entreposage passe par une sélection et une comparaison des possibilités d’équipements susceptibles. Le processus de rationalisation du choix des équipements de manutention et d’entreposage fonde la problématique abordée dans cette thèse.

1.3 Problématique et besoin de recherche

La sélection des équipements de manutention et d’entreposage est une des décisions stratégiques et majeures de la conception d’entrepôt selon Gu, Goetschalckx et McGinnis (2010) (Figure 1.1). Les ingénieurs de conception d’entrepôt disposent de peu d’outils génériques d’aide à la décision pour sélectionner des équipements convenables aux opérations spécifiques de manutention ou

d’entreposage. Ils manquent de guide de sélection des équipements de manutention et d’entreposage (Gu et al., 2010). Ils se retrouvent entre trois options (Chan, Ip, & Lau, 2001).

(1) Utiliser leurs propres expériences dans le domaine en cherchant dans les livres et les aide-mémoires de la manutention;
(2) Se fier à un vendeur d’équipements et à ses catalogues;
(3) Solliciter les recommandations d’un consultant externe.

Chacune des trois options ci-dessus présente ses limites et défauts. Lorsque les concepteurs comptent sur leurs vécus et leurs expériences de travail pour faire le choix des équipements, ils ont tendance à choisir les équipements avec lesquels ils sont familiers. Cette façon de procéder est adaptée lorsque le changement n’est pas important. Les mêmes méthodes sont gardées et les changements sont rares. Aucune garantie sur le choix de l’équipement le plus approprié n’est faite. Concernant les vendeurs, ils sont généralement disposés à être subjectifs en voulant écouler les stocks de leurs entreprises. Les propositions seraient parfois biaisées à cause des conflits d’intérêts. Si l’équipement qui serait le plus approprié à un problème donné n’est pas dans le catalogue du commercial, il lui est difficile de recommander une technologie qu’il ne vend pas. D’autre part, les conseils des consultants externes représentent un coût additionnel. De plus, ils sont souvent spécialisés dans des secteurs particuliers.

Nous avons essayé l’expérience des ingénieurs. Après avoir lu les brochures des entreprises, nous avons contacté certains vendeurs d’équipements de manutention et d’entreposage afin de demander comment faire pour connaitre l’équipement qu’il nous faudrait. Ils nous ont directement proposé de communiquer avec le service commercial pour toute question. Nous avons répliqué en disant que nous voudrions avoir une idée par nous-mêmes des possibilités qui seraient susceptibles de répondre à nos besoins avant de prendre contact avec le commercial. Nous les avons questionnés s’ils avaient un guide de sélection. La réponse a été catégorique. Ils nous ont dirigés vers la Commission des normes, de l’équité, de la santé et de la sécurité du travail pour lire un petit tableau que nous connaissions très bien. Ce dernier est celui du rapport technique publié par Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) et Association sectorielle transport entreposage (ASTE) (2009). Cette expérience confirme que les ingénieurs concepteurs ne disposent pas des outils d’aide à la décision reconnus pour faire un choix d’équipements de manutention et d’entreposage à part les façons traditionnelles spécifiées par Chan, Ip, & Lau, (2001).

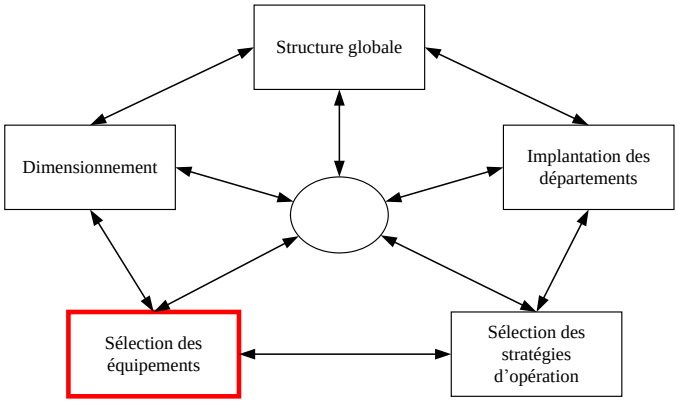


Figure 1.1 : Décisions majeures de la conception d'entrepôt (Gu et al., 2010)

1.4 Objectifs de la thèse

La thèse a pour objectifs de proposer :

(1) une méthodologie de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées;

(2) une méthodologie de sélection des équipements d'entreposage destinés aux petites charges.

1.5 Organisation de la thèse

La thèse est organisée autour de neuf chapitres. Après le Chapitre 1 Introduction, le Chapitre 2 présente la revue de littérature sur le sujet. Le Chapitre 3 décrit la méthodologie de recherche et les contributions de la thèse. Le Chapitre 4 introduit les fiches techniques des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées qui sont fournies en annexe. Le Chapitre 5 présente la méthodologie développée pour la sélection des systèmes d'entreposages destinés aux charges palettisées. Le Chapitre 6 présente l'extraction automatique de règles de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. Le Chapitre 7 est consacré à la méthodologie de sélection des équipements d'entreposage destinés aux petites charges. Le Chapitre 8 décrit les défis de sélection des équipements de manutention et d'entreposage en contexte de la 4ème révolution industrielle. Finalement, le Chapitre 9 conclut la thèse avec des recommandations.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Les opérations de « manutention et d'entreposage » (ME) dans les usines et les systèmes de distribution tels que les entrepôts peuvent être réalisées manuellement ou à l'aide de matériels connus sous le terme « équipements de manutention et d'entreposage » (ÉME). Apple, Meller et White (2010) adhèrent à la philosophie selon laquelle les opérations de ME devraient être manuelles à moins que les conditions nécessitent un ÉME : « commencer avec une solution basée sur les processus manuels et substituer par la mécanisation / automatisation lorsque la solution de départ ne suffit plus ». Le Material Handling Institute (2017) publie sur son site web une taxonomie des ÉME créée par Kay (2012) et classifiée en cinq grandes catégories : équipements de transport, équipements de positionnement, équipements de formation d'unité de charge, équipement d'entreposage, et équipement de contrôle et identification. Cette taxonomie est inspirée de différentes classifications des ÉME (Chu, Egbelu, & Wu, 1995; Tompkins et al., 1996) et une taxonomie plus détaillée des ÉME est proposée par Ward (1986).

Les systèmes de manutention et d'entreposage (SME) sont souvent constitués de combinaisons de ÉME (Kouvelis & Lee, 1990). Un SME efficient résulte en un faible inventaire, de faibles coûts de production, une meilleure utilisation de l'espace, de courts cycles de production, de faibles dommages aux produits dus à une manutention inappropriée, un taux constant des cycles de production, et des conditions de travail plus sures (Apple, 1972). Une sélection inappropriée de SME basée sur une mauvaise évaluation peut engendrer des pertes en capacité, des pertes dramatiques en productivité, des dangers de sécurité, et un temps de réponse au marché excessif (Frazelle, 1985). La sélection de SME est « l'acte de sélectionner les types et la quantité d'un ou plusieurs différents ÉME à partir d'une liste de candidats pour faire tous les transferts de matières dans une usine durant une période spécifiée, souvent quelques années » (Institute of Industrial Engineers, 2000). La sélection des ÉME fait partie des décisions de la sélection de SME, et la sélection de SME est faite durant le processus de conception de SME. Une analyse complète du problème de ME est requise pour pouvoir sélectionner le plus approprié des SME (Apple, 1972, 1977). Pour faire la sélection du bon ÉME, Apple (1977) suggère l'utilisation de l'équation de la

manutention et de l'entreposage : Matière + Mouvement = Méthode. Cette équation est basée sur six questions majeures (pourquoi? quoi? où? quand? comment? et qui?) (Heragu & Ekren, 2009).

Différents critères et caractéristiques pour la sélection des ÉME peuvent être inspirés à partir de l'équation de la manutention et de l'entreposage. Les chercheurs ont exploité ces critères et caractéristiques pour développer plusieurs méthodes et procédures de sélection des ÉME. Nous proposons une revue de littérature des travaux de recherches sur la sélection des ÉME sur cinq aspects : (1) buts ou problèmes abordés dans la sélection des ÉME; (2) données d'entrée; (3) méthodes pour sélectionner le plus approprié des ÉME; (3) applications des solutions proposées; et (5) validation des propositions. L'objectif est d'exposer ce qui a été fait dans ce domaine et ce qui pourrait être exploré dans le futur. La Figure 2.1 présente la démarche globale de réalisation de la revue de littérature. Les étapes de la démarche sont expliquées et détaillées dans les sections suivantes du chapitre.

D'autres revues de littérature sur la sélection des ÉME existent (Saputro, Masudin, & Daneshvar Rouyendegh, 2015; Vijayaram, 2006). Les différences entre les précédentes revues et la présente peuvent être résumées en deux points : le nombre d'articles revus et la portée de la revue. Vijayaram (2006) analyse les ÉME et 10 systèmes experts pour la sélection des ÉME. Saputro et al. (2015) examinent 42 articles sur trois aspects : niveaux de sélection des ÉME, contextes, et approches. Nous proposons une revue de littérature regroupant 74 articles (ANNEXE A), une analyse sur cinq différents aspects (buts ou problèmes abordés dans la sélection des ÉME, données d'entrée, méthodes de sélection, applications et validation), et des suggestions de perspectives de recherche future et méthodes et techniques qui n'ont pas été exploitées antérieurement dans ce domaine.

La suite du chapitre est structurée comme suit. La section 2.2 décrit la méthodologie de recherche d'articles. Dans les sections 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, et 2.7, nous présentons respectivement les buts de sélection ou problèmes abordés, les données d'entrée, les méthodes de sélection, les applications, et la validation des propositions. Dans la section 2.8, nous discutons les résultats de la revue. La section 2.9 propose différentes suggestions de recherche sur différents aspects. Nous concluons ce chapitre avec la section 2.10.

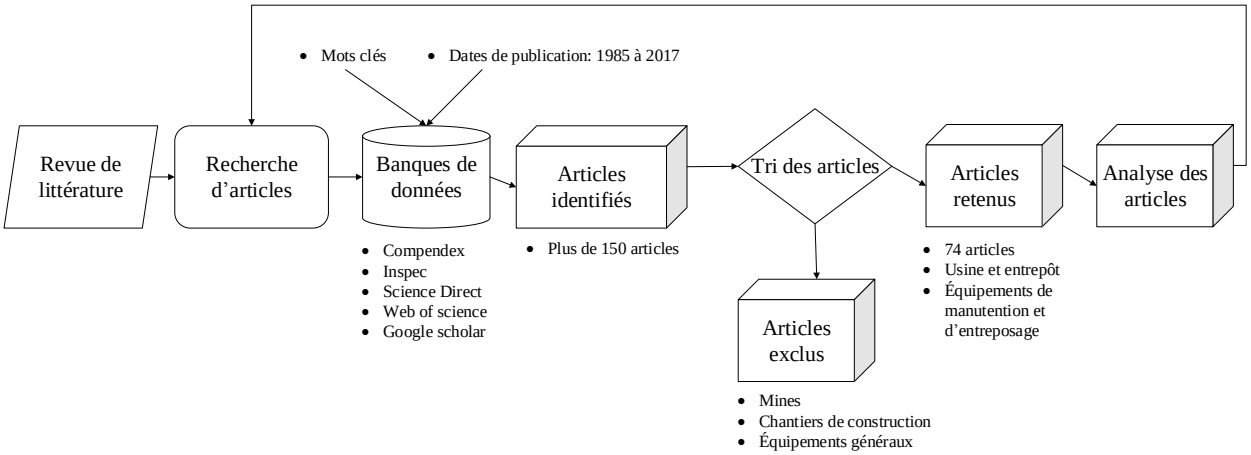


Figure 2.1 : Démarche globale de la revue de littérature

2.2 Méthodologie de recherche d'articles

Sachant que la ME existe dans différents types d'installations et industries, nous tentons d'investiguer les buts ou problèmes abordés dans la sélection des ÉME, les données d'entrée, les méthodes, les applications et les processus de validation. Ces cinq aspects d'investigation sont dérivés de cinq questions : quel genre de problèmes de sélection des ÉME sont abordés dans les articles scientifiques et pour quels buts? Quelles sont les données d'entrée utilisées par les chercheurs? Quelles techniques de décision sont appliquées pour sélectionner le plus approprié des ÉME? Quelle est la proximité des solutions proposées aux problématiques réelles de l'industrie? Est-ce que les propositions sont validées? L'objectif de ces questions est d'évaluer ce qui est accompli jusqu'à aujourd'hui et ce qui pourrait être fait.

De ce fait, la recherche d'articles a été conduite dans différentes bases de données telles que Compendex, Inspec, Science Direct, Web of science, Google scholar. Les mots clés utilisés ont été : material handling equipment selection; material handling system design; material handling system selection; warehousing equipment selection; order picking equipment selection; etc. La littérature publiée entre 1985 et 2017 a été ciblée. Plus de 150 articles de journaux, articles de conférences, numéros de magazines, rapports techniques, et chapitres de livres ont été identifiés. Chaque document a été soigneusement examiné.

Seulement les articles traitant la sélection des ÉME en usine manufacturière ou en entrepôt ont été sélectionnés. La ME dans les mines, chantiers de construction et autres industries est exclue. En effet, les types de ÉME dans les industries minières et de construction sont différents (standard,

elevating standard, tandem, elevating tandem, front end loaders, hydraulic excavators, backhoes and electric shovels, trucks, tractors) (Bandopadhyay & Venkatasubramanian, 1987; Haidar & Naoum, 1996; Komljenovic & Kecojevic, 2009; Lashgari et al., 2012; Yazdani-Chamzini & Shariati, 2013). Les détails concernant les industries exclues peuvent être retrouvés dans les articles précités. En comparaison avec les autres revues de littérature, Saputro et al. (2015) incluent dans leur littérature les articles sur la ME en mine et chantier de construction. D'autre part, les articles traitant la conception ou la sélection des systèmes de préparation de commande, la conception de SME, la conception d'usine, et la conception d'entrepôt, mais ne couvrant pas amplement avec des détails la phase de sélection des ÉME sont omis. En plus, les articles traitant la sélection des équipements en général tels que les machines-outils ou équipements de fabrication ont aussi été écartés. Finalement, 55 articles de journaux, 18 articles de conférence et un chapitre de livre ont été sélectionnés pour cette revue de littérature.

2.3 Buts ou problèmes abordés dans la sélection des équipements de manutention et d'entreposage

Cette section analyse les articles retenus du point de vue des problèmes abordés et les buts suivis. Nous délimitons la portée de chaque article selon trois points dérivés de trois questions. Nous essayons de connaitre où la sélection des ÉME a lieu. Quel type d'unité de charge est ciblé? Quel est le niveau d'intégration de la ME? Des éléments de réponse à ces questions sont apportés dans les paragraphes suivants avec les exemples de certains articles représentatifs. Nous avons gardé les expressions entre parenthèses en anglais, car nous n'avons pas trouvé toutes les traductions en français.

2.3.1 Installation

2.3.1.1 Manufacture (Ma / FMS / FMC / CMS / IMS / KS – MRS)

Trié par date de publication, la Figure 2.2 et la deuxième colonne du Tableau 2.1 montrent que la plupart des articles abordent la sélection des ÉME en général dans les systèmes manufacturiers (Ma). Hadi-Vencheh et Mohamadghasemi (2015) classent différentes alternatives de convoyeurs / transporteurs pour une unité de production. D'autres articles spécifient précisément le type du système manufacturier comme l'atelier flexible qui est traduit en anglais « flexible manufacturing

system » (FMS), « flexible manufacturing cells » (FMC), et « cellular manufacturing system » (CMS). Le problème de sélection de SME dans un CMS de Lashkari, Boparai et Paulo (2004) est une extension du travail de Paulo, Lashkari et Dutta (2002) traitant l'allocation des opérations et la sélection des ÉME dans un FMS. Le même problème d'allocation des opérations et de sélection des ÉME dans un FMS a été étendu et modifié par d'autres chercheurs. Les « integrated manufacturing system » (IMS) sont traités par Kouvelis et Lee (1990). Un IMS peut être réalisé sans ordinateurs et automatisation en production et ME parce que le système juste-à-temps (JAT) de Toyota aboutit à une intégration du système de production via Kanban (Kouvelis & Lee, 1990). Yilmaz, Oztaysi, Durmusoglu et Oner (2017) traitent le problème des systèmes d'alimentation des lignes de production (line feeding systems) tels que « kitting system » (KS) et « milk-run system » (MRS).

2.3.1.2 Industrie spécifique (IAE / IFA / IAu)

Certaines industries spécifiques font partie des domaines explorés par les articles à savoir l'industrie de l'assemblage de l'électronique (IAE) (Kim & Eom, 1997); l'industrie du fer et de l'acier (IFA) (Varun, Harshita, Pramod, & Nagaraju, 2017); et l'industrie automobile (IAu) (Bauters, Govaert, Limère, & Landeghem, 2015).

2.3.1.3 Entrepôt (E)

Les types de ÉME sont de même utilisés dans les entrepôts et les systèmes de distribution. Selon la deuxième colonne du Tableau 2.1, les articles traitant la sélection des ÉME en entrepôt ne sont pas nombreux. Trevino, Hurley, Clincy et Jang (1991) abordent le problème de sélection des équipements d'entreposage et des chariots de manutention et la conception d'implantation pour les entrepôts (E). Poon, Choy, Cheng, Lao et Lam (2011) traitent la sélection et l'allocation de ÉME en manufacture et entrepôt en considérant une demande de production stochastique. Tuzkaya, Gülsün, Kahraman et Özgen (2010) notent que la sélection des ÉME en entrepôt est particulièrement ignorée.

2.3.1.4 Général (G)

Le problème abordé dans un article est classé général (G) lorsqu'il considère une catégorie ou un type de ÉME sans spécifier un type d'installation particulier. L'article de Malmborg, Krishnakumar, Simons et Agee (1989) est du groupe G puisqu'il traite la sélection des chariots de

manutention sans préciser un type d'installation. Selon la taxonomie de Kay (2012), les chariots de manutention vont des chariots de manutention manuels aux véhicules à guidage automatique (VGA) en passant par les chariots élévateurs à fourche. Ils peuvent être employés pour les opérations de quai, d'entreposage d'unités de charge, de préparation de commandes, de manutention en cours, et de manutention dans un parc extérieur. Un autre exemple est Castleberry (1990) qui fournit une procédure d'analyse de la prise de décision pour la sélection des systèmes de véhicules à guidage automatique (SVGA).

2.3.1.5 Industrie 4.0 / Logistique 4.0 (I 4.0 / L 4.0)

Ahmed Bouh et Riopel (2017a) analysent les défis de sélection des ÉME dans un contexte 4.0. Ils proposent des recommandations pour les fabricants de ÉME et les décideurs dans les problèmes de sélection des ÉME.

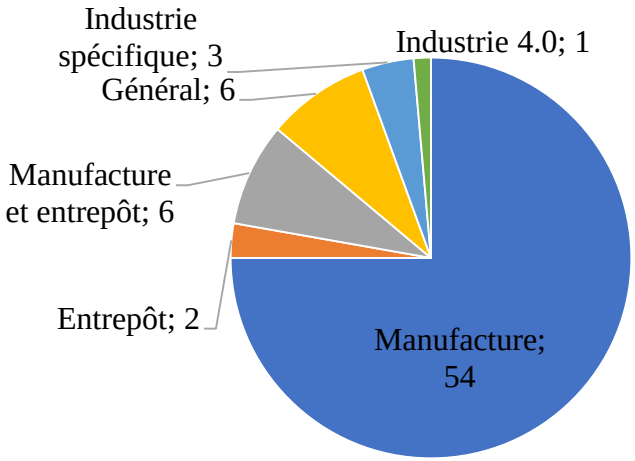


Figure 2.2 : Statistiques sur les installations

2.3.2 Unité de charge

2.3.2.1 Général (G)

Le type de l'unité de charge est souvent spécifié dans les articles sous l'attribut type de matériau "material type". Il peut être une unité du produit, une caisse ou un carton, un produit avec une forme irrégulière, un cylindre, du vrac, un produit long, etc. Selon la Figure 2.3 et la troisième

colonne du Tableau 2.1, la plupart des articles couvrent différentes unités de charge et parfois elles ne sont pas spécifiées, surtout avec les méthodes d'aide à la décision multicritère (MADM). Dans ce cas, nous les notons de type général (G). C'est le cas de beaucoup de problèmes de sélection en usine puisque les produits se présentent sous plusieurs formes. Par exemple, Mirhosseyni et Webb (2009) citent charge palettisée, pièce individuelle, barre, boite, sac, bac, et silo. Chakraborty et Prasad (2016) manutentionnent des colis, des boites et des cartons.

2.3.2.2 Unités de charge spécifiques (P / C / V / K / CP / CLL)

Certains articles tiennent compte d'un ou deux types d'unités de charge seulement. Ahmed Bouh et Riopel (2017c) traitent la sélection des ÉME pour les petites charges pouvant être des pièces individuelles du produit (P) et des petites caisses ou des petits cartons (C). Ce problème est connu dans la littérature sous l'appellation « the selection of piece-level or case-level material handling equipment » (Pazour & Meller, 2014). L'article de Bauters et al. (2015) considère des pièces pour l'industrie automobile (IAu) qui peuvent être soit en vrac (V) ou en kit (K). Ahmed Bouh et Riopel (2016b) analysent la sélection des ÉME pour les charges palettisées (CP). Matt, Fraccaroli, Franzellin et Rauch (2011) traitent le problème de sélection des ÉME pour les charges larges et lourdes (CLL).

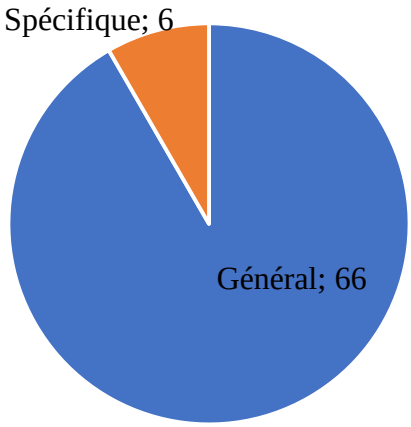


Figure 2.3 : Statistiques sur les unités de charge

2.3.3 Intégration de la manutention et de l'entreposage

2.3.3.1 Manutention manuelle (MM)

Rossi, Bertoloni, Fenaroli, Marciano et Alberti (2013) intègrent l'aspect ergonomique au problème de sélection des ÉME. Ils fournissent une évaluation entre la manutention manuelle (MM) et celle assistée par un manipulateur industriel Liftronic® EASY E80 INDEVA.

2.3.3.2 Équipement (ÉME / ÉMEA)

Selon la Figure 2.4 et la colonne quatre du Tableau 2.1, plus que la moitié de la littérature sélectionnée traite la sélection d'un ÉME unique. Par exemple, Chakraborty et Prasad (2016) abordent la sélection des chariots de manutention. Les modèles de Jiamruangjarus et Naenna (2016) et Nguyen, Dawal, Nukman, Rifai et Aoyama (2016) sont conçus pour la sélection de convoyeurs / transporteurs. Parfois, seulement les ÉME automatisés (ÉMEA) tels que les VGA sont pris en compte (Shelton & Jones, 1987).

2.3.3.3 Système (SME / ST / SMEA)

La sélection de SME est référée dans la plupart des articles sous forme de sélection d'un groupe d'équipements composé de différents ÉME destinés à différentes opérations de ME (Mirhosseyni & Webb, 2009). Raman, Nagalingam, Gurd et Lin (2009) déterminent le nombre de ÉME nécessaire pour obtenir un flux de matières efficace dans le SME. Bauters et al. (2015) fournit un modèle de simulation pour évaluer différents systèmes de transport (ST) dans l'industrie automobile. Certains papiers considèrent seulement des systèmes de manutention et d'entreposage automatisés (SMEA) tels que les systèmes de véhicules à guidage automatique (SVGA), les systèmes d'entreposage automatisés (AS/RS) et les « autonomous vehicle storage and retrieval system » (AVS/RS). C'est le cas de Rahman, Hussain, Kharlamov, Ali et Saif Ul (2007) qui traitent des SVGA avec robots et des convoyeurs / transporteurs avec robots. Il existe dans la littérature des travaux évaluant la performance des SMEA (Cai, 2010; Heragu, Cai, Krishnamurthy, & Malmborg, 2011).

2.3.3.4 Système de manutention et d'entreposage intégré (SMEI)

Les systèmes de manutention et d'entreposage intégrés (SMEI) sont aussi couverts dans la littérature. Le SMEI de Kim et Eom (1997) appelé « material handling and storage system

(MHSS) » sélectionne un système de manutention intégré à un système d'entreposage. D'autres articles proposent des modèles d'intégration de la sélection ÉME avec d'autres questions de la conception de SME comme celui de Noble, Klein et Midha (1998).

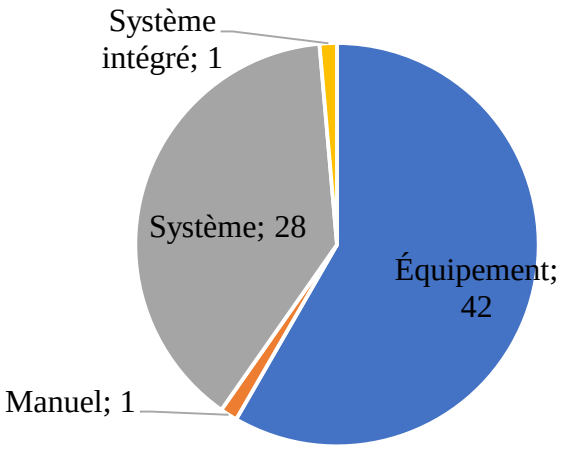


Figure 2.4 : Statistiques sur l'intégration de la manutention et de l'entreposage

Tableau 2.1 : Buts ou problèmes abordés en sélection des ÉME, méthodes, et applications

Littérature	**Buts ou problèmes abordés**			**Méthodes de base**	**Application**
	Installation	**Unité de charge**	**Niveau d'intégration de ME**		
Frazelle (1985)	Ma	G	SME	WET, AHP	Cas de reconception de SME pour une compagnie de l'industrie électronique.
Hassan, Hogg et Smith (1985)	Ma	G	ÉME	IP	Quatre exemples de sélection des ÉME empruntés de Webster (1969).
Malmborg, Simons et Agee (1986)	-	-	-	ES	Description du potentiel du SE pour la sélection des ÉME.
Shelton et Jones (1987)	G	G	ÉMEA	MAVF	Exemple illustratif.
Fisher, Farber et Kay (1988)	Ma	G	ÉME	ES	Exemple illustratif sur un centre de courrier en vrac.
Gabbert et Brown (1988)	Ma	G	SME	ES	Cas de reconception de SME pour General Electric.
Gabbert et Brown (1989)	Ma	G	SME	ES	Cas de reconception de SME pour General Electric.
Hosni (1989)	Ma	G	ÉME	ES	Exemple d'exécution du SE.
Liang, Dutta et Abdou (1989)	Ma	G	ÉME	F	Exemple illustratif.
Malmborg et al. (1989)	G	G	ÉME	ES	Description et consultation du SE.
Reza Ziai et Sule (1989)	Ma	G	SME	IP	Description et consultation de modèle.
Castleberry (1990)	G	G	ÉMEA	F	Exemple d'analyse pour la sélection de SVGA.
Kouvelis et Lee (1990)	IMS	G	SME	F, MP	Exemple d'exécution de la procédure de sélection et du modèle.
Matson, Swaminathan et Mellichamp (1990)	Ma	G	ÉME	ES	Description du SE.
Trevino et al. (1991)	E	CP	SME	ES	Exemple d'exécution du SE.
Attia, Hosny, Ramu et Chawla (1992)	Ma	G	ÉME	ES	Description et consultation du SE.
Bookbinder et Gervais (1992)	E, Ma	G	ÉME	ES	Exemple d'exécution du SE.
Matson, Mellichamph et Swaminathan (1992)	Ma	G	ÉME	ES	Description et consultation du SE.
Velury et Kennedy (1992)	G	V	SME	F, MIP	Exemple de reconception de SME pour une centrale électrique au charbon.
Noble et Tanchoco (1993a)	Ma	G	SME	F, ES, MIP, Sim	Exemple illustratif.
Noble et Tanchoco (1993b)	Ma	G	SME	F, ES, MIP, Sim	Cas de sélection et spécification de SME pour un atelier multigamme.

Tableau 2.1 : Buts ou problèmes abordés en sélection des ÉME, méthodes, et applications (suite)

Littérature	Buts ou problèmes abordés			Méthodes de base	Application
	Installation	Unité de charge	Niveau d'intégration de ME		
Chu et al. (1995)	Ma	G	ÉME	CP	Cas de sélection des ÉME pour un atelier de montage.
Welgama et Gibson (1995)	Ma	G	SME	KBS, IP	Exemple illustratif numérique.
Park (1996)	Ma	G	ÉME	ES, AHP, Sim	Exemple d'exécution du système.
Kim et Eom (1997)	EAI	G	SMEI	ES	Description et consultation du SE.
Noble et al. (1998)	Ma	G	SME	NLP	Deux exemples illustratifs.
Braglia, Gabbrielli et Miconi (2001)	CMS	G	ÉME	AHP, IP	Cas de sélection des ÉME pour une compagnie de l'industrie automobile.
Chan et al. (2001)	Ma	G	ÉME	ES, AHP	Exemple de sélection des ÉME pour un fabricant de meubles.
Sharp et al. (2001)	Ma	G	ÉME	QT	Description et consultation de la procédure de sélection.
Yaman (2001)	Ma	G	SME	KBS	Cas de reconception de SME pour une usine.
Chan (2002)	Ma	G	ÉME	ES, AHP	Exemple de sélection des ÉME pour un fabricant de meubles.
De Lit, L'Eglise, Danloy, Rekiek et Delchambre (2002)	AL	G	SME	PROMETHE II	Trois cas de sélection de SME.
Deb, S. K., Bhattacharyya et Sorkhel (2002)	Ma	G	ÉME	FMCDM	Exemple illustratif.
Paulo et al. (2002)	FMS	G	SME	IP	Exemple illustratif.
Deb, S., Bhattacharyya et Sorhkel (2003)	Ma	G	SME	KBS, HO	Exemple illustratif.
Fonseca, Uppal et Greene (2004)	G	G	ÉME	ES	Cas de sélection des ÉME pour Lambert Inc. et Vardhmann Acrylics.
Kulak, Satoglu et Durmusoglu (2004)	Ma	G	ÉME	ES, FIA	Exemple de sélection des ÉME pour une compagnie de l'industrie du textile.
Lashkari et al. (2004)	CMS	G	SME	IP	Exemple illustratif.
Cho et Egbelu (2005)	Ma	G	SME	KBS, FL	Exemple illustratif.
Kulak (2005)	Ma	G	ÉME	ES, FIA	Exemple de sélection des ÉME pour une compagnie de l'industrie du textile.
Chakraborty et Banik (2006)	Ma	G	ÉME	AHP	Exemple illustratif.
Rahman et al. (2007)	FMS	G	SMEA	KBS	Exemple illustratif.
Sujono et Lashkari (2007)	FMS	G	SME	IP	Exemple illustratif emprunté de la littérature (Paulo et al., 2002)
Mirhosseyni et Webb (2009)	Ma	G	SME	FES, GA	Cas de conception de SME pour un site de production.
Onut, Kara et Mert (2009)	Ma	G	ÉME	FANP, FTOPSIS	Cas de sélection des ÉME pour un fabricant d'acier.
Raman et al. (2009)	Ma	G	SME	QT	Exemple illustratif.
Hassan (2010)	Ma, E	G	ÉME	F	Exemple de sélection des ÉME empruntée de la littérature (Maloney, 2002) (industrie pharmaceutique).
Tuzkaya et al. (2010)	Ma, E	G	ÉME	FANP, FPROMETHEE	Cas de sélection des ÉME pour l'entrepôt d'un fabricant de tracteurs.
Athawale et Chakraborty (2011)	Ma	G	ÉME	ELECTRE II	Exemples illustratifs empruntés de la littérature (Komljenovic & Kecojevic, 2009; Kulak, 2005)
Mahdavi, Shirazi et Sahebjamnia (2011)	FMS	G	SME	CAS^2O	Exemple illustratif emprunté de la littérature (Chan & Swarnkar, 2006).
Maniya et Bhatt (2011)	Ma	G	ÉMEA	AHP, M-GRA	Exemple illustratif.
Matt et al. (2011)	Ma	CLL	SME	AD	Exemple de conception de SME pour un fabricant de verres.
Momani et Ahmed (2011)	Ma	G	ÉME	MC, AHP	Cas de sélection des ÉME pour une industrie pharmaceutique.
Poon et al. (2011)	Ma, E	G	ÉME	RFID-GA	Trois cas expérimentaux pour un site de production.
Sawant, Mohite et Patil (2011)	Ma	G	ÉMEA	PSI, TOPSIS	Exemple de sélection des ÉME pour une usine.
Karande et Chakraborty (2013)	Ma	G	ÉME	WUTA	Exemple illustratif emprunté de la littérature (Kulak, 2005).
Rossi et al. (2013)	Ma, E	G	MMH	AHP	Cas avec un équipement manipulateur Liftronic®_ EASY E80 INDEVA.
Sawant et Mohite (2013)	Ma	G	ÉMEA	TOPSIS, AHP, FL	Exemple illustratif.
Telek (2013)	Ma	G	SME	MF	Description de la formule mathématique.
Ahmed et Lam (2014)	Ma	G	ÉME	MAUT, MC	Cas de sélection des ÉME pour une industrie pharmaceutique.
Mousavi, Vahdani, Tavakkoli-Moghaddam et Tajik (2014)	Ma	G	ÉME	FGRA, VIKOR	Exemple illustratif emprunté de la littérature (Kulak, 2005).
Ustundag (2014)	Ma	G	SME	FLP	Exemple illustratif emprunté de la littérature (Heragu, 2008).
Bauters et al. (2015)	IAu	V, K	TS	Sim	Cas de sélection de SME pour une compagnie de l'industrie automobile.

Tableau 2.1 : Buts ou problèmes abordés en sélection des ÉME, méthodes, et applications (suite et fin)

Littérature	Buts ou problèmes abordés			Méthodes de base	Application
	Installation	Unité de charge	Niveau d'intégration de ME		
Hadi-Vencheh et Mohamadghasemi (2015)	Ma	G	ÉME	FWA, FVIKOR	Cas de sélection des ÉME pour centre de production.
Khandekar et Chakraborty (2015)	Ma	G	ÉME	FAD	Exemples illustratifs empruntés de la littérature (Lashgari et al., 2012; Sawant & Mohite, 2013)
Ahmed Bouh et Riopel (2016b)	E	CP	SME	KBS, FTOPSIS	Exemple illustratif.
Chakraborty et Prasad (2016)	Ma	G	ÉME	QFD, ES	Deux exemples illustratifs.
Jiamruangjarus et Naenna (2016)	G	G	ÉME	ANP, BOCR	Exemple illustratif.
Nguyen et al. (2016)	FMC	G	ÉME	FAHP, FARAS	Cas de sélection des ÉME pour un laboratoire FMC d'une université.
Ahmed Bouh et Riopel (2017a)	I 4.0, L 4.0	G	ÉME	-	Description des défis du 4.0 pour la sélection des ÉME.
Ahmed Bouh et Riopel (2017c)	Ma, E	P, C	ÉME	KBS, AHP	Exemple illustratif.
Varun et al. (2017)	ISI	G	ÉME	AHP	Cas de sélection des ÉME pour JSW Steel Ltd.
Yilmaz et al. (2017)	KS, MRS	G	SME	FANP	Cas de sélection de SME pour une usine d'assemblage électronique.

2.4 Données d'entrée

2.4.1 Équipements de manutention

2.4.1.1 Définitions

Différentes classifications des ÉME existent dans la littérature (Chu et al., 1995; Tompkins et al., 1996; Ward, 1986). Kay (2012) classifie les ÉME en cinq grandes catégories : équipements de transport, équipements de positionnement, équipements de formation d'unité de charge, équipement d'entreposage, et équipement de contrôle et identification. Au sein de ces catégories, il apparait des classes et des types de ÉME.

Hassan (2010) et Hassan (2014) fournissent une forme de classification des ÉME organisée en trois niveaux : catégorie, classe et type. Selon Hassan (2010), une catégorie fait référence à un groupe d'équipements ayant la même fonction comme la fonction transfert et la fonction entreposage. Une classe se réfère à un groupe d'équipements dans une catégorie. Les classes réalisent différemment la même fonction de leur catégorie. Par exemple, les convoyeurs/transporteurs et les camions sont des classes dans la catégorie des transferts. Un type fait référence à un groupe d'équipements dans une classe ayant des caractéristiques et des capacités différentes d'un autre membre de la même classe. Par exemple, les convoyeurs à bande et les convoyeurs à rouleaux sont des types à l'intérieur de la classe des convoyeurs.

La structure de Hassan (2010) reflète la divergence existante dans la définition du concept de manutention. Les équipements d'entreposage sont considérés comme des matériels de manutention avec d'autres fonctions. Dans cette sous-section, seulement les équipements de manutention sont analysés.

Fonseca, Uppal et Greene (2004) organisent eux aussi les équipements de manutention en trois niveaux : catégorie, groupe et type. Dans leur article, les auteurs traitent seulement les équipements de manutention de matériaux et plus spécifiquement les convoyeurs/transporteurs. Il existe deux catégories de convoyeurs/transporteurs : les convoyeurs/transporteurs pour les charges isolées et les convoyeurs/transporteurs pour les charges en vrac. Les termes catégorie, groupe et type ne sont pas clairement définis dans l'article. Il est mentionné que dans une catégorie il y a des groupes et dans un groupe il y a des types.

Les équipements de manutention traités dans les articles de la littérature peuvent être rassemblés en sept groupes définis dans le Tableau 2. Selon les structures des équipements de manutention décrits précédemment, les sept groupes correspondent au deuxième niveau des classes Hassan (2014) et au premier niveau des catégories de Fonseca et al. (2004). Nous gardons alors l'appellation catégories d'équipements de manutention. Les listes des équipements de manutention fournies par la plupart des articles de la revue sont de types d'équipements selon la structure de Hassan (2014).

Tableau 2.2 : Description des catégories des équipements de manutention

Nom	**Description**	**Source**
Convoyeurs / transporteurs pour charges isolées (CTCI)	« Appareils de manutention continue dont les structures reposent généralement sur le sol et qui effectuent le déplacement des charges isolées principalement à l'aide de rouleaux, de galets, d'une courroie ou d'une bande sans fin, de chaînes, de l'air, de vis sans fin ou d'une hélice. Les transporteurs peuvent être en circuit ouvert. Les termes transporteur et convoyeur sont souvent pris l'un pour l'autre, mais ils ne sont pas synonymes. En effet, la structure du convoyeur est généralement aérienne : il sert au déplacement de charges au-dessus du sol à l'aide d'une série de petits chariots circulant le long d'une voie, tous ces chariots étant directement rendus solidaires au moyen d'une chaîne ou d'un câble qui leur communique le mouvement. Les charges à manutentionner sont suspendues aux chariots directement par des crochets ou des pinces, ou par l'intermédiaire de plateaux, de balancelles ou de tout autre dispositif destiné à suspendre une charge. Un tel dispositif fonctionne toujours en circuit fermé. Cette catégorie d'appareils en comprend également d'autres qui utilisent la technique des convoyeurs à chaîne, tel le convoyeur au sol tracteur de chariots, dont la structure n'est pas aérienne. Malgré toutes ces considérations, l'usage actuel tend à vouloir consacrer le terme convoyeur pour désigner ces deux réalités »	Institute of Industrial Engineers (2000); Riopel et Croteau (2013)
Convoyeurs / transporteurs pour charges en vrac (CTCV)	Ces équipements ont la même définition que les transporteurs/convoyeurs pour charge isolée sauf que les produits manutentionnés sont en vrac	Institute of Industrial Engineers (2000); Riopel et Croteau (2013)
Appareils de levage (AL)	« Appareils capables d'exercer sur une charge une traction ou une poussée de bas en haut dans un plan vertical ou presque, et de pouvoir éventuellement la déplacer d'un emplacement à un autre »	Institute of Industrial Engineers (2000); Riopel et Croteau (2013)
Chariots de manutention (CM)	« Appareils manuels ou motorisés qui permettent de manutentionner des charges. Ils regroupent les chariots manuels (ex. : diable, gerbeur manuel, transpalette manuel, transplateforme manuelle) et les chariots motorisés (ex. : chariot élévateur, gerbeur motorisé, transpalette motorisé, transplateforme motorisée »	Institute of Industrial Engineers (2000); Riopel et Croteau (2013)

Tableau 2.2 : Description des catégories des équipements de manutention (suite et fin)

Nom	**Description**	**Source**
Systèmes de véhicules à guidage automatique (SVGA)	« Véhicules sans conducteur qui se déplacent dans les installations en suivant une trajectoire prédéterminée et qui servent à manutentionner du matériel, des outils ou tout autre objet. Le déplacement des véhicules dans les installations est assuré par un système de communication et un système de guidage qui font appel à l'informatique embarquée »	Institute of Industrial Engineers (2000); Riopel et Croteau (2013)
Robots de manutention (R)	« Robots manipulateurs industriels dont les caractéristiques techniques et les organes terminaux effecteurs font qu'ils peuvent être affectés à des tâches qui impliquent la saisie et le déplacement d'objets sur de courtes distances »	Institute of Industrial Engineers (2000); Riopel et Croteau (2013)
Equipments de canalisation (ÉC)	« Tuyauteries dans lesquelles circule un fluide »	Public Works and Government Services Canada (2015)

2.4.1.2 Harmonisation

Chaque article utilise une classification des équipements de manutention spécifique. Un processus d'harmonisation a été nécessaire pour pouvoir faire les analyses et les statistiques. Il a été possible de passer de toutes les différentes classifications des équipements de manutention à une seule avec sept groupes. Les sept groupes sont les catégories d'équipements définies précédemment. Chaque catégorie est divisée en classes. Chaque classe comporte des types et sous les types il y aurait des modèles. Les modèles ne sont pas pris en compte dans cette recherche. La sélection est faite entre les types des équipements de manutention. Certains articles n'ont pas précisé les équipements de manutention traités et d'autres ne les ont pas classés ou disposent plusieurs groupes.

La première partie de l'ANNEXE B présente le processus d'harmonisation. Des exemples types d'harmonisation avec des articles représentatifs sont présentés. La première colonne contient les numéros des articles selon l'ANNEXE A. La deuxième colonne contient le nom des groupes et le nombre d'équipements de manutention pour chaque groupe. Les mêmes noms utilisés dans les articles sont conservés. Les acronymes des catégories des équipements du Tableau 2.2 sont utilisés. Lorsque les données ne sont pas claires ou manquantes, une description est fournie. La troisième colonne divisée en sept sous-colonnes présente les équipements de manutention sous la nouvelle classification d'harmonisation. La quatrième colonne contient des remarques décrivant les

changements. Lorsqu'il est écrit entre parenthèses (4 à 4 par exemple), cela signifie que le nombre d'équipements initialement mentionné dans l'article respectif était de 4 et notre classification tient également compte de tous les 4 équipements, donc pas de changements. Lorsqu'un changement est apporté, le numéro peut changer dans la nouvelle classification, par exemple "Modifications (50 à 51)". La raison du changement est expliquée. Dans cet exemple, les deux équipements « Potence » et « Portique » ont été spécifiés ensemble comme étant un seul type d'équipement de manutention. Les deux types sont différents comme précisé dans (Cho & Egbelu, 2005). Dans la nouvelle classification, au lieu de 50 types de matériel de manutention, nous considérons 51 types.

2.4.1.3 Statistiques

À partir des données qui ont pu être récoltées sur les articles, l'ANNEXE C fournit en détail les informations sur les équipements de manutention et le nombre de fois que chaque équipement est traité dans la littérature. Chaque catégorie porte un nom de groupe et ses types d'équipements de manutention sont classés par ordre alphabétique. Chaque type d'équipement de manutention est associé à un acronyme avec un numéro. Les noms des équipements sont gardés en Anglais tels qu'ils sont mentionnés par les auteurs. Il n'a pas été possible de traduire tous les termes par manque de traductions reconnues disponibles. Une bonne partie des termes est traduite par Riopel et Croteau (2013) et Office québécois de la langue française (2012).

- Dépendamment des articles, certains noms des types d'équipements de manutention sont plus précis que d'autres. Par exemple, le « Flat top chain conveyor » et le « Powered belt conveyor » sont plus spécifiques que le « Chain conveyor ». Nous les appelons des types d'équipements moins précis. Ceux que nous avons pu identifier sont écrits en italique.
- Lorsque le nom est écrit en gras, cela signifie que c'est un nom de catégorie d'équipements. Par exemple, Malmborg et al. (1989) considèrent un « SVGA », mais ne précisent pas le type d'équipement de manutention.
- Parfois, un type d'équipement de manutention est nommé avec différentes appellations dans les articles. Ils seraient des synonymes. Par exemple, le « AGV towing vehicle » (Tompkins et al., 2010) devient « Tractor AGV », « Tractor train AGV », et « Tugged AGV ». Ceux que nous avons pu identifier sont surlignés en gris.

- Certaines variantes orthographiques apparaissent dans certains noms des types. Une harmonisation a été effectuée. Par exemple, l'équipement « Tugger AGV » est appelé dans certains articles « Tugged AGV ».

Les résultats de l'ANNEXE C sont présentés dans les statistiques du Tableau 2.3. Le total de 231 équipements de manutention ne représente pas seulement des types d'équipements. Il s'agit de la somme des sept listes comprenant les synonymes (8), les catégories d'équipement (4), les types d'équipement de manutention moins précis (20). Il apparait que la plupart des types d'équipements (127/231) sont traités une seule fois. Cela signifie que les chercheurs utilisent des données différentes ou des données personnalisées. Les CM sont les plus traités dans les articles (81/231). Les CTCV (33/33) sont traités uniquement par Fonseca et al. (2004). Park (1996) a ajouté la catégorie des ÉC pour la première fois sans spécifier un type d'équipement de manutention.

Tableau 2.3 : Statistiques des types d'équipements de manutention des articles

Nombre de fois traité	**CTCI**	**CTCV**	**AL**	**CM**	**SVGA**	**R**	**ÉC**	**Total**
+10 fois	5	0	3	0	0	0	0	**8**
5 – 9 fois	10	0	1	7	4	3	0	**25**
2 – 4 fois	20	0	7	31	10	3	0	**71**
1 fois	24	33	11	43	11	4	1	**127**
Total	**59**	**33**	**22**	**81**	**25**	**10**	**1**	**231**

2.4.2 Équipements d'entreposage

2.4.2.1 Définitions

Selon les taxonomies et classifications citées plus haut, les équipements d'entreposage sont cités comme étant une famille des équipements de manutention « material handling equipment ». (Chan et al., 2001; Cho & Egbelu, 2005; Chu et al., 1995; Kulak, 2005; Park, 1996; Ustundag, 2014). C'est le résultat de la divergence entre les intervenants du domaine concernant la définition du concept de manutention comme expliqué ci-dessus. Trevino et al. (1991) et Kim et Eom (1997) traitent le problème de sélection des équipements de manutention couplés à des équipements d'entreposage.

Les équipements d'entreposage traités dans les articles pourraient être organisés en quatre catégories. Il n'a pas été nécessaire de les harmoniser de la même manière que les équipements de

manutention d'ANNEXE C puisqu'ils ne sont pas nombreux. Le Tableau 2.4 présente leurs descriptions.

Tableau 2.4 : Description des catégories d'équipements d'entreposage

Nom	**Description**	**Source**
Palettiers (Pa)	« Équipements d'entreposage dont la structure est constituée principalement d'échelles et de lisses, et destinée à recevoir des charges généralement palettisées. Il existe deux classes de palettiers : les palettiers statiques et les palettiers dynamiques. »	Institute of Industrial Engineers (2000); Riopel et Croteau (2013)
Systèmes d'entreposage de charge en vrac (SECV)	Systèmes d'entreposage ouverts ou fermés destinés aux produits en vrac qui peuvent être sous forme liquide ou solide.	Tompkins et Smith (1998)
Systèmes d'entreposage automatisés (AS/RS)	« Systèmes d'entreposage dans lesquels la pose et le retrait des charges sont automatisés. Un transtockeur peut être utilisé. »	Institute of Industrial Engineers (2000); Riopel et Croteau (2013)
Autres systèmes d'entreposage (ASE)	Systèmes d'entreposage autres que les trois groupes mentionnés.	Auteurs

2.4.2.2 Statistiques

À partir des données qui ont pu être récoltées sur les articles, l'ANNEXE D présente en détail les équipements d'entreposage et le nombre de fois que chaque équipement est traité dans la littérature. Les résultats de l'ANNEXE D sont résumés dans les statistiques présentées au Tableau 2.5. Il apparait que 39 types d'équipement d'entreposage sur un total de 52 sont traités une seule fois. Dix autres sont traités entre deux et quatre fois. Seulement trois types sont traités entre cinq et neuf fois et aucun type n'a été traité plus de dix fois.

Tableau 2.5 : Statistiques des types d'équipements d'entreposage des articles

Nombre de fois traité	Pa	SEV	AS/RS	ASE	Total
+10 fois	0	0	0	0	**0**
5 – 9 fois	1	0	2	0	**3**
2 – 4 fois	2	0	2	6	**10**
1 fois	18	3	6	12	**39**
Total	**21**	**3**	**10**	**18**	**52**

2.4.3 Caractéristiques

2.4.3.1 Définitions

Afin de sélectionner le type d'équipement de manutention ou d'entreposage approprié, il convient d'analyser un ensemble de données relatives à l'unité de charge à manutentionner, le mouvement de transfert ou d'entreposage à faire, l'équipement recherché et le contexte ou l'environnement de travail. Les données sont appelées « caractéristiques » ou « attributes » en anglais. Il s'agit de variables indiquant si l'équipement est adapté ou pas à l'opération de manutention ou d'entreposage.

2.4.3.2 Harmonisation

Dans les articles de cette revue de littérature, les caractéristiques sont regroupées en plusieurs groupes. Les noms de ces groupes sont : charge, produit, mouvement, équipement, zone, infrastructure, stratégique, technique, opérationnel, monétaire, méthode, opération, général, traitement des données, direct, inféré et direct / inféré. En analysant les caractéristiques rassemblées dans les groupes, il apparait que les auteurs auraient adopté différentes expressions pour signifier la même réalité. Il apparait également que des caractéristiques sont placées dans différents groupes d'un article à un autre.

Parmi toutes les appellations données aux groupes de caractéristiques par les auteurs, une classification adaptée serait de les rassembler dans quatre groupes seulement. Cette proposition est inspirée des travaux de Apple (1977) et de Muther et Haganäs (1969). Les quatre groupes de caractéristiques sont : unité de charge (UC), mouvement (Mo), équipement (É) et milieu (Mi). Ils contiennent respectivement des variables permettant de déterminer les caractéristiques de la charge unitaire, du mouvement de manutention requis, de l'équipement recherché et de l'environnement de travail. Les valeurs prises par les caractéristiques peuvent être simples comme « oui » ou « non », ou des quantités avec des unités de mesure (kg, mètre, etc.). Elles peuvent également être plus

complexes en utilisant le langage humain (bas, moyen, élevé, fort, incliné, etc.). La complexité réside dans les expressions humaines vagues. Généralement, lorsque le problème concerne la sélection d'un modèle d'équipement d'un type d'équipement, les articles utilisent certains critères de décision.

Les caractéristiques utilisées pour demander si l'utilisateur veut sélectionner soit un équipement d'entreposage, soit un équipement de positionnement, soit un équipement de manutention sont négligées. Nous distinguons le problème de sélection des équipements de manutention et le problème de sélection des équipements d'entreposage. Lorsqu'une caractéristique est répétée dans un article, elle est comptée une seule fois. Par exemple, Chan et al. (2001) mentionnent deux à trois fois la même caractéristique, tels que les « Material type for storage/retrieval », « Material type for truck », et « Material type for AGV ». Ces trois caractéristiques sont simplement appelées « Material type ». En supprimant les redondances, il n'y a pas 36 caractéristiques, mais seulement 27 caractéristiques selon notre analyse dans l'article de Chan et al. (2001).

Dans certains cas, les noms de certaines caractéristiques ne correspondent pas à leurs valeurs. Afin de les harmoniser, leurs noms sont changés et prennent les mêmes noms utilisés par la majorité. C'est le cas par exemple de la caractéristique « Move type » de (Cho & Egbelu, 2005). Selon ses valeurs (horizontal, inclined, rotational), elle est spécifiée en tant que « Move direction » dans la classification en quatre groupes.

Parfois, la même caractéristique avec les mêmes valeurs est appelée différemment dans les articles et un nom commun est utilisé. Par exemple, la caractéristique « Acquisition cost » est considérée dans douze articles et la caractéristique « Operation cost » est considérée dans neuf articles. Ahmed et Lam (2014) adoptent les appellations « Fixed cost » pour désigner « Acquisition cost » et « Variable cost » pour désigner « Operation cost ».

Certaines caractéristiques sont renommées pour plus de clarté. Par exemple, la caractéristique « Storage » de Kim et Eom (1997) et la caractéristique « Interface » de Fisher et al. (1988) permettent de poser la même question : le mouvement des charges implique-t-il le déplacement direct des charges vers / à partir d'un système d'entreposage ? (Oui ou non). Le nouveau nom harmonisé attribué devient « From/To storage zone » pour ces deux articles.

Les caractéristiques utilisées pour les équipements d'entreposage sont presque les mêmes que ceux des équipements de manutention. Par exemple, dans trois articles (Chan et al., 2001; Chu et al.,

1995; Kulak, 2005), on considère la caractéristique « Inventory turnover method (FIFO, LIFO) ». Les différences apparaissent principalement dans les caractéristiques du groupe équipement et du groupe mouvement. Les questions posées à l'utilisateur changent également. Lors du choix d'un type d'équipement de manutention, la question est de savoir combien de charges unitaires doivent être déplacées par unité de temps. Dans la sélection de types d'équipements d'entreposage, il s'agit de combien de charges unitaires doivent être entreposées par unité de temps. Par conséquent, le système devrait être capable de poser les bonnes questions. Certaines caractéristiques supplémentaires sont utilisées lors de la sélection d'un équipement d'entreposage comme précisé dans le Tableau 2.6. Un groupe nommé spécifique aux équipements d'entreposage (SÉE) est ajouté. Il existe aussi d'autres données et caractéristiques qui pourraient être utilisées dans le problème de la sélection des équipements de manutention et d'entreposage.

La deuxième partie de l'ANNEXE B présente des exemples types du processus d'harmonisation des caractéristiques avec les classifications des articles et la nouvelle classification pour faciliter l'analyse.

2.4.3.3 Statistiques

À partir des données qui ont pu être récoltées des articles, l'ANNEXE E présente en détail les caractéristiques et le nombre de fois que chaque caractéristique est considérée dans cette revue de littérature.

Les résultats de l'ANNEXE E sont résumés dans les statistiques du Tableau 2.6. Il apparait que 271 caractéristiques sont qualifiées dans les articles. Quatorze caractéristiques sont prises en compte plus de dix fois. La majorité des caractéristiques (173/271) est mentionnée par un seul article. Les chercheurs ne traitent pas exactement des cas similaires. Certains d'entre eux ont proposé des méthodologies de sélection pour des entreprises, particulièrement du secteur industriel. D'autres se sont limités sur le traitement de certaines catégories d'équipements comme les convoyeurs.

Tableau 2.6 : Statistiques des caractéristiques de sélection

Spécifiées	UC	Mo	É	Mi	SÉE	Total
+10 fois	4	7	3	0	0	**14**
5 – 9 fois	5	8	6	2	0	**21**
2 – 4 fois	5	14	41	3	1	**63**
1 fois	17	34	107	15	2	**173**
Total	**31**	**63**	**157**	**20**	**3**	**271**

2.4.4 Sommaire des données d'entrée

L'ANNEXE F présente un résumé et une vue globale des données sur les équipements et des caractéristiques. Il présente un schéma comparatif des données des articles (catégories des équipements de manutention, catégories des équipements d'entreposage et caractéristiques). La première colonne classifie les articles en trois groupes de formes de données. Le premier groupe présente les données sous forme de données de base pour les systèmes de sélection développés (31 articles). Le deuxième groupe présente les données dans leurs exemples illustratifs (33 articles). Le troisième groupe dispose d'autres formes de données (10 articles). Chaque groupe est ordonné à partir du plus ancien article au plus récent.

Le premier groupe dispose de données précises spécifiées. Le plus grand nombre de types d'équipements de manutention seraient entre 50 et 60 jusqu'à aujourd'hui. Le deuxième groupe fournit des exemples d'application. Les données sont précisément définies pour l'étude de cas. La sélection se fait majoritairement entre des équipements indéfinis (par exemple de A1 à A8 avec A pour alternative ou possibilité). Dans le troisième groupe, les informations sur les équipements ne sont pas fournies et parfois les articles décrivent seulement certaines caractéristiques.

Les résultats de cette analyse sont discutés dans la section 2.8 Discussion du chapitre.

2.5 Méthodes

Cette section vise à analyser les méthodes de base utilisées dans le domaine de sélection des ÉME et comparer avec les méthodes de sélection d'un autre domaine « la sélection de fournisseurs ». Chai, Liu et Ngai (2013) proposent une revue de littérature des méthodes de sélection de fournisseurs. Ces auteurs ont sélectionné 123 articles publiés entre 2008 et 2012 et analysent environ 34 méthodes (indépendantes et intégrées) recensées dans ces articles. Ils les ont classés en quatre catégories : programmation mathématique (PM), intelligence artificielle (IA), méthodes

d'aide à la décision multicritère (MADM), et autres (A). Une cinquième catégorie qui est simulation (Sim) peut être ajoutée. Nous essayons d'identifier quelles sont les méthodes qui ne sont pas encore exploitées dans la recherche des problèmes de sélection des ÉME (Tableau 2.7 et Figure 2.5). Nous essayons de même d'analyser leur potentiel éventuel.

Les sous-sections suivantes présentent chacune principalement deux paragraphes décrivant respectivement les faits saillants dans chaque catégorie de méthodes et les méthodes inspirées par la comparaison. Des descriptions additionnelles et des références sur les méthodes pourraient être obtenues dans ladite revue de Chai et al. (2013).

Tableau 2.7 : Méthodes déjà utilisées et méthodes potentielles

Déjà utilisées	**Potentielles**
Programmation mathématique (PM)	
• Integer programming (Integer linear programming) (IP) • Linear programming (LP) • Non-linear programming (NLP) • Mixed integer programming (MIP) • Multi-objective linear programming (MOLP) • Chaotic ant swarm simulation-based optimization (CAS2O) • Heuristic optimization (HO) • Mathematical function (MF) • Fuzzy linear programming (FLP)	
Intelligence artificial (IA)	
• Expert System (ES) • Knowledge-based system (KBS) • Fuzzy genetic algorithms (FGA)	• Grey system theory (GST) • Neural networks (NN) • Rough set theory (RST) • Bayesian networks (BN) • Decision tree (DT) • Case-based reasoning (CBR) • Particle swarm optimization (PSO) • Support vector machine (SVM) • Association rule (AR) • Ant colony algorithm (ACA) • Dempster shafer theory of evidence (DST)

Tableau 2.7 : Méthodes déjà utilisées et méthodes potentielles (suite et fin)

Méthodes d'aide à la décision multicritère (MADM)	
• Analytical hierarchy process (AHP) • Elimination and et choice translating reality (ELECTRE II) • Multi-attribute utility theory (MAUT) • Multi-attribute value function (MAVF) • Modified grey relational analysis (M-GRA) • Preference selection index (PSI) • Preference Ranking Organization method for Enrichment Evaluation II (FPROMETHEE II) • Multi-criteria optimization and compromise solution (VIKOR) • Weighted evaluation technique (WET) • Weighted utility additive (WUTA) • Fuzzy axiomatic design (FAD) • Fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) • Fuzzy analytic network process (FANP) • Fuzzy additive ratio assessment (FARAS) • Fuzzy grey relational analysis (FGRA) • Fuzzy information axiom (FIA) • Fuzzy Preference Ranking Organization method for Enrichment Evaluation (FPROMETHEE) • Fuzzy technique for order preference by similarity to ideal solution (FTOPSIS) • Fuzzy weighted average (FWA)	• Decision-making trial and evaluation laboratory (DEMATEL) • Simple multi-attribute rating technique (SMART)
Simulation	
• Simulation (Sim)	
Autres	
• Framework (F) • Quality function deployment (QFD) • Benefits, opportunities, costs and risks model (BOCR) • Computer program (CP) • Monte Carlo simulation (MC) • Queueing theory (QT)	• Preference relations (PR) • Adaptive resonance theory (ART) • Integral (I) • Strengths, weaknesses, opportunities, and threats (SWOT)

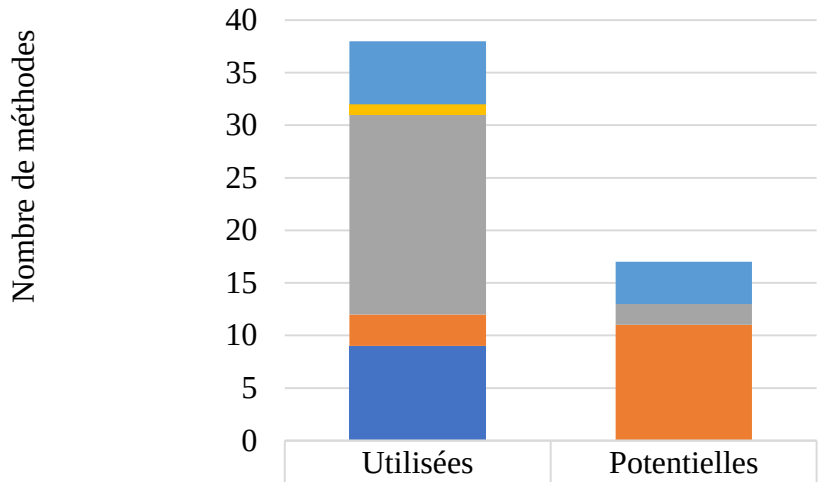
2.5.1 Programmation mathématique (PM)

Hassan et al. (1985) modélisent mathématiquement (IP) le problème de sélection des équipements de manutention en minimisant les coûts d'opération et d'investissement des équipements. L'algorithme a été exécuté sur 4 exemples fournis par Webster (1969). Les auteurs affirment que les résultats sont meilleurs en matière de temps d'exécution et de performance. Reza Ziai et Sule (1989) ont contacté le Material Handling Institute (MHI) et Modern Material Handling (MMH) pour avoir de l'information sur les ÉME et leurs sélections. Ils décrivent le cas des convoyeurs et chariots élévateurs à fourche en fournissant des indications sur les sélections selon des facteurs. Ils proposent aussi un modèle mathématique ILP de sélection des ÉME qui minimise les coûts et tient compte des autres paramètres (caractéristiques des équipements) et de la quantité d'équipements.

Il détermine le nombre de convoyeurs et de chariots nécessaires pour un SME. L'article de Velury et Kennedy (1992) présente un modèle mathématique permettant de faire la sélection des équipements de manutention pour les produits en vrac. La démarche proposée utilise la programmation MIP et tient compte des critères économiques et environnementaux en plus des contraintes des produits, du milieu et des équipements. Le modèle d'optimisation minimise les coûts fixes et variables de manutention et le coût de transport. Les moyens d'entreposage sont supposés définis et il reste à choisir les équipements de transport et de manutention. Le modèle tient compte par ailleurs dans la résolution des facteurs de compatibilité de l'équipement avec les autres ainsi que sa capacité, la demande, et le budget. Welgama et Gibson (1995) font une combinaison de trois approches à savoir : le système expert qui implique une base de connaissances, l'optimisation mathématique, et l'approche systémique qui considère, au-delà de la sélection d'équipements pour un mouvement donné, le système de manutention en entier. Ce dernier principe permet de mieux voir le problème et cherche à réduire les coûts totaux au lieu de considérer individuellement chaque équipement. Une modélisation mathématique du problème de sélection du système de manutention est proposée en tenant compte des coûts d'opération et d'investissement des équipements ainsi que les exigences d'espace d'allées. Un algorithme de résolution à neuf étapes utilisant les connaissances tacites du système expert est adopté. Noble et al. (1998) propose dans son exemple d'application après plusieurs itérations neuf types de ÉME qui sont combinés pour constituer un SME. Trois combinaisons sont évaluées dans l'exercice selon entre autres les valeurs des fonctions objectifs du modèle NLP qui minimise les coûts capitaux et opérationnels ainsi que les interfaces. Une recherche tabou est utilisée. Telek (2013) propose une méthode de présélection d'équipements applicable à tous les systèmes de manutention, peu importe leur degré de complexité. Il rappelle aussi le manque d'une méthode universelle de conception de système de manutention. La démarche proposée est une formule mathématique (FM) permettant de vérifier si l'équipement répond au mieux aux exigences de la tâche de manutention. Ustundag (2014) traite les problèmes de sélection et d'affectation des équipements de manutention dans les usines. Les transferts des matières entre les départements sont modélisés. Le volume et la taille des lots des matières ainsi que le nombre des machines à visiter sont les facteurs décisifs dans ce problème de manutention. Une programmation linéaire floue est utilisée pour modéliser le problème. Cette approche n'est pas nouvelle et d'autres l'ont déjà utilisé comme mentionné par l'auteur. La méthode de Julien (1994) est utilisée avec les données d'un problème hypothétique

emprunté du livre de Heragu (2008) intitulé Facilities design. Le logiciel LINDO 6.1 a servi pour la programmation et l'exécution. Le modèle IP de Sujono et Lashkari (2007) est une extension des travaux de Paulo et al. (2002) et Lashkari et al. (2004). Il résout simultanément les problèmes d'allocation des opérations et la sélection des ÉME dans un FMS. Mahdavi et al. (2011) ont étendu le modèle et résolu avec la méthode CAS^2O. D'autres articles représentent l'incertitude dans les variables avec des variables stochastiques telles que des variables de demande stochastique ou des ensembles flous. Poon et al. (2011) traitent le problème de sélection et d'allocation de ÉME avec une demande de production stochastique. La méthode « Data envelopment analysis » (DEA) est utilisée par Hassan (2014) pour évaluer les entrées et les sorties des systèmes experts conçus pour la sélection des ÉME, mais il ne propose pas de méthode particulière de sélection des ÉME.

Il peut être noté que grâce au développement précoce des méthodes PM, les chercheurs dans les deux domaines de sélection (ÉME et fournisseurs) semblent être familiers avec ces méthodes (Figure 2.5).



	Utilisées	Potentielles
Autres (A)	6	4
Simulation (Sim)	1	0
Méthodes d'aide à la décision multicritère (MADM)	19	2
Intelligence artificial (IA)	3	11
Programmation mathématique (PM)	9	0

Figure 2.5 : Statistiques des méthodes utilisées et potentielles

2.5.2 Intelligence artificielle (IA)

Selon la Figure 2.6, les méthode IA sont utilisées dix-huit fois dans les 74 articles. Les systèmes hybrides combinant deux méthodes ou plus de différentes catégories sont mises en œuvre dans dix-huit articles. Malmborg et al. (1986) examinent le potentiel des systèmes experts (SE) à résoudre les problèmes de sélection des ÉME. Des lignes directrices sur la construction d'une base de connaissance ainsi que le développement du SE, son amélioration, sa validation, et ses limites sont présentées. Le système expert de Fisher et al. (1988) s'appelle MATHES *(MATerial Handling Equipment Selection)*. Il veille à sélectionner un équipement qui est techniquement et économiquement approprié au mouvement des unités de charge. Il utilise quatre types de règles : règles de la matrice des paramètres, règles de la matrice d'incertitude, règles de détermination des paramètres directs et inférés, et règles de sélection d'équipement. Les règles heuristiques de MATHES sont élaborées après consultation d'une seule personne, M. Tompkins en l'occurrence. Gabbert et Brown (1989) proposent un système hybride basé sur la connaissance avec les

techniques de l'intelligence artificielle et des sciences de la décision. Il est conçu pour un centre d'études du groupe General Electric. Malmborg et al. (1989) proposent un autre système expert appelé EXIT *(Expert system for Industrial Trucks)* programmé en Turbo Prolog et exécuté sur un mini-ordinateur. Ce dernier utilise une logique par élimination/sélection qui permet de filtrer les réponses et donne un résultat unique. L'article de Matson et al. (1990) serait l'article de conférence publié avant l'article de revue bonifié contenant plus de détails des mêmes auteurs plus tard (Matson et al., 1992). Ils proposent tous les deux le système expert EXCITE *(EXpert Consultant for In-plat Transport Equipment)*. Il compile les connaissances existantes et cherche à les améliorer afin de sélectionner les équipements de manutention d'une manière plus précise. Ils utilisent les suggestions faites, en matière de règles d'inférence et d'équipements-caractéristiques, dans la littérature publiée : livres (3), articles de journaux scientifiques (3) et magazines (Modern Materials Handling). De ce fait, EXCITE intègre 340 règles. Le langage de programmation utilisé est l'OPS83. Trevino et al. (1991) ont développé un système expert qui fait la sélection et l'évaluation de combinaison de équipements d'entreposage avec des chariots de manutention appelé SITSES. Il est composé de deux modules de quatre étapes chacun. Les auteurs cherchent à adopter des équations mathématiques permettant d'évaluer les configurations de trois implantations. Ils prennent en considération plusieurs facteurs de contraintes qui seront spécifiés par l'utilisation et combinent les solutions de manutention avec les solutions d'entreposage. Le système est programmé en OPS 5 et reconnait huit hypothèses de conception pour trois différents types d'implantation des lieux. L'article de Park (1996) décrit un système intitulé ICMESE *(Intelligent Consultant system for Material handling Equipment Selection and Evaluation)*. Le processus est exécuté sous l'environnement système expert VP-Expert. Sa base de connaissances a été compilée de données de livres, d'articles scientifiques et de magazines. Il regroupe 336 règles de sélection stockées dans la base de connaissances. La base de données est développée en utilisant dBASEIII Plus et la procédure de prise de décision multicritère est programmée avec FORTRAN 77. Des simulateurs permettant de mesurer la performance des équipements sont utilisés. Kim et Eom (1997) proposent un système expert avec des connaissances, des règles et une représentation orientée objet. Par contre, le système est pour l'industrie de l'assemblage électronique, ce qui fait que le choix des équipements et le champ d'application sont déjà réduits. Chan et al. (2001) utilisent dans son système expert 112 règles. Ce dernier ressemble au système ICMESE de Park (1996). Les catégories d'équipements considérés sont au nombre de sept : transporteurs, chariots de

manutention, véhicules autoguidés, convoyeurs, ponts roulants, robots industriels, et transtockeurs. Les outils ART-IM Expert, Visual basic, ExpertChoice sont utilisés pour informatiser le système. Yaman (2001) propose trois étapes de conception des systèmes de manutention (sélection, rationalisation, et utilisation et détails du système) et utilise un système basé sur la connaissance (SBC). La base de connaissances a été développée sous Leonardo Expert System Shell et le programme de rationalisation de la conception par remplacement avec FORTRAN. L'article Chan (2002) ressemblerait à celui de Chan et al. (2001) et qu'ils seraient publiés par deux revues différentes et reçus à deux différentes dates. Deb, S. et al. (2003) proposent une méthodologie hybride combinant un système basé sur la connaissance et un modèle heuristique d'optimisation pour la conception d'implantation tout en sélectionnant les ÉME qui formeront un SME. Trois approches sont traitées : concevoir d'abord l'implantation et ensuite le SME; concevoir d'abord le SME et ensuite l'implantation; concevoir simultanément l'implantation et le SME. La méthodologie hybride a été programmée en langage C Turbo. Fonseca et al. (2004) utilisent les mêmes outils que les systèmes experts et traitent particulièrement les transporteurs et les convoyeurs. Le résultat est un système prototype informatisé développé avec Level V Object. L'article de Kulak et al. (2004) serait l'article de conférence de l'article de revue bonifié et complété de Kulak (2005). Cho et Egbelu (2005) proposent un système basé sur le web intégrant un système basé sur la connaissance et l'approche logique floue. Il est appelé DESIGNER automatisant le processus de sélection des équipements de manutention et permettant de concevoir un système de manutention. La logique floue est utilisée pour lever les incertitudes du système et aussi pour pouvoir convertir les facteurs qualitatifs en mesures quantitatives. Kulak (2005) développe un système expert appelé FUMAHES *(FUzzy Multi-Attribute material Handling Equipment Selection*). Il utilise une approche floue et axiomatique, avec 142 règles. Une programmation en langage Arity PROLOG est adoptée. Le SBC de Rahman et al. (2007) intègre un modèle d'optimisation minimisant les coûts du SMEA tout en considérant les contraintes du FMS. Mirhosseyni et Webb (2009) proposent un système hybride pour la sélection des équipements convenables pour chaque opération de manutention. En adoptant la logique floue, 38 règles sont exploitées par le système expert. Cela est combiné à un algorithme génétique. Une informatisation avec C# est de mise. Poon et al. (2011) introduit une approche RFID-GA pour réduire le temps des opérations de production et améliorer les préparations de commande et la livraison au sein l'entrepôt. Chakraborty et Prasad (2016) proposent un système expert basé sur l'approche QFD.

Les auteurs ont constitué une base de données et recueilli les informations sur les spécifications techniques de plus de 500 modèles de chariots de manutention à partir des brochures sur les sites des fabricants. Les équipements sont évalués selon neuf critères (type of operation, load, shape, nature, weight, path, level, distance et height). Les types de ÉME auxquels appartiennent ces modèles sont des chariots élévateurs à fourche, chariots rétractables, chariots tracteurs, chariots préparateurs de commandes, gerbeurs et transpalettes. Un logiciel a été créé et une illustration avec des images d'écrans pour deux exemples est fournie.

De l'autre côté, les travaux de recherche sur la sélection de fournisseurs ont exploré d'autres méthodes IA : Grey system theory (GST), Neural networks (NN), Rough set theory (RST), Bayesian networks (BN), Decision tree (DT), Case-based reasoning (CBR), Particle swarm optimization (PSO), Support vector machine (SVM), Association rule (AR), Ant colony algorithm (ACA), Dempster shafer theory of evidence (DST). Les chercheurs pourraient être inspirés par ces méthodes pour traiter le problème de sélection des ÉME. Nous analysons certaines de ces méthodes dans la section 2.9 sur les perspectives de recherche future.

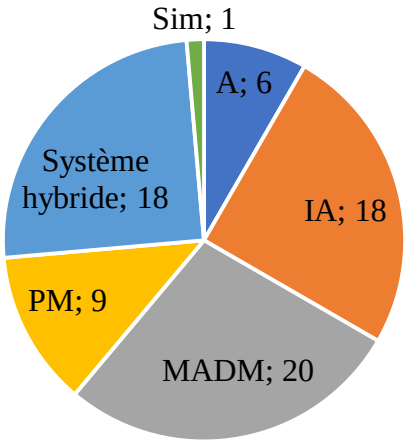


Figure 2.6 : Fréquence d'utilisation des méthodes par catégorie

2.5.3 Méthodes d'aide à la décision multicritère (MADM)

Selon la Figure 2.7, l'approche floue est adoptée par quinze articles de la revue de littérature sur 74 articles. Chan et al. (2001) combinent un système expert et la méthode AHP. AHP est utilisée pour sélectionner le modèle commercial de l'équipement qui rencontre le minimum de spécifications critiques requises. Kulak et al. (2004) intègrent à un système expert un module de MADM utilisant l'« information axiom » des principes du « axiomatic design ». Chakraborty et Banik (2006) conçoivent un modèle de sélection des équipements de manutention avec la méthode AHP. Onut et al. (2009) emploient les variantes fuzzy ANP (FANP) et fuzzy TOPSIS (FTOPSIS). Le cas d'une entreprise qui fabrique de l'acier de construction est étudié avec cinq critères de décision (les contraintes de produit, de mouvement, de méthode, de coût, et de milieu). Les équipements de manutention sont les chariots de manutention, les transporteurs et convoyeurs, les systèmes sur rails, les véhicules à guidage automatique, et les grues fixes. Les méthodes pourraient être appliquées à d'autres secteurs industriels. Tuzkaya et al. (2010) utilisent une autre méthode d'aide à la décision multicritère avec les approches FANP et fuzzy PROMETHEE (FPROMETHEE) et des ensembles flous pour la sélection des équipements dans un entrepôt. Les démonstrations mathématiques sont fournies amplement. Athawale et Chakraborty (2011) appliquent la méthode ELECTRE II sur deux exemples empruntés de la littérature. Maniya et Bhatt (2011) proposent une méthodologie de prise de décision multicritère face aux véhicules autoguidés dans le domaine manufacturier. La démarche utilisée est une combinaison de deux méthodes qui sont l'AHP et l'analyse relationnelle grise modifiée (M-GRA). Sawant et al. (2011) comparent les résultats de deux méthodes qui sont PSI et TOPSIS pour la sélection d'un modèle de véhicules à guidage automatique. Karande et Chakraborty (2013) proposent un modèle basé sur la méthode WUTA pour classer différentes alternatives de ÉME. Les résultats sont comparés avec ceux d'autres méthodes MADM. Le modèle AHP de Rossi et al. (2013) considèrent les critères reliés à l'ergonomie, la sécurité et les performances productives. Sawant et Mohite (2013) comparent les résultats de la méthode TOPSIS avec ceux de deux autres extensions de cette méthode qui sont « block TOPSIS » (B-TOPSIS) et « modified synthetic evaluation method » (M-TOPSIS). Les références à propos de ces méthodes étendues sont disponibles dans ledit article. L'article de Ahmed et Lam (2014) présente une méthode de sélection des équipements de manutention développée pour l'industrie. La méthode est basée sur la théorie de l'utilité multiattribut et la simulation Monte-Carlo. La simulation a permis de déterminer l'incertitude associée à l'estimation

des jugements du décideur. Mousavi et al. (2014) introduisent les méthodes FGRA et VIKOR pour les appliquer à un exemple de sélection des ÉME emprunté de la littérature (Kulak, 2005). L'article de Hadi-Vencheh et Mohamadghasemi (2015) présente une proposition de solution au problème de sélection des ÉME appartenant à un même type en utilisant une approche hybride multicritère floue. Il s'agit en somme d'un algorithme de 12 étapes. La méthode floue adoptée est « lsekriterijumska optimizacija i kompromisno resenje FVIKOR ». Elle est combinée à la méthode TOPSIS qui permet de classer les possibilités. L'approche par vote permet de déterminer les poids des critères. Khandekar et Chakraborty (2015) utilisent la méthodologie de fuzzy axiomatic design et l'appliquent sur deux exemples empruntés de la littérature. Le premier exemple emprunté de Sawant et Mohite (2013) analyse seize modèles d'équipements de VGA. Le deuxième exemple emprunté de Lashgari et al. (2012) analyse cinq ÉME du domaine minier. Jiamruangjarus et Naenna (2016) utilisent la méthode ANP sous l'approche BOCR (benefits, opportunits, costs and risks). Six critères stratégiques et 22 sous critères sont proposés. Ils décrivent la méthodologie sur un exemple en considérant l'état actuel du système comme étant une alternative.

Selon le Tableau 2.7 et la Figure 2.5, les méthodes MADM sont aussi familières dans les deux domaines de sélection puisque seulement deux méthodes font la différence et pourraient inspirer d'autres travaux de recherche sur la sélection des ÉME. Ces deux méthodes MADM sont : Decision-making trial and evaluation laboratory (DEMATEL), Simple multi-attribute rating technique (SMART). Leurs potentiels sont de même à analyser.

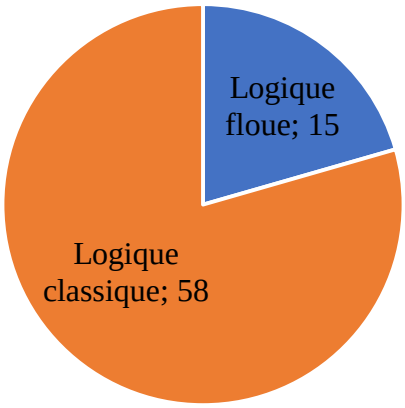


Figure 2.7 : Approches de modélisation

2.5.4 Simulation (Sim)

La simulation peut être utilisée avec d'autres méthodes pour évaluer les alternatives présélectionnées et obtenir des statistiques (Noble & Tanchoco, 1993a, 1993b; Park, 1996). Le modèle de simulation de Bauters et al. (2015) révèle qu'un SVGA n'est pas l'équipement de manutention le plus approprié pour l'approvisionnement des lignes d'assemblage à partir d'un entrepôt central pour une compagnie de l'industrie automobile.

Dans la revue de littérature sur les techniques et méthodes de sélection de fournisseurs de Chai et al. (2013), la simulation ne serait pas citée parmi les quelques 34 méthodes identifiées. Cette méthode n'aurait peut-être pas été encore adoptée dans les travaux de recherche entre 2008 et 2012 pour résoudre le problème de sélection de fournisseurs. Néanmoins, la simulation serait un outil efficace de différentes manières pour la sélection des ÉME. Nous l'analysons dans la section 6 de discussion.

2.5.5 Autres

Dans le cadre de sélection « Framework » (F), Liang et al. (1989) ont recensé à leur époque 570 types de ÉME avec 5000 variétés, mais ils ont préféré travailler avec des familles regroupées qu'ils appellent catégories. Ces catégories ne ressemblent pas forcément à celles qui sont adoptées dans les taxonomies de Kay (2012) et autres. Le système de Chu et al. (1995) est un programme informatique appelé ADVISOR. Il permet en deux étapes d'obtenir une liste classée d'équipements pour une opération de manutention. La première étape permet d'identifier les équipements éligibles et les classer du plus approprié vers le moins. La deuxième étape permet de faire une analyse économique de chaque équipement dans la liste selon quatre aspects (la valeur actuelle, le coût annuel uniforme de l'équipement, le retour sur investissement, ainsi que la période de récupération). L'article de Sharp et al. (2001) aborde le problème de sélection du système de manutention avec une approche en quatre étapes. Ces étapes sont : extraction de tâches, filtrage et appariement, agrégation de tâches, et sélection du système. Cinq outils d'analyse rapide sont proposés afin de réaliser la dernière étape. Raman et al. (2009) propose une méthodologie pour déterminer la quantité de ÉME nécessaire dans un SME en utilisant la théorie des files d'attente. Hassan (2010) propose un cadre de sélection à dix étapes inspiré par les concepts de l'« ingénierie

système » pour la sélection d'équipements de manutention dans l'usine et les entrepôts. L'auteur décrit aussi les facteurs qui influencent les décisions à prendre. Momani et Ahmed (2011) appliquent la simulation Monto Carlo (MC) pour réduire les incertitudes dans la décision. Les jugements de préférence sont représentés sous forme de variables aléatoires ayant des valeurs minimums, moyennes et maximums. D'ailleurs, la simulation MC est différente de la méthode de simulation que nous avons discutée ci-dessus. Liang et al. (1989) proposent une procédure de sélection des ÉME pour générer et évaluer les alternatives en se basant sur les critères et les préférences de l'utilisateur. Le modèle basé sur la théorie de file d'attente de Raman et al. (2009) détermine le nombre de ÉME pour un SME.

Comparé avec les travaux sur la sélection de fournisseurs, le Tableau 2.7 suggère d'autres méthodes incluant « Preference relations (PR), Adaptive resonance theory (ART), Strengths, weaknesses, opportunities, and threats (SWOT), et Integral (I) ». Les méthodes I pourraient être utilisées pour l'agrégation par exemple.

2.6 Applications

En analysant les travaux de recherche sur la conception d'entrepôt, Apple et al. (2010) soulignent que la recherche académique est pour le moment insuffisante dans les pratiques réelles de conception. Les auteurs notent aussi que les académiciens ont besoin de travailler plus étroitement avec les praticiens de la conception d'installations. Cette section vise à analyser les applications des solutions proposées dans les articles et évaluer leur proximité avec les cas réels de sélection des ÉME en industrie dans la vraie vie. À partir des données de la sixième colonne du Tableau 2.1, nous classifions les applications en deux catégories : collaboration avec des cas réels industriels et à des fins de recherche. Les détails, les faits saillants et des articles représentatifs sont présentés dans les paragraphes qui suivent.

2.6.1 Collaboration

Les universités collaborent généralement avec les industriels et plus particulièrement pour notre cas pour résoudre les problèmes et processus de sélection, conception, reconception des SME (ÉME) et pouvoir développer des outils d'aide à la décision. Dans les démarches de démonstration

de leurs contributions, deux scénarios sont identifiables dans les articles : (1) seulement le type d'industrie de la compagnie est cité; ou (2) le nom de la compagnie est clairement cité.

Lorsque le type d'industrie est mentionné, cela aide à reconnaitre les contraintes, variables, et conditions de l'application industrielle. D'autres extensions de recherche pourraient être menées dans le futur. Des exemples de ces cas de collaboration sont l'industrie automobile (Braglia et al., 2001), l'industrie du fer et de l'acier (Onut et al., 2009), l'industrie du textile (Kulak, 2005; Kulak et al., 2004), une centrale électrique utilisant du charbon (Velury & Kennedy, 1992), l'industrie du verre (Matt et al., 2011), l'industrie de meubles (Chan, 2002; Chan et al., 2001), la fabrication de tracteurs (Tuzkaya et al., 2010), et l'industrie électronique (Frazelle, 1985).

Lorsque le nom de la compagnie est mentionné, il est plus facile citer le cas industriel comme référence. Des exemples de ces cas sont General Electric (Gabbert & Brown, 1988), Lambert Inc. et Vardhmann Acrylics (Fonseca et al., 2004) et JSW Steel Ltd. (Varun et al., 2017).

D'autre part, les termes « étude de cas » et « exemple » sont tous les deux employés dans les articles en référence à des collaborations avec l'industrie. Nous estimons qu'il existe une différence entre les termes dans leurs significations, mais nous respectons leur emploi dans les articles et nous rapportons les mêmes mots dans la colonne six du Tableau 2.1.

2.6.2 Recherche

La sixième colonne du Tableau 2.1 montre que presque deux tiers des articles sont naturellement proposés à des fins de recherche. Ce caractère est reconnaissable par les types d'applications réalisées. Quatre types d'application sont identifiables : (1) exemple illustratif; (2) exemple illustratif emprunté de la littérature; (3) exemple d'exécution du système ou de la procédure; (4) description et consultation du système ou procédure.

Les exemples illustratifs, qu'ils soient empruntés de la littérature ou pas, sont les plus communs. Des détails sur les méthodologies sont fournis. C'est une méthode académique qui pourrait aider à des fins d'enseignement. Ils pourraient inspirer des travaux de recherche future ainsi que d'éventuelles applications industrielles.

Les exemples d'exécution des outils d'aide à la décision développés et des procédures analytiques proposées sont de même utilisés pour démontrer comment ils fonctionnent. D'autres articles

préfèrent fournir des descriptions et des consultations des systèmes et des procédures. Ils pourraient être aussi utilisés à des fins d'enseignement.

2.7 Validation des systèmes

Le processus de validation des systèmes développés est nécessaire afin de prouver la praticabilité de la solution sur le terrain. Selon Al-Meshaiei (1999), il n'existe pas de méthode universelle, ce qui la rend difficile et parfois absente. Toutefois, il existe généralement quatre méthodes de validation.

a. Tester le système avec les données réelles d'une entreprise du terrain,
b. Tester avec des données réelles empruntées à d'autres articles de recherche,
c. Faire tester le système par certains professionnels spécialisés du domaine qui travaillent sur la sélection et la conception des systèmes de manutention,
d. Faire une enquête sur le terrain en faisant tester le système par tous les utilisateurs potentiels afin de récolter toutes les appréciations, ce qui est particulièrement difficile en raison de leur grand nombre.

À partir des applications décrites dans la section 2.6, il apparait que les systèmes de sélection qui ont été appliqués sur des cas ou des exemples d'entreprise seraient en nombre de 27 sur 74 articles. Ils pourraient être considérés comme ayant adopté l'option de validation (a). Il faut noter aussi qu'environ neuf articles ont utilisé les données empruntées à d'autres articles pour en faire des exemples illustratifs. Il est difficile de garantir pour tous la nature réelle des données pour appartenir à l'option de validation (b). D'autres propositions sont des descriptions et des consultations des méthodologies. En somme, le processus de validation serait recommandé pour plus que la moitié des propositions faites dans la littérature.

2.8 Constats

Dans cette section, nous discutons certains résultats de la revue de littérature. Ce sont des indications qui pourraient aider dans des travaux futurs.

La sélection des ÉME en usine est plus abordée (plus que deux tiers des articles) et avec des systèmes manufacturiers spécifiques (FMS, FMC, CMS, etc.). Ceci montre que les chercheurs seraient plus familiers avec la ME en usine qu'en entrepôt et des systèmes de distribution.

Plus de six septièmes des articles traitant les problèmes de sélection des ÉME considèrent différentes unités de charge ou ne les spécifient pas (G). Le type de l'unité de charge n'est pas souvent spécifié quand un modèle de ÉME est à sélectionner. La sélection de modèles d'équipement intervient après avoir choisi en premier un type d'équipement et sa catégorie.

La recherche dans la sélection des équipements fixes d'entreposage n'est pas aussi développée que pour les équipements de manutention. Même si certaines recherches mettent ces équipements ensemble avec ceux de la manutention, dans ces cas, les systèmes doivent être adaptés à tous les aspects des problèmes fixes et dynamiques, ce qui est compliqué. En effet, il n'est pas démontré que ces systèmes sont aussi capables de proposer à l'utilisateur un équipement fixe, à part lorsqu'ils font les combinaisons.

Les éléments de sortie de la phase de sélection des ÉME devraient être des éléments d'entrée d'autres phases et étapes d'analyses additionnelles dans les processus de conception et sélection de SME.

Certains articles intègrent la sélection des ÉME / SME et d'autres questions de conception de SME comme la conception de l'implantation, ce qui serait une autre façon de démontrer l'utilisation des éléments de sortie de la phase de sélection des ÉME / SME.

Généralement, les articles abordant la conception de SME se concentrent dès le départ sur un ÉME spécifique comme un système de convoyeurs, un SVGA, etc. et poursuivent avec les étapes du processus de conception de SME (Kouvelis & Lee, 1990).

Les modèles de programmation mathématique sont plus clairs que les autres méthodes avec les hypothèses détaillées.

Les méthodes multicritères ne mettent pas souvent l'accent sur l'aspect logistique du problème de sélection d'équipements de manutention et les critères d'évaluation généralement proposés dans ces approches permettent de comparer des modèles d'un même type d'équipement.

Les systèmes hybrides intègrent des systèmes experts avec les modélisations mathématiques ou les méthodes MADM pour pouvoir exploiter plusieurs forces. Par exemple, après avoir fait le choix d'un type d'équipements de manutention, il serait convenable d'optimiser le nombre d'engins de ce type à employer ainsi que le modèle à acheter en fonction des critères de coût, de performance, de flexibilité, etc.

Les approches-cadres dans la recherche de sélection d'équipements de manutention sont systémiques. Il est nécessaire de considérer l'ensemble du problème et d'intégrer les autres aspects de la fonction de manutention afin de proposer une solution complète.

La simulation est un outil qui pourrait fournir différentes informations et statistiques sur les ÉME / SME. Elle peut être utilisée pour l'évaluation et la sélection des ÉME / SME (Banks, 1990). Toutefois, la plupart des efforts de recherche ne reflètent pas ce potentiel. Mahadevan et Narendran (1994) fournissent des références sur les questions de conception de SME et des applications de simulation.

Presque deux tiers des articles sur 74 articles réalisent des applications à des fins de recherche académique contre un tiers aboutissant à des collaborations avec les industriels.

2.9 Suggestions de recherche

Cette section présente différentes perspectives de recherche et des méthodes qui ne seraient pas encore explorées dans ce domaine de sélection des ÉME.

D'abord, la section 2.8 ci-dessus résume plusieurs indications de recherche à partir de la littérature collectée. De même, tout au long de la revue de littérature, d'autres indications sont fournies.

Le but des recherches dans la sélection des équipements de manutention et d'entreposage est de développer des outils d'aide à la décision capables d'assister les concepteurs d'entrepôt ou d'usine. Les recherches sur la sélection des équipements de manutention et d'entreposage destinés à l'entrepôt sont faibles, voire presque absentes. La plupart des articles reflètent des cas d'usine. La manutention en entrepôt est à couvrir. La sélection des équipements d'entreposage est à traiter.

Chung et Tanchoco (2009) décrivent le concept de système de manutention et d'entreposage automatisé intégré (SEMAI) et le définissent comme étant l'intégration de différents ÉMEA et SMEA dans un seul environnement. La quatrième révolution industrielle (Industrie 4.0) et son système logistique (logistique 4.0) pourraient apportés plus de SEMAI. Comment la sélection des ÉME dans cette situation pourrait-elle être abordée?

Les techniques d'exploration de données (Data mining) peuvent être classées en trois catégories : modèles prédictifs, segmentation, et modèles descriptifs (Apté, 1997). Les techniques sont

nombreuses. Elles pourraient être utilisées dans la sélection des ÉME pour résoudre différentes questions en utilisant des données empiriques de l'industrie.

La sélection de modèles de ÉME nécessite une base de données contenant tous les modèles. Al-Meshaiei (1999) indique que le nombre de modèles de ÉME disponibles dans le marché avoisine 3.5 millions de modèles. Cette estimation a été faite en 1999 et nous pouvons nous attendre à encore plus aujourd'hui. Les décideurs pourraient utiliser les techniques d'exploration de données pour extraire de l'information à partir des données qui deviennent de plus en plus abondantes.

Apple et al. (2010) rappellent que même dans le processus de conception d'ingénierie, la tâche la plus difficile est la génération d'alternatives. La sélection des ÉME est faite à partir d'une liste d'alternatives de ÉME collectées par le concepteur. Est-il possible d'identifier ou générer automatiquement les alternatives de ÉME? Il pourrait être possible en utilisant des données empiriques et les techniques d'exploration de données.

- Les techniques de modélisation prédictive sont : Iterative dichotomiser 3 (ID3), C4.5 (extension of ID3), Classification and regression trees (CART), Neural networks (NN), Bayesian networks (BN), etc.
- Les techniques de segmentation sont : K-means, Clustering large applications (CLARA), Clustering using representatives (CURE), Statistical information grid approach (STING), Clustering in Quest (CLIQUE), etc.
- Les techniques de modélisation descriptive sont : A priori, A priori TID, Frequent Pattern Tree (FP-Tree), Rapid Association Rule Mining (RARM), etc.

McGinnis, Goetschalckx, Sharp, Bodner et Govindaraj (2000) et Apple et al. (2010) suggèrent plus de collaboration avec les concepteurs praticiens afin de les aider à résoudre les problèmes de conception d'installations. La sélection des ÉME est une phase de la conception d'installations.

2.10 Conclusion

Ce chapitre présente une revue de littérature systématique d'articles scientifiques publiés depuis 1985 sur les problèmes de sélection des ÉME. Un total de 74 articles a été sélectionné. L'objectif est d'analyser la littérature sur cinq aspects : buts ou problèmes abordés dans la sélection des ÉME, données d'entrée, méthodes de sélection, applications des solutions proposées et validation des

propositions. Une comparaison des méthodes de sélection de deux domaines (ÉME et fournisseurs) est réalisée.

Les limites de cette revue de littérature seraient le nombre d'articles collectés et la portée de l'analyse apportée. Par exemple, la sélection des ÉME dans le domaine minier n'est pas traitée. Les articles sélectionnés datent d'après 1985 parmi plus de 150 documents identifiés au départ. La méthodologie de collecte et sélection d'articles est décrite plus amplement à la section 2.2.

L'analyse de la littérature nous a permis d'identifier et suggérer différents problèmes non résolus dans le domaine de la sélection des équipements de manutention et d'entreposage ainsi que différentes méthodes de sélection potentielles. L'orientation de recherche adoptée dans cette thèse est de traiter les problèmes de sélection des équipements de manutention et d'entreposage particulièrement utilisés dans les entrepôts. Les objectifs sont de proposer des méthodologies de sélection des équipements de manutention et d'entreposage destinés aux charges palettisées et aux petites charges.

Le chapitre suivant présente la méthodologie de recherche adoptée dans le cadre de cette thèse.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE ET CONTRIUBTIONS

3.1 Méthodologie de recherche

Cette recherche scientifique appliquée est inspirée par les ÉME existantes et les problèmes rencontrés par leurs utilisateurs. Elle vise à aider la prise de décision sur le choix technologique à faire lors de la conception d'entrepôt. Quelques étapes marquent la démarche de recherche.

La source de l'inspiration retourne à une proposition de recherche indiquée dans la revue de littérature de Gu et al. (2010). Ils mentionnent qu'il y a un besoin d'avoir un guide de sélection des ÉME. Pour commencer, une revue de littérature dans le domaine a été faite au Chapitre 2. Il s'est avéré que les publications sur la sélection des équipements de manutention et d'entreposage n'étaient pas nombreuses. Nous avons étendu l'intervalle de recherche jusqu'aux trente dernières années à partir de 1985. Les plus pertinents articles au nombre de 74 ont été retenus. Ils sont pertinents parce qu'ils traitent directement le problème de sélection des équipements de manutention et d'entreposage en usine et/ou en entrepôt. La démarche de collecte d'articles est décrite plus amplement à la section 2.2. Une analyse des 74 articles portant sur cinq volets est faite et des suggestions de recherche sont faites selon les sections 2.8 et 2.9.

Le but de cette thèse est de contribuer à résoudre le problème de sélection des ÉME en explorant certaines des perspectives de recherche proposées par la revue de littérature. Plus particulièrement, nous avons décidé d'apporter des contributions sur la sélection des ÉME destinés aux charges palettisées et petites charges.

Pour ce faire, la littérature spécialisée du domaine a été exploitée afin de collecter les données et les connaissances existantes sur la sélection des ÉME. Elle comprend des articles scientifiques de journaux et de conférences, des monographies, une encyclopédie, des aide-mémoires, des dictionnaires, des numéros de magazines, des pages web, et des entrevues. Il n'a pas été facile de trouver toutes les données caractérisant les ÉME. Dans la plupart des cas, les données ont été vagues et exprimées avec le langage humain. Lorsqu'une donnée n'était pas trouvable, nous avons utilisé une approximation extrapolée de la donnée la plus proche et validée par les professionnels du domaine.

Nous avons collaboré avec l'industriel québécois Équipement BONI, fabricant d'équipements d'entreposage. Des visites d'entreprises et des réunions de consultation et de validation des résultats ont fait partie des méthodes de travail.

Les données collectées sur les charges palettisées ont permis de réaliser des fiches techniques des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. Les résultats ont été validés par un ingénieur d'Équipement BONI. Les systèmes d'entreposage sont composés d'équipements d'entreposage couplés à des équipements de manutention. La définition de chaque équipement de manutention et d'entreposage ainsi que les critères de sélection sont fournis. Pour notre cas, nous utilisons le terme critère de sélection au lieu de caractéristique de sélection. La raison principale serait le fait que nous adoptons entre autres des méthodes d'aide à la décision multicritère. Une description des fiches techniques est fournie dans le Chapitre 4.

Les fiches techniques ont servi de données d'entrée à la méthodologie de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. La méthodologie est composée d'un SBC et de la méthode floue d'aide à la décision multicritère FTOPSIS. Le SBC permet de créer des règles de présélection. La méthode FTOPSIS permet de classifier les systèmes d'entreposage présélectionnés. La modélisation du problème a été en logique floue afin de traiter les expressions vagues et incertaines dans les données. Le détail de la méthodologie est fourni dans le Chapitre 5.

Le Chapitre 6 traite les cas particuliers de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. Une extraction de règles de sélection à partir de la base de données constituée par les fiches techniques est réalisée avec une des techniques du Data mining le C4.5. Un arbre de décision aboutissant à des choix uniques est réalisé. L'arbre présente le plus court chemin pour sélectionner chaque système. Des cas singuliers dans lesquels chaque système serait le seul à être recommandé sans être secondé par d'autres systèmes sont extraits et mis à l'évidence.

Après les charges palettisées, le cas des petites charges a été abordé. Les ÉME destinés aux petites charges ne sont pas traités abondamment dans la littérature. Toutes les données nécessaires ne sont pas disponibles. Il n'a pas été possible de faire des fiches techniques complètes comme pour les charges palettisées. Afin de contourner cet obstacle, la méthodologie de sélection développée pour les équipements d'entreposage destinés aux petites charges fait, entre autres, des comparaisons par pair des équipements. Elle combine un autre SBC et la méthode d'aide à la décision multicritère

AHP qui permet de faire la comparaison par pair des équipements selon les critères de sélection. Le détail de la méthodologie est fourni dans le Chapitre 7.

Finalement, étant donné que la migration des entreprises vers l'industrie 4.0 et la logistique 4.0 est en cours, nous avons jugé pertinent d'évaluer les changements qui s'annoncent dans le processus de sélection des équipements dans le contexte 4.0. La littérature sur le 4.0 a été revue. Plusieurs défis ont été identifiés. Les capacités d'adaptation des équipements aux changements ont ensuite été évaluées. L'intérêt a été de déterminer les aspects critiques des équipements pour mieux fonctionner dans le contexte 4.0. Un ensemble de recommandations sont faites pour mieux appréhender les exigences du 4.0. Le détail de l'évaluation est fourni dans le Chapitre 8.

3.2 Contributions

Les travaux de la revue de littérature ont fait l'objet de deux articles distincts présentés et publiés dans deux conférences (Ahmed Bouh & Riopel, 2015a, 2015b). Elle a été complétée et mise à jour continuellement.

Les différentes contributions à la connaissance et à la recherche dans le domaine de génie industriel réalisées dans cette thèse sont les suivantes.

- **Contribution 1 :** fiches techniques des systèmes d'entreposages destinés aux charges palettisées. Ce travail a fait l'objet d'un rapport technique publié au CIRRELT (Ahmed Bouh & Riopel, 2016a).
- **Contribution 2 :** méthodologie de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. Ce travail a fait l'objet d'un article présenté et publié dans une conférence (Ahmed Bouh & Riopel, 2016b).
- **Contribution 3 :** extraction automatique de règles de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. Ce travail a fait l'objet d'un rapport technique publié au CIRRELT (Ahmed Bouh & Riopel, 2017b).
- **Contribution 4 :** méthodologie de sélection des équipements d'entreposage destinés aux petites charges. Ce travail a fait l'objet d'un article présenté et publié dans une conférence (Ahmed Bouh & Riopel, 2017c).
- **Contribution 5 :** évaluation de la sélection des équipements de manutention et d'entreposage dans le contexte 4.0. Ce travail a fait l'objet d'un article présenté et publié dans une conférence (Ahmed Bouh & Riopel, 2017a).

CHAPITRE 4 FICHES TECHNIQUES DES SYSTÈMES D'ENTREPOSAGE DESTINÉS AUX CHARGES PALETTISÉES

4.1 Introduction

Pour concevoir l'implantation d'un entrepôt, l'ingénieur a besoin de connaitre les caractéristiques des différents équipements d'entreposage existants pour choisir celui qui conviendrait le mieux. Certains concepteurs vont utiliser leurs propres expériences dans le domaine et d'autres vont essayer de se documenter. La documentation disponible sur l'entreposage et la manutention est abondante. Ils décrivent les équipements et leurs fonctionnements. D'autres abordent le détail mécanique des structures, ainsi que la sécurité sur l'installation et l'exploitation. Les plus proches à la réponse de la question de sélection fournissent des tableaux comparatifs pour quelques équipements d'entreposage. Les ingénieurs ont besoin d'avoir une connaissance de la bibliographie du domaine et se prêter à un investissement en temps et énergie pour arriver à ces constats. D'autres concepteurs pourront se tourner directement vers les vendeurs d'équipements ou les consultants. Lorsque le client ne connait pas ses besoins avant de contacter un vendeur, les conseils peuvent être biaisés par leur aspect commercial. D'autant plus que les catalogues de produits fournissent des informations vagues.

Ce chapitre vise à compléter ce vide et faire le lien manquant pour les systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. Il permet de faire connaitre davantage les équipements existants et leurs caractéristiques sur plusieurs niveaux. Il propose des fiches techniques standardisées des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. Elles sont réalisées en utilisant la connaissance de la littérature spécialisée du domaine et elles ont été validées par l'entreprise Équipement BONI. La Figure 4.1 présente la démarche globale de réalisation des fiches techniques des systèmes d'entreposage des charges palettisées. Les étapes de la démarche sont expliquées et détaillées dans les sections suivantes du chapitre.

- Les aide-mémoires (Anthony, 2008; Bagadia, 2008; Klein, Fowler, Devaney, Footlik, & Strombeck, 2008; Kulwiec, 2008a, 2008b; Manley et al., 2008; Muther & Webster, 2008; Nolan, 2008; Promisel, 2008; Tompkins & Smith, 1998; Tompkins, Smith, Huffman, & Ackerman, 2008) ;

- Les livres (Baker & The Chartered Institute of Logistics and Transport, 2010; Bartholdi & Hackman, 2014; Colloc, 1977; Devys, 1985; Langevin & Riopel, 2005; Mulcahy, 1999; Muther, 1973; Riopel, 2014, 2015; Roux, 2011; Roux & Liu, 2010; Rushton, Croucher, & Baker, 2014; Tompkins et al., 2010) ;
- L'encyclopédie de la manutention (Syndicat des industries de matériels de manutention, 1983a, 1983b) ;
- Les dictionnaires (Institute of Industrial Engineers, 2000; Riopel & Croteau, 2013);
- Les guides techniques (Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) & Association sectorielle transport entreposage (ASTE), 2009; Institut national de recherche et de sécurité (INRS) & Syndicat des industries de matériels de manutention, 2001; Peters, Malmborg, Petrina, Pratt, & Taylor, 1998) ;
- Différents numéros publiés à partir de 2006 du magazine Modern Materials Handling ;
- Différents catalogues de constructeurs d'équipements d'entreposage (Équipement BONI, Drive-U-Rack, et autres). Le Material Handling Institute (MHI) publie sur son site web les coordonnées des constructeurs des solutions de manutention et d'entreposage *(dernière consultation octobre 2017).*

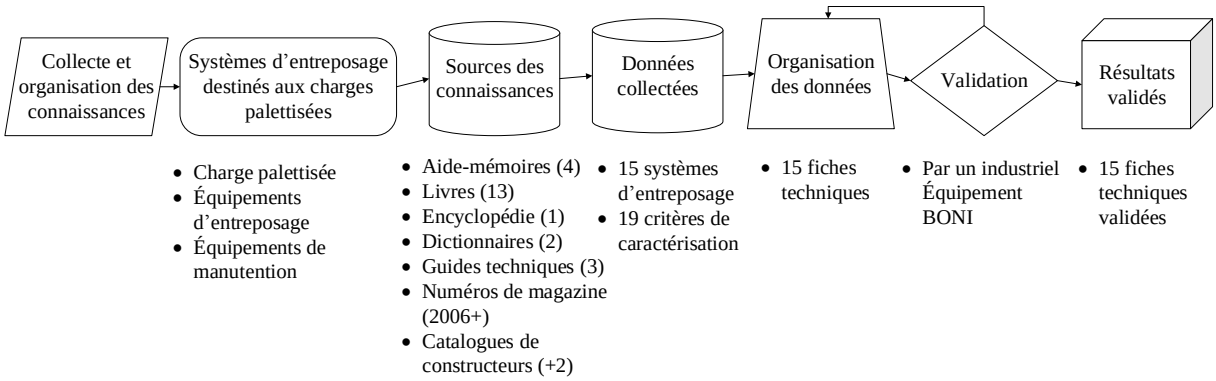


Figure 4.1 : Démarche globale de réalisation des fiches techniques des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées

4.2 Systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées

Les systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées sont composés d'équipements d'entreposage couplés à des équipements de manutention destinés aux charges palettisées. Le couplage est fait pour tous les systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées pour deux

raisons. Par définition, les systèmes d'entreposage automatisés (AS/RS) sont constitués de palettiers et d'équipements de manutention (S/R machine). Les équipements de manutention destinés aux charges palettisées peuvent être regroupés en trois groupes comme décrits à la section 4.2.2, et chaque équipement d'entreposage destiné aux charges palettisées peut être associé à un seul de ces trois groupes d'équipements de manutention.

4.2.1 Équipements d'entreposage destinés aux charges palettisées

Les équipements d'entreposage destinés aux charges palettisées sont constitués principalement d'un équipement appelé « palettier ». Un palettier est une structure composée d'échelles et de lisses, destinée à recevoir des charges généralement palettisées (Riopel & Croteau, 2013). Quatorze équipements d'entreposage en plus de l'entreposage de masse qui n'utilise pas de palettier sont définis. L'entreposage de masse est le premier type. Il se fait directement au sol en posant une première charge palettisée sur le plancher et les unes sur les autres en formant des blocs.

- Palettier à simple profondeur : palettier frontal qui permet l'entreposage d'une seule charge palettisée dans le sens de la profondeur de l'alvéole (Riopel & Croteau, 2013).
- Palettier à double profondeur : palettier frontal qui permet l'entreposage de deux charges palettisées dans le sens de la profondeur de l'alvéole (Riopel & Croteau, 2013).
- Palettier en allées étroites : palettier à simple profondeur avec des allées étroites qui nécessite l'utilisation de chariots élévateurs pour allées étroites (Rushton et al., 2014).
- Palettier à accumulation statique ouvert sur une face : palettier statique ouvert sur une face qui permet à un appareil de manutention de pénétrer dans sa structure pour y poser ou en retirer des charges palettisées qui reposent sur des lisses installées dans le sens de la profondeur des alvéoles (Riopel & Croteau, 2013).
- Palettier à accumulation statique ouvert sur deux faces : palettier statique ouvert sur deux faces qui permet à un appareil de manutention de poser et/ou en retirer des charges palettisées sur une face et à un autre appareil de manutention de poser et/ou en retirer des charges palettisées sur l'autre face qui reposent sur des lisses installées dans le sens de la profondeur des alvéoles (Rushton et al., 2014).
- Palettier mobile : palettier dynamique dont les rangées mobiles se déplacent pour créer une allée de service nécessaire aux opérations d'entreposage (Riopel & Croteau, 2013).

- Palettier à accumulation dynamique : palettier dynamique dans lequel le déplacement des charges palettisées se fait à l'intérieur de sa structure par gravité (Riopel & Croteau, 2013).
- Palettier à gravité inversée : palettier à gravité dont les charges palettisées sont posées et retirées à partir de l'une de ses faces (Riopel & Croteau, 2013).
- Palettier satellite ouvert sur une face : palettier statique ouvert sur une face qui permet, grâce à un robot navette posé au-dessous des lisses installées sur chaque niveau dans le sens de la profondeur des alvéoles, de faire un aller-retour en soulevant et déplaçant les charges palettisées sur la travée (Rushton et al., 2014).
- Palettier satellite ouvert sur deux faces : palettier statique ouvert sur deux faces qui permet, grâce à un robot navette posé au-dessous des lisses installées sur chaque niveau dans le sens de la profondeur des alvéoles, de faire un aller-retour en soulevant et déplaçant les charges palettisées sur la travée pour déposer sur une face et les retirer sur l'autre face (Rushton et al., 2014).
- Système d'entreposage automatisé à simple profondeur : palettier à simple profondeur avec un appareil de manutention automatique généralement muni d'un ou de deux rails qui peut se déplacer à l'horizontale et à la verticale afin d'entreposer des charges palettisées ou les extraire du palettier (Riopel & Croteau, 2013; Rushton et al., 2014).
- Système d'entreposage automatisé à double profondeur : palettier à double profondeur avec un appareil de manutention automatique généralement muni d'un ou de deux rails qui peut se déplacer à l'horizontale et à la verticale afin d'entreposer des charges palettisées ou les extraire du palettier (Riopel & Croteau, 2013; Rushton et al., 2014).
- Système d'entreposage automatisé à accumulation dynamique : palettier de grande hauteur et de grande profondeur dont le déplacement des charges palettisées se fait généralement par gravité et muni de deux appareils de manutention automatiques généralement munis d'un ou de deux rails qui peuvent se déplacer à l'horizontale et à la verticale afin d'entreposer des charges palettisées sur une face du palettier et les extraire de l'autre face (Rushton et al., 2014).
- Système d'entreposage automatisé à accumulation statique : palettier de grande hauteur et de grande profondeur dont le déplacement des charges palettisées se fait généralement par robot navette et muni de deux appareils de manutention automatiques généralement munis d'un ou de deux rails qui peuvent se déplacer à l'horizontale et à la verticale afin d'entreposer des charges palettisées sur une face du palettier et les extraire de l'autre face (Rushton et al., 2014).

4.2.2 Équipements de manutention destinés aux charges palettisées

Les équipements de manutention destinés aux charges palettisées sont regroupés en trois groupes.

- Chariot élévateur à fourche standard : chariot motorisé à conducteur porté, qui permet de manutentionner, de lever ou d'abaisser la charge palettisée. Il peut avoir trois ou quatre roues. Son appareil de préhension est une fourche (Institute of Industrial Engineers, 2000; Riopel & Croteau, 2013). Il est qualifié de standard pour désigner tous les types de chariots élévateurs conçus pour manœuvrer dans les allées de service régulières à la différence des allées étroites *(chariot élévateur à fourche à contrepoids, chariot élévateur à fourche à mât rétractable, chariot élévateur à fourche à prise frontale, chariot élévateur à fourche à prise latérale, chariot élévateur à fourche à prise bilatérale, chariot élévateur à prise latérale multidirectionnel, chariot à fourche entre longerons, chariot élévateur à flèche télescopique, chariot élévateur à châssis articulé, chariot élévateur à tablier porte-fourche rétractable, chariot élévateur à cabine rotative).*
- Chariot élévateur pour allées étroites : chariot élévateur qui est conçu pour être manœuvré dans un aménagement étroit, tout en favorisant un transfert facile de la charge palettisée en provenance ou en direction des quais de chargement ou de déchargement (Institute of Industrial Engineers, 2000; Riopel & Croteau, 2013).
- Transtockeur : appareil de manutention généralement muni d'un ou de deux rails, qui peut se déplacer à l'horizontale et à la verticale afin d'entreposer les charges palettisées dans les palettiers. Il peut être semi-automatique ou entièrement automatique (Institute of Industrial Engineers, 2000; Riopel & Croteau, 2013).

4.3 Critères de caractérisation

Pour faire la sélection d'un système d'entreposage destiné aux charges palettisées, un ensemble de critères caractérisant les systèmes doivent être analysés. Certains critères sont critiques et d'autres sont des critères de performance. Ils sont critiques parce qu'ils permettent de classifier les systèmes et d'obtenir une présélection. Ils portent sur des aspects technologiques qui restreignent leur utilisation. L'utilisateur est obligé de spécifier les caractéristiques recherchées pour lesdits critères critiques. L'objectif des autres critères de performance est de les maximiser. Chaque critère est formulé sous forme de question. Un titre formé avec les mots clés de la question est associé à

chaque critère. Ils sont regroupés en trois groupes : critères de la charge palettisée, critères de l'équipement d'entreposage, critères de l'équipement de manutention. Nous décrivons dans les sections ci-dessous les critères et les différentes valeurs possibles pour chaque critère.

4.3.1 Critères de la charge palettisée

Ce groupe de critères fait référence aux défauts de la charge palettisée à entreposer. Certains types de défauts empêchent l'utilisation de certains équipements d'entreposage. Ce sont des critères critiques qui permettent de classifier les équipements. Il n'y a pas de critères à maximiser dans ce groupe. Devys (1985) est la source principale pour caractériser les charges palettisées.

- Défauts de construction de paletée tolérés *(quels sont les défauts de construction de paletée tolérés par l'équipement d'entreposage ?).*

  Il existe deux types de défauts de construction de paletée.

  - Cassure : « défaut de construction de la paletée attribuable à une faille qui la sépare verticalement, due au manque de croisement entre les colis. Elle est nuisible à la stabilité de la paletée et occasionne de nombreux problèmes au moment de la manutention, du transport ou de la dépalettisation. Elle peut être unique ou multiple » (Riopel & Croteau, 2013).
  - Croisement médiocre : « défaut de construction de la paletée attribuable à des colis qui sont croisés insuffisamment. Le coefficient de frottement étant trop faible entre les colis pour empêcher le glissement, cela peut entraîner une dislocation de la paletée. Le cerclage horizontal peut être utilisé afin de résoudre un problème de croisement médiocre » (Riopel & Croteau, 2013).

  Seulement le défaut de croisement médiocre est parfois toléré par les systèmes d'entreposage.

- Défauts de forme de paletée tolérés *(quels sont les défauts de forme de paletée tolérés par l'équipement d'entreposage ?).*

  Les plus importants défauts de forme sont de quatre types.

  - Bosse : « défaut de forme de la paletée attribuable au fait que les colis ne forment pas une paletée au-dessus relativement plate, ne favorisant pas ainsi un gerbage sécuritaire. La bosse peut avoir l'avantage d'empêcher le gerbage d'une autre charge palettisée ; on utilise alors le terme bosse de dissuasion » (Riopel & Croteau, 2013).

- Escalier : « défaut de forme de la paletée attribuable à la formation d'un escalier, au coin de celle-ci, par des colis dont les arêtes verticales ne sont pas en prolongement l'une de l'autre. Il est source d'avaries, les colis en coin risquant de plier à l'endroit du porte-à-faux et la partie en surplomb étant exposée aux accrochages avec tout obstacle rencontré » (Riopel & Croteau, 2013).
- Gîte : « défaut de forme de la paletée attribuable à l'inclinaison de celle-ci sur l'un de ses bords. Une gîte fait obstacle à la mise en place des paletées côte à côte lors de l'entreposage (chargement et déchargement) » (Riopel & Croteau, 2013).
- Tubérosité : « défaut de forme de la paletée attribuable au glissement de colis qui dépassent son pourtour à la façon d'un nodule. Elle soumet les colis débordants aux chocs contre tout obstacle rencontré. Le glissement peut éventuellement provoquer la dislocation totale de la paletée » (Riopel & Croteau, 2013).

Seulement le défaut de bosse est parfois toléré par les systèmes d'entreposage.

- Défauts d'occupation de la surface de la palette tolérés *(quels sont les défauts d'occupation de la surface de la palette tolérés par l'équipement d'entreposage ?).*

Les plus fréquents défauts d'occupation de la surface de la palette sont de quatre types.

- Caverne : « défaut d'occupation de la surface de la palette attribuable à un espace vide entre les colis qui donne sur une face latérale de la paletée, étant ainsi visible sur cette seule face » (Riopel & Croteau, 2013).
- Couloir : « défaut d'occupation de la surface de la palette attribuable à un espace entre deux rangées de colis qui traverse la paletée de part en part. Se trouvant en position alternée symétrique d'une couche à l'autre, le couloir ne forme pas une cassure. Toutefois, il peut entraîner une dislocation de la paletée s'il est accompagné d'un croisement médiocre » (Riopel & Croteau, 2013).
- Cheminée : « défaut d'occupation de la surface de la palette attribuable à un espace fermé sur quatre côtés qui, à la différence de la poche, se reproduit avec les mêmes dimensions et positions à chaque couche, formant ainsi un espace vide plus ou moins rectangulaire qui traverse la paletée de bas en haut. Elle peut nuire à la stabilité de la paletée, si elle est assez vaste pour permettre à des colis d'y tomber. La cheminée peut cependant être considérée comme un avantage lorsqu'on veut rendre visibles les produits pour en contrôler la quantité » (Riopel & Croteau, 2013).

- Poche : « défaut d'occupation de la surface de la palette attribuable à un espace vide entre les colis qui l'enferment sur les six côtés et qui, à la différence de la cheminée, se reproduit à un endroit différent à chaque couche. La poche n'apparait à l'extérieur de la paletée qu'à la couche supérieure, celle-ci est de la hauteur d'un colis » (Riopel & Croteau, 2013).

Les défauts d'occupation de la surface de la palette sont parfois tolérés avec une occupation au mieux de la surface à condition que la charge palettisée soit stable.

- Autres types de défauts de paletée tolérés *(quels sont les autres types de défauts de paletée tolérés par l'équipement d'entreposage ?).*

Il existe deux autres types de défauts qui peuvent être des avantages selon le cas.

- Débord de paletée : « partie de la paletée qui excède le plancher supérieur d'une palette. Le débord s'oppose au retrait » (Riopel & Croteau, 2013).
- Retrait de paletée : « espace du plancher supérieur d'une palette qui n'est pas occupé par la paletée » (Riopel & Croteau, 2013).

- Défauts d'emballage des colis tolérés *(quels sont les défauts d'emballage des colis tolérés par l'équipement d'entreposage ?).*

L'emballage peut être de faible résistance entraînant son affaissement. Il peut être aussi surdimensionné brisant les cannelures.

- État de palette toléré *(quel état de palette est toléré par l'équipement d'entreposage ?).*

La palette peut être en mauvais état caractérisé, par exemple, par des clous qui ressortent de la palette et endommageant les produits fragiles.

4.3.2 Critères de l'équipement d'entreposage destiné aux charges palettisées

Certains critères de l'équipement d'entreposage destiné aux charges palettisées sont des critères critiques et d'autres sont des critères de performance. Les critères critiques permettant de classifier les équipements d'entreposage sont : méthode de rotation des stocks utilisée, agression aux charges palettisées et hauteur de la travée, profondeur de la travée, nombre de références idéalement requis, nombre de charges palettisées par référence idéalement requise, et flux des charges palettisées idéalement requis. Les autres critères de ce groupe sont des critères de performance à maximiser lors de la sélection des équipements d'entreposage.

- Méthode de rotation des stocks *(quelle méthode de rotation des stocks peut être adoptée avec cet équipement d'entreposage ?).*

  Les deux méthodes de rotation des stocks généralement utilisées sont : dernier entré, premier sorti (DEPS) et premier entré, premier sorti (PEPS). Il existe d'autres méthodes comme la méthode du premier expirant, premier sorti.
- Agression aux charges palettisées *(quel type d'agression des charges palettisées existe-t-il dans cet équipement d'entreposage ?).*

  Les agressions aux charges palettisées possibles sont de deux types.
  - Choc latéral : cette forme d'agression apparait lorsque les charges palettisées se déplacent par la force gravitationnelle à l'intérieur de l'équipement d'entreposage.
  - Pression de dessus : cette agression apparait lorsque les charges palettisées sont gerbées les unes sur les autres.
- Hauteur de la travée *(qu'est-ce qui limiterait la hauteur de cet équipement d'entreposage ?)*.

  La hauteur de la travée peut être limitée par plusieurs facteurs :
  - stabilité de la charge palettisée ;
  - capacité des colis ;
  - capacité de la palette ;
  - hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé ;
  - hauteur disponible du bâtiment.

  Les hauteurs des travées des équipements d'entreposage sont limitées par une ou plusieurs de ces facteurs.
  - Cas 1 : limitée par la stabilité de la charge palettisée; limitée par la capacité des colis; limitée par la capacité de la palette.
  - Cas 2 : limitée par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé ; limitée par la hauteur disponible du bâtiment.
  - Cas 3 : limitée par la hauteur disponible du bâtiment.
- Profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées) *(quelle profondeur en nombre de charges palettisées peut-on atteindre avec cet équipement d'entreposage ?).*

La profondeur de la travée est exprimée soit en chiffre exact comme pour le palettier à simple profondeur qui présente une travée d'une charge palettisée en profondeur, soit en une limite inférieure ou une limite supérieure avec les signes d'inégalités (≤ ou ≥), soit un intervalle.

- Nombre de références idéalement requis *(combien de références sont idéalement requises pour un fonctionnement approprié de cet équipement d'entreposage ?)*.

  Certains équipements d'entreposage sont conçus pour un nombre de références de produits élevé comme le palettier à simple profondeur, alors que d'autres sont plus utiles pour un nombre de références de produits faible comme la palettisation en masse.

- Nombre de charges palettisées par référence idéalement requis *(combien de charges palettisées par référence sont idéalement requises pour un fonctionnement approprié de cet équipement ?)*.

  Certains équipements d'entreposage sont conçus pour un nombre élevé de charges palettisées par référence de produit comme la palettisation en masse, alors que d'autres sont plus utiles pour un nombre faible de charges palettisées par référence de produit comme le palettier à simple profondeur.

- Flux des charges palettisées idéalement requis *(pour quel niveau de flux de charges palettisées cet équipement d'entreposage est idéalement adapté ?).*

  Certains équipements d'entreposage sont conçus pour un flux de charges palettisées élevé comme le palettier à simple profondeur, alors que d'autres sont plus utiles pour un flux de charges palettisées moyen comme le palettier à double profondeur.

- Accessibilité à chaque charge palettisée *(quel est le degré d'accessibilité à chaque charge palettisée ?).*

  L'accessibilité à chaque charge palettisée est élevée avec certains équipements d'entreposage comme le palettier à simple profondeur ou très faible comme pour l'entreposage de masse.

- Utilisation de l'espace *(quel est la densité ou le degré d'utilisation de l'espace disponible dans l'entrepôt par cet équipement d'entreposage ?).*

  Ce critère indique le degré d'utilisation de l'espace dédié à l'entreposage. La présence des allées de service impacte sur ce degré. Plus il y a des allées de service, plus le degré d'utilisation

de l'espace est faible, et moins il y a d'allées de service, plus le degré d'utilisation de l'espace est élevé.

- Flexibilité *(quel est le degré de flexibilité de cet équipement d'entreposage face aux changements d'implantation ?)*.

  Certains équipements d'entreposage sont plus flexibles aux changements et à la reconfiguration que d'autres. Plus l'équipement est complexe, plus la flexibilité est faible comme c'est le cas des systèmes d'entreposage automatisés.

- Coefficient d'occupation des alvéoles *(quel est le degré d'occupation des alvéoles d'entreposage offert par cet équipement d'entreposage ?).*

  Le coefficient d'occupation des alvéoles n'est pas le même pour tous les équipements d'entreposage. Certains équipements tels que le palettier à simple profondeur permettent une occupation des alvéoles très élevée parce que chaque alvéole est accessible. L'occupation baisse lorsque chaque alvéole n'est pas accessible, c'est le cas par exemple du palettier à accumulation statique.

- Coût d'installation *(quel est le coût engagé pour l'installation de cet équipement d'entreposage ?).*

  Le coût d'installation est fonction de la complexité de l'équipement d'entreposage. Plus l'équipement est sophistiqué, plus le coût d'installation est élevé, c'est le cas par exemple du système d'entreposage automatisé à accumulation dynamique. Le coût d'installation est nul pour l'entreposage de masse puisqu'aucun équipement n'est utilisé.

4.3.3 Critères de l'équipement de manutention destiné aux charges palettisées

- Vitesse d'opération *(quelle est la vitesse d'opération lors de placement et de retrait des charges palettisées dans cet équipement d'entreposage ?)*.

  La vitesse d'opération fait référence à la vitesse des opérations de placement et de retrait des charges palettisées dans les équipements d'entreposage. Ces opérations incluent différentes vitesses :

  - vitesse de déplacement de la structure de l'équipement d'entreposage telle que c'est le cas du palettier mobile ;
  - vitesse de circulation dans l'allée de service ;

- vitesse de prise et de dépôt des charges dans les alvéoles ;
- vitesse de déplacement des charges à l'intérieur des équipements d'entreposage telles que c'est le cas du palettier à accumulation dynamique ou palettier satellite.

4.3.4 Caractéristiques du milieu

L'entreposage de masse ainsi que les équipements d'entreposage nécessitent une surface du sol qui soit lisse et plane. Le poids supporté par l'équipement sera limité par la capacité portante du sol c'est-à-dire la capacité portante des fondations ou de la dalle. Un renforcement du plancher sera à prévoir si nécessaire. Le poids et les dimensions de la charge palettisée doivent respecter la charge maximale admissible ainsi que les dimensions de chaque alvéole. La charge nominale du palettier doit être bien affichée. Le moindre changement sur la structure doit être recalculé et validé par les compétences appropriées (fabricant ou ingénieur) (Colloc, 1977; Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) & Association sectorielle transport entreposage (ASTE), 2009; Devys, 1985; Institut national de recherche et de sécurité (INRS) & Syndicat des industries de matériels de manutention, 2001; Syndicat des industries de matériels de manutention, 1983b).

Les palettiers avec transtockeurs sont simultanément conçus avec le bâtiment. La structure des palettiers sert généralement d'ossature de support au bâtiment les abritant (Colloc, 1977; Rushton et al., 2014). Toutes les contraintes sur le dimensionnement et la capacité de ces structures doivent être prises en compte dès le départ. Les autres équipements avec chariot élévateur standard ou pour allées étroites peuvent être conçus et adaptés à des structures de bâtiment existantes (Rushton et al., 2014).

Les équipements avec transtockeurs sont généralement appropriés pour les endroits à prix de location ou de vente élevé (Rushton et al., 2014). Les entrepôts frigorifiques ont des coûts d'exploitation élevés.

4.4 Fiches techniques des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées

4.4.1 Aperçu général

Les professionnels du domaine d'entreposage et de la manutention, auteurs des différents livres, aide-mémoires et encyclopédie, utilisent différents types d'expression pour caractériser les équipements d'entreposage. Certaines sources telles que Rushton et al. (2014) ou Tompkins et Smith (1998) utilisent soit des grilles de notation (1 à 5 ou 1 à 10), soit des pourcentages. D'autres sources telles que Tompkins et al. (2010) ou Roux (2011) utilisent le langage flou exprimé sous forme de qualificatifs (très faible, faible, moyen, élevé, très élevé, haut, bas, etc.). Généralement, les sources utilisent les trois types de caractérisation en même temps, c'est le cas par exemple de (Rushton et al., 2014) et (Kulwiec, 2008b). Il a été possible d'harmoniser les données pour établir les fiches techniques de chaque système d'entreposage.

La méthode de caractérisation ainsi utilisée pour les critères de performance est le langage flou à part un critère et ceux de la charge palettisée. Le critère « profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées) » est soit un chiffre exact, soit une limite inférieure ou supérieure, soit un intervalle. Le critère « nombre de charges palettisées par référence idéalement requis » est parfois en chiffre exact, c'est le cas des équipements à double profondeur. Certaines données ne sont pas exactement associées à la lettre à des sources, c'est lorsqu'il est écrit en bas « adaptation de la source couplée ». Elles sont adaptées à partir des informations fournies par la(es) source(s).

L'ANNEXE G fournit toutes les fiches techniques des quinze systèmes d'entreposage. La section suivante 4.4.2 décrit le format de présentation des fiches.

4.4.2 Présentation des fiches techniques des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées

Numéro du système d'entreposage

Nom du système d'entreposage

<u>Système d'entreposage 1</u> : XXX

Nom de l'équipement de manutention

Nom de l'équipement d'entreposage

Critères de caractérisation

Titre du groupe des critères de caractérisation

YYY avec ZZZ

Critères de la charge palettisée	
Défauts de construction de paletée tolérés	Croisement médiocre[1]
Défauts de forme de paletée tolérés	Bosse[1]
Défauts d'occupation de la surface de la palette tolérés	Occupation au mieux[1]
Autres types de défauts de paletée tolérés	Retrait ; faible débord[1]
Défauts d'emballage des colis tolérés	Aucun[1]
État de palette toléré	Bon[1]
Critères de l'équipement d'entreposage	
Méthode de rotation des stocks	PEPS[2]
Agression des charges palettisées	Aucune[2]
Nombre de références idéalement requis	Élevé[2]
Nombre de charges palettisées par référence idéalement requise	Faible[2]
Flux des charges palettisées idéalement requis	Élevé[3, 4]
Hauteur de la travée	Limitée par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé ; limitée par la hauteur disponible du bâtiment[1]
Profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées)	1[2]

Caractéristiques du système

Indices des sources. Selon le bas de la page, le 3 indique que c'est une adaptation d'une source couplée. La source couplée est le 4 (CCST et ASTE, 2009).

[1] (Devys, 1985)
[2] (Rushton et al., 2014)
[3] Adaptation de la source couplée
[4] (Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) & Association sectorielle transport entreposage (ASTE), 2009)

<u>Système d'entreposage 1</u> : XXX (suite et fin)

	YYY avec ZZZ
Critères de l'équipement d'entreposage	
Accessibilité à chaque palette	Excellente [1, 2]
Utilisation d'espace	Moyenne [2]
Flexibilité aux changements	Élevée[2]
Coefficient d'occupation des alvéoles	Très élevé [2]
Coût d'installation	Moyen[2]
Critères de l'équipement de manutention	
Vitesse d'opération	Très élevée[2]

[1] (Tompkins et al., 2010)

[2] (Rushton et al., 2014)

4.5 Conclusion

Les systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées sont utilisables selon les spécifications et les contraintes de chaque contexte. Ils sont composés d'équipements d'entreposage couplés à des équipements de manutention destinés aux charges palettisées. Les fabricants des ÉME proposent différentes dimensions et des structures configurables selon les besoins. Chaque système d'entreposage est conçu pour une charge connue. La reconfiguration du système doit être approuvée par le fabricant ou un ingénieur (Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) & Association sectorielle transport entreposage (ASTE), 2009). Tous les systèmes d'entreposage ne sont pas adaptés à toutes les charges palettisées. Une analyse des défauts de la charge palettisée est nécessaire. Tous les équipements ne fonctionnent pas avec les mêmes méthodes de rotation des stocks et n'ont pas les mêmes caractéristiques selon les critères de performance.

Ce chapitre présente les fiches techniques desdits systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. C'est un travail bibliographique qui a été réalisé avec beaucoup de minutie. Il s'agit d'une collecte et une organisation des connaissances sur les systèmes d'entreposage. Les connaissances sont en grande partie présentées dans la littérature sous une forme littéraire descriptive et parfois quelques tableaux comparatifs incomplets sont réalisés. La contribution de ce chapitre réside dans la standardisation des connaissances existantes en les présentant dans des fiches techniques validées par un industriel.

Les fiches techniques dressent les portraits des différents systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. D'autres systèmes d'entreposage peuvent exister, seulement les systèmes d'entreposage documentés dans la littérature et qui ont leurs preuves sont répertoriés dans ce travail. Les données sont sujettes à des mises à jour régulières pour inclure les développements technologiques.

Le chapitre suivant présente une méthodologie de sélection desdits systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées.

CHAPITRE 5 SÉLECTION DES SYSTÈMES D'ENTREPOSAGE DESTINÉS AUX CHARGES PALETTISÉES

5.1 Introduction

L'entrepôt est généralement composé de plusieurs aires : aire de réception, aire d'expédition, aire d'entreposage, et aire de préparation de commande. Chaque aire est associée à une mission spécifique. Rushton et al. (2014) indiquent que l'aire d'entreposage occupe jusqu'à 50 % de l'espace de l'entrepôt. Les auteurs indiquent aussi que les unités de charge palettisées sont les plus utilisées dans les entrepôts à hauteur de 49,2 % contre les bacs à 14,4 % et les caisses à 18,6 %. La conception de l'implantation de la zone d'entreposage destinée aux charges palettisées nécessite la sélection des ÉME. Elle est une des premières étapes à franchir. C'est une décision stratégique, car elle détermine les coûts d'investissement en équipements.

Afin de rédiger le cahier de charges, les ingénieurs ont besoin d'identifier les types des ÉME qui conviennent à la situation de manutention et d'entreposage. Il s'agit de faire une sélection parmi tous les types d'équipements existants. Chaque type d'équipement appartient à une catégorie et possède différents modèles vendus par les fournisseurs. Les outils existants d'aide à la décision dans ce processus de sélection des équipements de manutention sont décrits dans la revue de littérature. La revue montre que les outils de sélection des équipements d'entreposage sont presque absents.

Nous proposons une méthodologie pour faire la sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. Il a été possible d'identifier quinze types de systèmes d'entreposage pour les charges palettisées comme présentés dans le chapitre précédent. La méthodologie de sélection est constituée d'un raisonnement en logique floue, d'un SBC et d'une adaptation de la méthode floue d'aide à la décision multicritère FTOPSIS *(Fuzzy Technique of Order Preference by Similarity to Ideal Solution).* Elle tient compte des critères qualitatifs, quantitatifs et de coût. Les critères de sélection sont les dix-neuf critères caractérisant les systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées comme présentés au Chapitre précédent. La Figure 5.1 présente la démarche globale de

sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. Les étapes de la démarche sont expliquées et détaillées dans les sections suivantes du chapitre.

Dans la section 5.2, le problème est décrit. Ensuite, les données d'entrée, l'approche de modélisation du problème, la méthodologie de sélection proposée, un exemple illustratif et une analyse de sensibilité sont successivement présentés aux sections 5.3, 5.4, 5.5 et 5.6. Finalement, une conclusion et une discussion sur la proposition sont faites à la section 5.7.

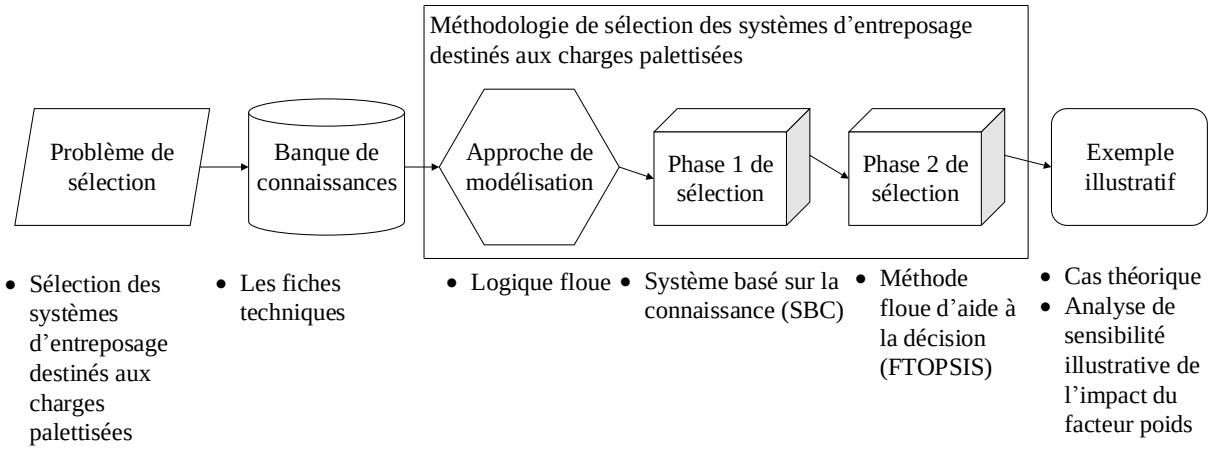


Figure 5.1 : Démarche globale de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées

5.2 Description du problème

Pour faire la sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées, les solutions purement mathématiques d'optimisation sont freinées dans la résolution du problème, car il est difficile de prendre en compte les critères qualificatifs. L'intelligence artificielle à travers les systèmes experts ou les systèmes basés sur la connaissance est proche du raisonnement d'expert humain et est adoptée dans plusieurs travaux de recherche selon la revue de littérature du Chapitre 2. Étant donné que le problème de sélection est un problème d'aide à la décision, les méthodes d'aide à la décision multicritère sont elles aussi exploitées dans la littérature. L'approche hybride fait aussi ses preuves en combinant les systèmes experts et les méthodes d'aide à la décision multicritère ou les modèles d'optimisation. C'est une approche intéressante à adopter

dans la mesure où elle permet d'utiliser deux forces de résolution en même temps, c'est aussi le cas de cette proposition.

5.3 Données d'entrée

La méthodologie développée utilise deux types de données d'entrée comme présentées dans les fiches techniques de l'ANNEXE G : systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées et critères de sélection caractérisant les systèmes d'entreposage.

5.3.1 Systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées

Les systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées en nombre de quinze présentés ci-dessous sont identifiés par S_k avec $k = 1$ à 15. Le Tableau 5.1 présente les systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées et leurs identifiants.

Tableau 5.1 : Systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées

Identifiants	**Systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées**
S_1	Entreposage de masse avec chariot élévateur standard
S_2	Palettier à simple profondeur avec chariot élévateur standard
S_3	Palettier à double profondeur avec chariot élévateur standard
S_4	Palettier à simple profondeur avec chariot élévateur pour allées étroites
S_5	Palettier à accumulation statique ouvert sur une face avec chariot élévateur standard
S_6	Palettier à accumulation statique ouvert sur deux faces avec chariot élévateur standard
S_7	Palettier à accumulation dynamique avec chariot élévateur standard
S_8	Palettier à gravité inversée avec chariot élévateur standard
S_9	Palettier satellite ouvert sur une face avec chariot élévateur standard
S_{10}	Palettier satellite ouvert sur deux faces avec chariot élévateur standard
S_{11}	Palettier mobile avec chariot élévateur standard
S_{12}	Système d'entreposage automatisé à simple profondeur
S_{13}	Système d'entreposage automatisé à double profondeur
S_{14}	Système d'entreposage automatisé à accumulation dynamique
S_{15}	Système d'entreposage automatisé à accumulation statique

5.3.2 Critères de sélection caractérisant les systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées

Les dix-neuf critères de sélection sont divisés en deux types : critères critiques et critères de performance. Les treize premiers critères sont dits critiques CC_i avec $j = 1$ à 13. Ils permettent

d'avoir une présélection. Ils portent sur des aspects technologiques qui restreignent leur utilisation. Les six autres critères sont des critères de performance notes CP_j avec $j = 1$ à 6. Ils permettent de classer par ordre de performance les systèmes présélectionnés. Le Tableau 5.2 présente les critères de sélection ainsi que leurs identifiants et les caractéristiques des systèmes d'entreposage selon les critères.

Tableau 5.2 : Critères de sélection et caractéristiques des systèmes d'entreposage destinés aux charges selon les critères

Identifiants	**Critères de sélection**	**Caractéristiques des systèmes d'entreposage**
CC_1	Défauts de construction de paletée tolérés	Aucun défaut; croisement médiocre
CC_2	Défauts de forme de paletée tolérés	Aucun défaut; bosse
CC_3	Défauts d'occupation de la surface de la palette tolérés	Aucun défaut; occupation au mieux
CC_4	Autres types de défauts de paletée tolérés	Retrait; faible débord
CC_5	Défauts d'emballage des colis tolérés	Aucun défaut
CC_6	État de palette toléré	Bon
CC_7	Méthode de rotation des stocks	PEPS; DEPS
CC_8	Agression des charges palettisées	Aucune; choc de dessus; pression de dessus; choc latéral et pression latérale
CC_9	Hauteur de la travée	Limitée par la stabilité de la charge palettisée; limitée par la capacité des colis; limitée par la capacité de la palette (cas 1); limitée par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé ; limitée par la hauteur disponible du bâtiment (cas 2); limitée par la hauteur disponible du bâtiment (cas 3)
CC_{10}	Profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées)	Valeur numérique
CC_{11}	Nombre de références idéalement requis	Très faible; faible; moyen; élevé; très élevé
CC_{12}	Nombre de charges palettisées par référence idéalement requis	Très faible; faible; moyen; élevé; très élevé

Tableau 5.2 : Critères de sélection et caractéristiques des systèmes d'entreposage destinés aux charges selon les critères (suite et fin)

Identifiants	Critères de sélection	Caractéristiques des systèmes d'entreposage
CC_{13}	Flux des charges palettisées idéalement requis	Très faible; faible; moyen; élevé; très élevé
CP_1	Accessibilité à chaque palette	Très faible; faible; moyenne; élevée; très élevée; excellente
CP_2	Utilisation d'espace	Très faible; faible; moyenne; élevée; très élevée
CP_3	Flexibilité aux changements	Très faible; faible; moyenne; élevée; très élevée
CP_4	Coefficient d'occupation des alvéoles	Très faible; faible; moyen; élevé; très élevé
CP_5	Coût d'installation	Nul; faible; moyen; élevé; très élevé
CP_6	Vitesse d'opération	Très faible; faible; moyen; élevé; très élevé

5.4 Approche de modélisation

La modélisation et le résonnement se font par logique floue. La logique floue est fondée sur la théorie des ensembles flous développée en 1965 par le professeur Lotfi Askar Zadeh (Zadeh, 1965). L'inadaptation de la logique classique, de la théorie classique des ensembles et des calculs des probabilités à la modélisation des phénomènes réels dans toutes leurs complexités a conduit à cette idée. Sachant que le monde réel est modelé d'incertitude et d'imprécision, il serait vain d'idéaliser les modèles mathématiques dans la simplicité et la précision. La logique floue permet donc de modéliser les notions incertaines et imprécises. L'information est dite incertaine lorsqu'il existe un doute sur sa véracité. Elle est dite imprécise lorsqu'il est difficile de l'exprimer clairement (Bouchon-Meunier, 2007). Des données du problème étudié sont incertaines et imprécises. Certaines caractéristiques des systèmes d'entreposage peuvent être qualifiées d'imprécises.

Un ensemble flou A sous-ensemble d'un univers U est défini par une fonction d'appartenance μ_A qui a ses valeurs dans l'intervalle des réels $[0,1]$. À chaque élément $t \in U$ est associé une valeur de $\mu_A(t)$ avec $0 \leq \mu_A(t) \leq 1$. La fonction d'appartenance s'écrit alors $\mu_A : U \rightarrow [0,1]$. Chaque ensemble flou est représenté par sa fonction d'appartenance. La forme de la fonction d'appartenance dépend de l'application. Elle peut être soit trapézoïdale, soit triangulaire, soit une autre forme. Chaque forme de représentation est définie par des paramètres (Figures 5.3 et 5.3).

Pour le cas du problème de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées, l'univers U qui est les valeurs des degrés d'importance représentées sur l'axe des abscisses change d'un critère de sélection à un autre. Il change parce que les unités de mesure des critères sont

différentes. Par exemple, le critère Vitesse d'opération prend des valeurs mesurées en mètre par seconde (m/s) et le critère Utilisation d'espace prend des valeurs mesurées en pourcentage (%).

Il n'est pas obligatoire d'obtenir les mêmes formes de fonctions d'appartenance des ensembles flous des critères de sélection, comme sur la Figure 5.4. Il est possible d'avoir, pour le même critère de sélection, différentes formes de représentation des fonctions d'appartenance des ensembles flous. Les paramètres de chaque fonction d'appartenance sont supposés être mesurés, discutés et validés. Différents projets de recherche sont à mener pour pouvoir mesurer avec des simulateurs les performances de chaque système d'entreposage par rapport aux critères afin de définir les formes et les paramètres des fonctions d'appartenance des ensembles flous.

La forme de représentation triangulaire dite aussi triangulaire gauche/droite (GD) est employée pour décrire le problème de sélection des systèmes d'entreposage (Figure 5.3). Elle est définie par deux fonctions G(t) et D(t), une valeur noyau m, et deux paramètres α_2 et β_2. Par exemple, la notation de l'ensemble flou $Faible$ devient $Faible = (m, \alpha_2, \beta_2)_{GD} = (4, 2, 1)_{GD}$. D'autres formes de représentation des fonctions d'appartenance des ensembles flous auraient pu être utilisées telles que la forme trapézoïdale. La différence entre la forme triangulaire et la forme trapézoïdale résiderait dans le nombre de paramètres de chaque forme (Figure 5.2 et Figure 5.3). Les paramètres sont les éléments manipulés dans les différentes opérations sur les ensembles flous (Kaufmann, 1973; Onut et al., 2009; Tong-Tong, 1995; Zadeh, 1965). Les formes réelles des fonctions d'appartenance seront définies par les mesures qui seront obtenues par les simulateurs des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées des travaux futurs. Dans cette première tentative de la méthodologie de sélection, des valeurs indépendantes prédéterminées sont utilisées pour approcher les formes des fonctions d'appartenance et montrer les chevauchements entre les ensembles. Elles permettent de traduire les expressions floues en ensembles flous pour effectuer les calculs nécessaires. La Figure 5.4 schématise les représentations des ensembles flous du critère Accessibilité à chaque palette.

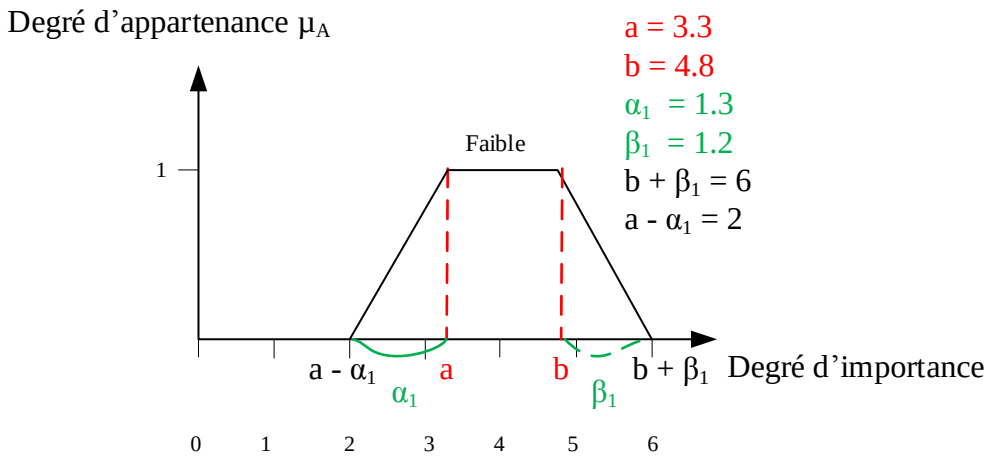


Figure 5.2 : Représentation trapézoïdale d'un ensemble flou

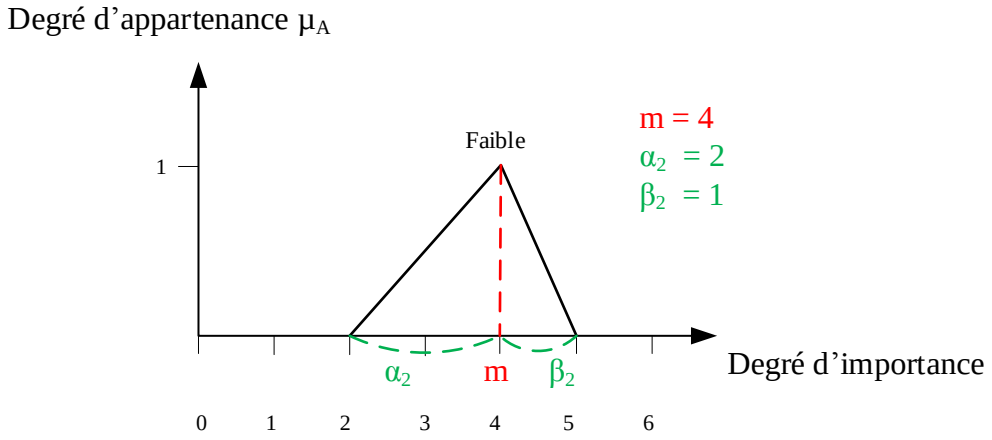


Figure 5.3 : Représentation triangulaire d'un ensemble flou

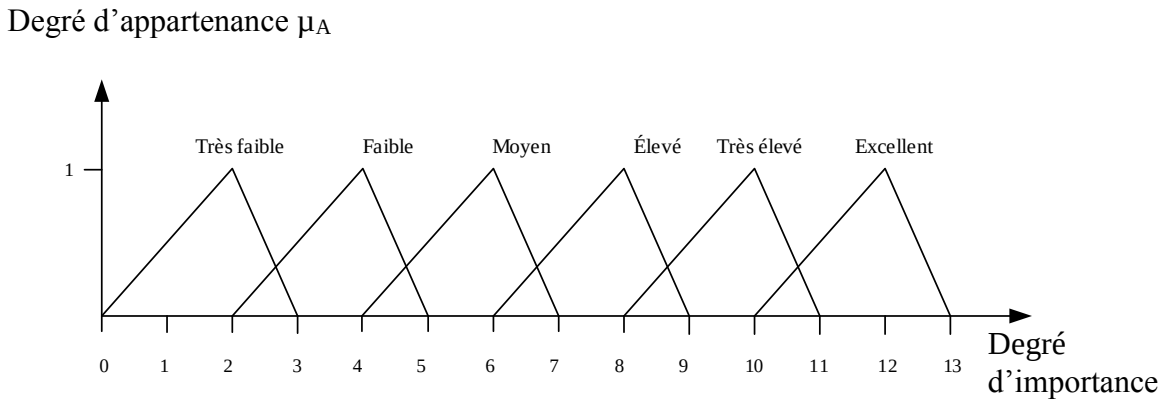


Figure 5.4 : Représentation des ensembles flous du critère Accessibilité à chaque palette

5.5 Méthodologie de sélection

5.5.1 Phase 1 : SBC

5.5.1.1 Principe

Dans une première phase, le système propose à l'utilisateur de donner des choix sur les critères critiques. Il n'est pas obligé de spécifier toutes les valeurs à tous les critères critiques de sélection. Il y a treize critères critiques. Selon les choix de l'utilisateur, le SBC sélectionne tous les systèmes qui répondent aux critères selon les règles Si-Alors. Le système explore la base de connaissances pour extraire les systèmes ayant les caractéristiques souhaitées par l'utilisateur. La liste obtenue est analysée davantage dans la Phase 2 de résolution.

5.5.1.2 Connaissances sur les systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées

Les connaissances sur les systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées sont les résultats des fiches techniques du Chapitre 4. Nous les avons compilés pour former une base de données sous forme de matrices présentées dans les Tableaux 5.3 et 5.4. Les caractéristiques de chaque système sont présentées dans leur langage flou. Les transformations nécessaires des données pour le traitement sont faites dans les étapes qui suivent de la méthodologie de sélection.

Tableau 5.3 : Connaissances sur les systèmes d'entreposage selon les critères critiques

	CC_1	CC_2	CC_3	CC_4	CC_5	CC_6	CC_7	CC_8	CC_9	CC_{10}	CC_{11}	CC_{12}	CC_{13}
S_1	Aucun; croisement médiocre	Aucun	Aucun; occupation au mieux	Débord	Aucun	Bon	DEPS	Choc de dessus; pression de dessus	Cas 1	≤ 10	Faible	Élevé	Élevé
S_2	Aucun; croisement médiocre	Aucun; bosse	Aucun; occupation au mieux	Retrait; faible débord	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 2	1	Élevé	Faible	Élevé
S_3	Aucun; croisement médiocre	Aucun; bosse	Aucun; occupation au mieux	Retrait; faible débord	Aucun	Bon	DEPS	Aucune	Cas 2	2	Élevé	4 à 5	Moyen
S_4	Aucun; croisement médiocre	Aucun; bosse	Aucun; occupation au mieux	Retrait; faible débord	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 2	1	Élevé	Faible	Élevé
S_5	Aucun; croisement médiocre	Aucun; bosse	Aucun; occupation au mieux	Retrait; faible débord	Aucun	Bon	DEPS	Aucune	Cas 2	5 à 10	Moyen	Élevé	Moyen
S_6	Aucun; croisement médiocre	Aucun; bosse	Aucun; occupation au mieux	Retrait	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 2	≥ 6	Faible	Élevée	Moyen
S_7	Aucun	Aucun; bosse	Aucun	Retrait	Aucun	Bon	PEPS	Choc latéral; pression latérale	Cas 2	≥ 5	Moyen	Élevée	Élevé
S_8	Aucun	Aucun; bosse	Aucun	Retrait	Aucun	Bon	DEPS	Choc latéral ; pression latérale	Cas 2	3 à 6	Élevé	Faible	Moyen
S_9	Aucun; croisement médiocre	Aucun; bosse	Aucun; occupation au mieux	Retrait	Aucun	Bon	DEPS	Aucune	Cas 2	≥ 10	Moyen	Moyen	Moyen
S_{10}	Aucun; croisement médiocre	Aucun; bosse	Aucun; occupation au mieux	Retrait	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 2	≥ 10	Moyen	Moyen	Élevé
S_{11}	Aucun; croisement médiocre	Aucun; bosse	Aucun; occupation au mieux	Retrait; faible débord	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 2	1	Élevé	1 à 2	Faible
S_{12}	Aucun; croisement médiocre	Aucun; bosse	Aucun; occupation au mieux	Retrait; faible débord	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 3	1	Très élevé	Faible	Très élevé
S_{13}	Aucun; croisement médiocre	Aucun; bosse	Aucun; occupation au mieux	Retrait; faible débord	Aucun	Bon	DEPS	Aucune	Cas 3	2	Très élevé	4 à 5	Très élevé
S_{14}	Aucun	Aucun; bosse	Aucun	Retrait	Aucun	Bon	PEPS	Choc latéral; pression latérale	Cas 3	≥ 10	Moyen	Élevé	Très élevé
S_{15}	Aucun; croisement médiocre	Aucun; bosse	Aucun; occupation au mieux	Retrait; faible débord	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 3	≥ 10	Moyen	Élevé	Très élevé

Tableau 5.4 : Connaissances sur les systèmes d'entreposage selon les critères de performance

	CP_1	CP_2	CP_3	CP_4	CP_5	CP_6
S_1	Très faible	Moyen	Très élevée	Moyen	Nul	Élevée
S_2	Excellente	Faible	Élevée	Très élevé	Faible	Élevée
S_3	Moyenne	Moyen	Élevée	Élevé	Faible	Moyenne
S_4	Excellente	Moyen	Élevée	Très élevé	Moyen	Très élevée
S_5	Très faible	Élevée	Élevé	Moyen	Moyen	Moyenne
S_6	Très faible	Élevée	Élevée	Très élevée	Élevé	Élevée
S_7	Très faible	Élevée	Moyenne	Élevée	Élevé	Très élevée
S_8	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Élevé	Très élevée
S_9	Très faible	Moyenne	Élevé	Très élevée	Élevé	Moyenne
S_{10}	Très faible	Moyenne	Élevée	Très élevée	Élevé	Moyenne
S_{11}	Excellente	Élevée	Moyenne	Très élevé	Très élevé	Faible
S_{12}	Excellente	Moyenne	Très faible	Très élevé	Moyen	Très élevée
S_{13}	Moyenne	Moyenne	Très faible	Élevée	Moyen	Très élevée
S_{14}	Très faible	Très élevée	Très faible	Très élevée	Moyen	Moyenne
S_{15}	Très faible	Très élevée	Très faible	Très élevée	Moyen	Moyenne

5.5.2 Phase 2 : méthode FTOPSIS

En utilisant les résultats de la Phase 1, le système exploite les données floues pour proposer un choix ordonné de la liste des systèmes recommandés. Ce travail se fait à l'aide de la méthode FTOPSIS en suivant les étapes suivantes. Le choix de cette méthode repose sur sa simplicité et sa rapidité par rapport aux autres comme la méthode AHP. C'est aussi une méthode qui correspond pertinemment au contexte du problème posé (Onut et al., 2009).

Le problème de sélection peut être décrit ainsi :

- Un ensemble de *n* possibilités de systèmes d'entreposage $A = \{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$

  avec $n \in I \; et \; |I| = 15$;

- Une matrice de nombres flous $X = \{x_{ij} | \; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, 6\}$ des possibilités A_i $(i = 1, 2, \dots, n)$ par rapport aux critères de performance CP_j $(j = 1, 2, \dots, 6)$;
- Un ensemble de critères de performance $CP = \{CP_1, CP_2, \dots, CP_j, \dots, CP_6\}$;
- Un ensemble de poids de chaque critère de sélection $PCP = \{PCP_1, PCP_2, \dots, PCP_j, \dots, PCP_6\}$

  avec $PCP_j \in [1,10]$;

5.5.2.1 Étape 1 : conversion des données en nombres flous

Les termes flous (très faible, faible, etc.) sont convertis en nombres flous. Ces nombres flous sont des variables appelées x_{ij}. Les nombres flous forment une matrice X comme ci-dessous. Elle possède six colonnes (six critères) et n lignes (n possibilités de systèmes d'entreposage).

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{16} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{26} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{n6} \end{bmatrix}$$

5.5.2.2 Étape 2 : normalisation des nombres flous

Les nombres flous x_j^* et x_j^- représentent respectivement les nombres flous maximums et minimums des systèmes sur chaque critère j. On applique les x_j^* aux critères de maximisation (CP_1 $à$ CP_5) et les x_j^- au critère de minimisation CP_6 Ils sont notés :

$$x_j^* = \left(m_j^*, \alpha_j^*, \beta_j^*\right)_{GD} \qquad \text{(Éq. 5.1)}$$

$$x_j^- = \left(m_j^-, \alpha_j^-, \beta_j^-\right)_{GD} \qquad \text{(Éq. 5.2)}$$

Les nombres flous sont positifs :

$x_{ij} > 0,\ x_j^* > 0,\ x_j^- > 0.$

Les nombres flous x_{ij} sont normalisés en y_{ij} en utilisant les arithmétiques de division entre deux nombres flous de type GD.

$$y_{ij} = \begin{cases} \dfrac{x_{ij}}{x_j^*} = \dfrac{\left(m_{ij}, \alpha_{ij}, \beta_{ij}\right)_{GD}}{\left(m_j^*, \alpha_j^*, \beta_j^*\right)_{GD}} \\ \dfrac{x_j^-}{x_{ij}} = \dfrac{\left(m_j^-, \alpha_j^-, \beta_j^-\right)_{GD}}{\left(m_{ij}, \alpha_{ij}, \beta_{ij}\right)_{GD}} \end{cases}$$

$$= \begin{cases} \dfrac{x_{ij}}{x_j^*} = \left(\dfrac{m_{ij}}{m_j^*}, \dfrac{m_{ij}\beta_j^* + m_j^*\alpha_{ij}}{{m_j^*}^2}, \dfrac{m_{ij}\alpha_j^* + m_j^*\beta_{ij}}{{m_j^*}^2}\right)_{GD} & \text{(Éq. 5.3)} \\ \dfrac{x_j^-}{x_{ij}} = \left(\dfrac{m_j^-}{m_{ij}}, \dfrac{m_j^-\beta_{ij} + m_{ij}\alpha_j^-}{{m_{ij}}^2}, \dfrac{m_j^-\alpha_{ij} + m_{ij}\beta_j^-}{{m_{ij}}^2}\right)_{GD} & \text{(Éq. 5.4)} \end{cases}$$

5.5.2.3 Étape 3 : pondération des nombres flous normalisés

Les nombres flous normalisés y_{ij} sont ensuite pondérés avec les poids $PCP_j > 0$ pour trouver les nombres flous normalisés pondérés z_{ij}.

$$z_{ij} = PCP_j \otimes y_{ij} = \begin{cases} \left(PCP_j \frac{m_{ij}}{m_j^*}, PCP_j \frac{m_{ij}\beta_j^* + m_j^*\alpha_{ij}}{{m_j^*}^2}, PCP_j \frac{m_{ij}\alpha_j^* + m_j^*\beta_{ij}}{{m_j^*}^2}\right)_{GD} & \text{(Éq. 5.5)} \\ \left(PCP_j \frac{m_j^-}{m_{ij}}, PCP_j \frac{m_j^-\beta_{ij} + m_{ij}\alpha_j^-}{{m_{ij}}^2}, PCP_j \frac{m_j^-\alpha_{ij} + m_{ij}\beta_j^-}{{m_{ij}}^2}\right)_{GD} & \text{(Éq. 5.6)} \end{cases}$$

En multipliant par les poids des critères de sélection, la matrice floue normalisée pondérée devient :

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{16} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{26} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{n6} \end{bmatrix} \qquad n \in I$$

5.5.2.4 Étape 4 : détermination des solutions idéales

On détermine la solution idéale positive A^*, c'est-à-dire le système d'entreposage qui possède les plus grandes valeurs z_{ij} à chaque critère. Elle est obtenue par :

$$A^* = \left\{\left(\max_i z_{ij} | j \in J\right)\right\}_{i=1,2,\dots,n;\, j=1,2,\dots,6} \quad \text{(Éq. 5.7)}$$

On détermine la solution idéale négative A^-, c'est-à-dire le système d'entreposage qui possède les plus petites valeurs z_{ij} à chaque critère est obtenue par :

$$A^- = \left\{\left(\min_i z_{ij} | j \in J\right)\right\}_{i=1,2,\dots,n;\, j=1,2,\dots,6} \quad \text{(Éq. 5.8)}$$

5.5.2.5 Étape 5 : calcul des distances

On calcule la distance entre chaque possibilité de système d'entreposage et la solution idéale A^*. Elle est obtenue par :

$$D_i^* = \sum_{j=1}^{6} d\left(z_{ij}, z_j^*\right) \quad i = 1, \dots, n;\ n \in I \quad \text{(Éq. 5.9)}$$

Avec

$$d(z_{ij}, z_j^*) = \sqrt{1/3\left[(m_{ij} - m_j^*)^2 + (\alpha_{ij} - \alpha_j^*)^2 + (\beta_{ij} - \beta_j^*)^2\right]} \text{ (Éq. 5.10)}$$

On calcule la distance entre chaque possibilité de système d'entreposage et la solution idéale négative A^- . Elle est obtenue par :

$$D_i^- = \sum_{j=1}^{6} d(z_{ij}, z_j^-) \quad i = 1, 2, \dots, n;\ n \in I \text{ (Éq. 5.11)}$$

5.5.2.6 Étape 6 : calcul des coefficients de proximité relative

On calcule les coefficients de proximité relative (CPR_i^*) pour chaque possibilité. Il s'agit de déterminer les degrés de proximité de chaque possibilité à la solution idéale. Ils sont obtenus par :

$$CPR_i^* = \frac{D_i^-}{D_i^* + D_i^-} \qquad i = 1, 2, \dots, n;\ n \in I \quad \text{(Éq. 5.12)}$$

5.5.2.7 Étape 7 : classement des possibilités

On classe les possibilités par ordre décroissant des CPR_i^*. Ces coefficients représentent le degré de performance de chaque possibilité. Le système d'entreposage qui convient le plus au problème est donc classé premier et celui qui lui convient moins est classé dernier. La méthodologie propose des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées en liste ordonnée.

5.6 Exemple illustratif

Une mise en exercice de la méthodologie est nécessaire pour justifier les résultats. À l'instar des articles de la revue de littérature proposant des exemples illustratifs, le problème présenté dans cette partie est un cas théorique. Il a pour but de démontrer que la méthodologie développée est fonctionnelle et pourrait par conséquent réussir un test industriel réel. Une analyse de sensibilité est faite dans ce sens. Elle permet d'évaluer l'impact que pourraient avoir les changements initiaux sur les résultats obtenus.

Dans un premier temps, l'utilisateur est invité à répondre aux questions posées par le SBC. Les réponses fournies sont reportées de la manière suivante. Les questions sont notées Q et les réponses R.

Q1 : *Quelle est la méthode de rotation des stocks préconisée? PEPS / DEPS* (CC_7).

R1 : PEPS.

Q2 : *Quels sont les défauts de forme de paletée présents? Aucun / Bosse* (CC_2).

R2 : Bosse.

Q3 : *Quels sont les défauts de construction de paletée présents? Aucun / Croisement médiocre* (CC_1).

R3 : Croisement médiocre.

Q4 : *Quelle est la profondeur privilégiée de la travée (en nombre de charges palettisées)?* (CC_{10}).

R4 : 1.

En compilant ces réponses, les systèmes d'entreposage qui répondent aux choix sont déterminés. Notamment, les systèmes d'entreposage pour ce cas sont les suivants.

- A_1 : Palettier à simple profondeur avec chariot élévateur standard (S_2);
- A_2 : Palettier à simple profondeur avec chariot élévateur pour allées étroites (S_4);
- A_3 : Palettier mobile avec chariot élévateur standard (S_{11});
- A_4 : Système d'entreposage automatisé simple profondeur (S_{12});

L'utilisateur donne des poids en nombre entier compris entre 1 et 10 à chacun des six critères de performance suivants :

- CP_1 : Accessibilité à chaque palette;
- CP_2 : Utilisation de l'espace;
- CP_3 : Flexibilité aux changements;
- CP_4 : Coefficient d'occupation des alvéoles;
- CP_5 : Coût d'installation;
- CP_6 : Vitesse d'opération.

Pour ce cas, tous les poids sont égaux à 1. Une analyse de sensibilité qui évalue les changements en fonction des poids est présentée par la suite.

En progressant sur la Phase 2 de la résolution du problème, il est à noter que le nombre de possibilités de systèmes d'entreposage présélectionnés pour ce problème est $n = 4$. Elles doivent être classées par ordre d'importance de performance.

Les étapes 1, 2 et 3 calculent respectivement la Matrice floue (voir Tableau 5.5), la Matrice floue normalisée (voir Tableau 5.6) et la Matrice floue normalisée pondérée (voir Tableau 5.7). Ces matrices requièrent la détermination des nombres flous maximums et minimums des systèmes d'entreposage sur chaque critère selon les équations (Éq. 5.1) et (Éq. 5.2). Le calcul de la normalisation des nombres flous se fait en utilisant les équations (Éq. 5.3) et (Éq. 5.4). Les nombres flous normalisés pondérés se calculent selon les équations (Éq. 5.5) et (Éq. 5.6). Les valeurs des nombres ne changent pas pour ce cas-ci puisque les poids sont égaux à 1. À l'étape 4, les solutions idéales positive et négative $A^{*} et\ A^{-}$ sont déterminées selon les équations (Éq. 5.7) et (Éq. 5.8). Ces solutions permettent de calculer les distances $D_i^{*}\ et\ D_i^{-}$ qui séparent chaque possibilité A_i et les solutions idéales $A^{*} et\ A^{-}$. Les équations (Éq. 5.9), (Éq. 5.10) et (Éq. 5.11) sont utilisées à cet effet. Les valeurs sont présentées au Tableau 5.8.

Tableau 5.5 : Matrice floue du cas étudié

	CP_1	CP_2	CP_3	CP_4	CP_5	CP_6
A_1	12.00, 2.00, 1.00	4.00, 2.00, 1.00	8.00, 2.00, 1.00	10.00, 2.00, 1.00	4.00, 2.00, 1.00	8.00, 2.00, 1.00
A_2	12.00, 2.00, 1.00	6.00, 2.00, 1.00	8.00, 2.00, 1.00	10.00, 2.00, 1.00	6.00, 2.00, 1.00	10.00, 2.00, 1.00
A_3	12.00, 2.00, 1.00	8.00, 2.00, 1.00	6.00, 2.00, 1.00	10.00, 2.00, 1.00	10.00, 2.00, 1.00	4.00, 2.00, 1.00
A_4	12.00, 2.00, 1.00	6.00, 2.00, 1.00	2.00, 2.00, 1.00	10.00, 2.00, 1.00	6.00, 2.00, 1.00	10.00, 2.00, 1.00

Légende :

	x_j^{*}
	x_j^{-}

Tableau 5.6 : Matrice floue normalisée du cas étudié

	CP_1	CP_2	CP_3	CP_4	CP_5	CP_6
A_1	1.00, 0.25, 0.25	0.50, 0.31, 0.25	1.00, 0.38, 0.38	1.00, 0.30, 0.30	1.00, 0.75, 0.75	0.80, 0.28, 0.26
A_2	1.00, 0.25, 0.25	0.75, 0.34, 0.31	1.00, 0.38, 0.38	1.00, 0.30, 0.30	0.67, 0.44, 0.39	1.00, 0.30, 0.30
A_3	1.00, 0.25, 0.25	1.00, 0.38, 0.38	0.75, 0.34, 0.31	1.00, 0.30, 0.30	0.40, 0.24, 0.18	0.40, 0.24, 0.18
A_4	1.00, 0.25, 0.25	0.75, 0.34, 0.31	0.25, 0.28, 0.19	1.00, 0.30, 0.30	0.67, 0.44, 0.39	1.00, 0.30, 0.30

Tableau 5.7 : Matrice floue normalisée pondérée du cas étudié

	CP_1	CP_2	CP_3	CP_4	CP_5	CP_6
A_1	1.00, 0.25, 0.25	0.50, 0.31, 0.25	1.00, 0.38, 0.38	1.00, 0.30, 0.30	1.00, 0.75, 0.75	0.80, 0.28, 0.26
A_2	1.00, 0.25, 0.25	0.75, 0.34, 0.31	1.00, 0.38, 0.38	1.00, 0.30, 0.30	0.67, 0.44, 0.39	1.00, 0.30, 0.30
A_3	1.00, 0.25, 0.25	1.00, 0.38, 0.38	0.75, 0.34, 0.31	1.00, 0.30, 0.30	0.40, 0.24, 0.18	0.40, 0.24, 0.18
A_4	1.00, 0.25, 0.25	0.75, 0.34, 0.31	0.25, 0.28, 0.19	1.00, 0.30, 0.30	0.67, 0.44, 0.39	1.00, 0.30, 0.30

Légende :

	z_j^*
	z_j^-

Tableau 5.8 : Distances et coefficients de proximité relative

Possibilité	D_i^*	D_i^-	CPR_i^*	Classement
A_1	0.42	1.25	0.749	1
A_2	0.48	1.18	0.710	2
A_3	1.07	0.60	0.360	4
A_4	0.93	0.73	0.440	3

Les CPR_i^* des possibilités par rapport à la solution idéale sont calculés avec l'équation (Éq. 5.12) et les valeurs sont dans le même Tableau 5.8. Ceci permet de classer les quatre possibilités de systèmes d'entreposage en ordre décroissant des performances. Le système le plus performant vient en premier et le dernier sera celui qui conviendrait le moins au problème étudié. Le classement obtenu est $A_1 > A_2 > A_4 > A_3$ puisque $0.749 > 0.710 > 0.440 > 0.360$. Les poids attribués à chacun des six critères de sélection ont leurs impacts dans la proposition. Il est donc recommandé à l'utilisateur de considérer en premier plan le système d'entrepose A_1 qui est un palettier à simple profondeur avec chariot élévateur standard.

En examinant les CPR_i^* des deux possibilités $A_3 = 0.360$ et $A_4 = 0.440$, on remarque que ces deux valeurs sont proches. Ce très faible écart a engendré une différence reflétée sur le classement (A_4 soit classée devant A_3). D'après ce constat, ainsi que par la rigueur de l'approche scientifique utilisée pour le développement du système hybride flou multicritère basé sur la connaissance pour la sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées, une analyse de sensibilité doit être réalisée.

5.7 Analyse de sensibilité illustrative de l'impact des poids

L'analyse de sensibilité illustrative porte sur l'évaluation des changements susceptibles lorsque certaines modifications sont enregistrées en entrée de la méthodologie. Elle porte notamment sur l'impact des choix des poids des critères de sélection par l'utilisateur. L'impact des poids serait visible sur les équations Éq. 5.5 et Éq. 5.6, il s'agit de le montrer avec un exemple de plusieurs cas d'étude possédant différents poids.

La méthodologie de sélection est utilisable dans tous les problèmes de sélection de systèmes d'entreposage de charges palettisées. L'utilisateur précise au système les spécificités de son

problème d'entreposage. La précision est faite par l'attribution des poids (entre 1 et 10) aux critères de performance qui sont au nombre de six. Dépendamment de ses moyens et contraintes, l'utilisateur spécifie les caractéristiques auxquelles il accorde plus d'importance. Parmi les six critères de performance, cinq d'entre eux sont à maximiser et le critère de coût est à minimiser.

Dans l'exemple illustratif de la méthodologie, les poids ont été tous mis à 1. Dans cette partie d'analyse de sensibilité, la question suivante a été posée : qu'est-ce qui arriverait à la proposition faite si les poids prenaient des valeurs autres que 1? Afin de répondre à cette question, neuf autres cas ont été étudiés. En somme, une évaluation sur dix cas est réalisée. Ces derniers démarrent avec les possibilités de systèmes d'entreposage qui sont suggérées par la présélection de la Phase 1. Ces possibilités sont les mêmes que l'étude de cas détaillé en exemple. Concernant la Phase 2 de résolution, différents poids aléatoires de 1 à 10 ont été attribués aux dix cas après plusieurs essais pour faire ressortir des changements dans l'ordre de classement des possibilités. Les valeurs des poids sont présentées dans le Tableau 5.9.

Tableau 5.9 : Poids des dix cas

Poids $(\boldsymbol{PCP_j})$	***Cas₁***	***Cas₂***	***Cas₃***	***Cas₄***	***Cas₅***	***Cas₆***	***Cas₇***	***Cas₈***	***Cas₉***	***Cas₁₀***
PCP_1	1	2	8	1	5	10	10	5	10	10
PCP_2	1	1	2	9	2	2	1	1	10	10
PCP_3	1	5	3	3	1	2	1	2	2	2
PCP_4	1	1	1	8	7	1	1	3	3	10
PCP_5	1	1	1	1	5	10	5	1	1	1
PCP_6	1	5	3	1	5	1	1	1	1	10

En réalisant les matrices et effectuant les calculs de la méthode développée, différents résultats sont obtenus pour les dix cas. Les coefficients de performance dits de proximité relative sont tels que présentés au Tableau 5.10. En transformant le Tableau 5.10 en Tableau 5.11 par la conversion des chiffres en ordre de classement, on remarque que les positions des possibilités changent en fonction des poids des critères de performance indiqués.

D'abord, dans cinq cas sur dix, la possibilité A_1 se classe première. Cela signifie qu'elle est la meilleure solution pour le problème à 50 % des cas. La possibilité A_1 est classée deux fois en deuxième position, deux fois en troisième position, et une fois en quatrième position. Elle serait ainsi la solution appropriée au problème posé, peu importe le poids des critères de performance.

Deuxième remarque, la dernière position est occupée généralement par les solutions A_3 à 70 % des cas, et par A_4 à 20 % des cas. Autrement dit, la dernière possibilité A_3 ne conviendrait pas

idéalement au problème. Ce résultat signifie que si l'utilisateur veut éliminer une des quatre solutions proposées par le système, la possibilité A_3 est la meilleure candidate à 70 %.

On remarque aussi que la solution A_4 ne vient jamais en première position et presque jamais en deuxième position. Elle est classée deuxième une seule fois dans le Cas_{10}. Dans 70 % des cas, elle est classée en troisième position. Son médiocre classement pourrait appuyer la décision d'éliminer une autre possibilité. Les deux meilleures solutions sont les possibilités A_1 *et* A_2.

Tableau 5.10 : Coefficients de proximité relative des dix cas

Possibilité	Cas_1	Cas_2	Cas_3	Cas_4	Cas_5	Cas_6	Cas_7	Cas_8	Cas_9	Cas_{10}
A_1	0.749	0.817	0.733	0.433	0.788	0.904	0.893	0.802	0.353	0.478
A_2	0.710	0.901	0.823	0.661	0.650	0.513	0.535	0.771	0.619	0.771
A_3	0.360	0.368	0.419	0.725	0.160	0.161	0.153	0.425	0.747	0.449
A_4	0.440	0.441	0.446	0.389	0.571	0.393	0.420	0.346	0.432	0.659

Tableau 5.11 : Classement des possibilités des dix cas

Classement	Cas_1	Cas_2	Cas_3	Cas_4	Cas_5	Cas_6	Cas_7	Cas_8	Cas_9	Cas_{10}
1	A_1	A_2	A_2	A_3	A_1	A_1	A_1	A_1	A_3	A_2
2	A_2	A_1	A_1	A_2	A_2	A_2	A_2	A_2	A_2	A_4
3	A_4	A_4	A_4	A_1	A_4	A_4	A_4	A_3	A_4	A_1
4	A_3	A_3	A_3	A_4	A_3	A_3	A_3	A_4	A_1	A_3

Cette analyse montre que l'attribution des poids aux critères de performance est déterminante. Une possibilité peut occuper une meilleure position par l'obtention de grands poids aux quelques critères où elle est plus valorisée que les autres possibilités. Cela engendrera que d'autres possibilités soient écartées de la proposition à faire. L'utilisateur doit ainsi tenir compte de cet aspect et bien réaliser l'impact du choix des poids.

5.8 Conclusion et recommandations

Ce chapitre traite le problème de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées composés par des équipements d'entreposage et des équipements de manutention. La méthodologie développée pour la sélection des systèmes d'entreposage a adopté un résonnement en logique floue et elle est composée d'un SBC et de la méthode FTOPSIS. Elle est générique et n'est pas limitée à un contexte d'entreprise donné.

La méthodologie permet de sélectionner les meilleures solutions et les classer par ordre de performance. Elle arrive à résoudre le problème en tenant compte du caractère flou des données. Une analyse de sensibilité a été faite afin d'évaluer les changements engendrés par la variation des poids des critères de performance.

Les formes de représentation des ensembles flous et leurs valeurs sont descriptives dans ce chapitre. Différents projets de recherche sont à mener pour pouvoir mesurer avec des simulateurs les performances de chaque système d'entreposage par rapport aux critères. Chaque système d'entreposage pourra être simulé en définissant différents indicateurs de performance. Les simulations permettront d'obtenir les différents paramètres des fonctions d'appartenance représentant les ensembles flous. Une discussion autour des résultats et leur validation sont nécessaires. Il est possible de trouver que dans la forme actuelle de l'exploitation de l'approche floue pourrait rejoindre d'une certaine manière l'approche de Likert qui serait moins complexe. Il s'agit plutôt d'une première tentative de la méthodologie de sélection avec des valeurs descriptives en attendant de faire d'autres publications en utilisant les mesures des fonctions d'appartenance obtenues par lesdits simulateurs. Les poids des critères pourraient être exprimés par l'utilisateur en termes flous. Le caractère flou des poids est à prévoir dans l'amélioration de la méthodologie de sélection dans des travaux futurs. L'automatisation de la méthodologie avec une interface informatique conviviale est recommandée afin de permettre aux industriels et concepteurs de l'utiliser plus facilement.

Le chapitre suivant présente une autre approche de résolution du problème de sélection. Il s'agit de l'extraction automatique de règles de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées à l'aide d'un algorithme de type apprentissage machine.

CHAPITRE 6 EXTRACTION DE RÈGLES DE SÉLECTION DES SYSTÈMES D'ENTREPOSAGE DESTINÉS AUX CHARGES PALETTISÉES

6.1 Introduction

L'exemple illustratif de la méthodologie de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées basée sur le SBC et FTOPSIS du chapitre précédent a permis de faire plusieurs constats et poser différentes questions. L'exemple montre que seulement quatre critères critiques peuvent être suffisants pour la présélection de possibilités de systèmes d'entreposage au lieu de treize critères disponibles. Est-ce que les dix-neuf critères sont nécessaires pour obtenir une proposition de systèmes d'entreposage? L'utilisateur a choisi les critères critiques auxquels il a voulu spécifier leurs valeurs. Est-il possible de prédéfinir des règles de sélection que l'utilisateur devra suivre pour obtenir une proposition de systèmes d'entreposage? Comment définir et justifier ces règles de sélection?

Ce chapitre propose une extraction automatique de règles de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. Les systèmes d'entreposage et leurs critères de caractérisation sont décrits dans les Chapitres 4 et 5. Nous avons implanté un algorithme de classification appartenant à la famille des algorithmes de l'intelligence artificielle de type apprentissage machine, le C4.5 de Quinlan (1993). Nous retrouvons les applications de ce dernier dans la littérature pour traiter les problèmes d'extraction d'informations (Dancey, Bandar, & McLean, 2007; De Vos & Van Landeghem, 2004; Frank & Kramer, 2004). L'algorithme a permis d'élaborer un arbre de décision. L'ordre des critères de décision est justifié mathématiquement. Des règles de sélection des systèmes d'entreposage sont extraites. La Figure 6.1 présente la démarche globale d'extraction des règles de sélection. Les étapes de la démarche sont expliquées et détaillées dans les sections suivantes du chapitre.

La suite du chapitre est structurée comme suit. La section 6.2 rappelle les différents systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées et les différents critères de caractérisation. Avant d'explorer les données, nous discutons dans la section 6.3 la possibilité de caractériser les systèmes d'entreposage en langage vulgaire (au sens de Kaufmann (1973) et Tong-Tong (1995) i.e. langage non flou) et les relations avec la caractérisation en langage flou disponible. La section 6.4 présente

le processus d'extraction d'information à partir des données. La section 6.5 présente l'implantation du C4.5 et l'arbre de décision obtenu pour la sélection des cas particuliers des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. La section 6.6 présente le guide de sélection des cas particuliers proposé par la lecture de l'arbre de décision. La section 6.7 propose une discussion sur l'arbre de décision proposé. Finalement, la section 6.8 conclut ce chapitre et fait certaines recommandations.

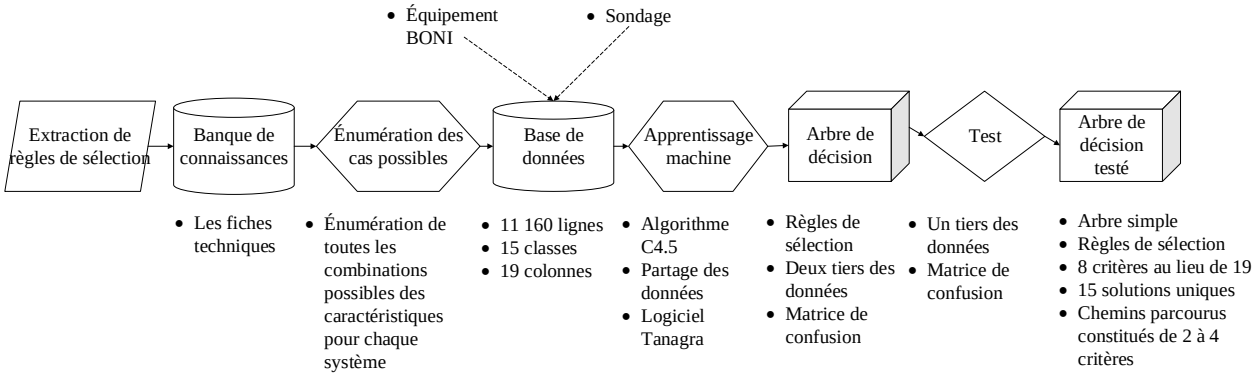


Figure 6.1 : Démarche d'extraction des règles de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées

6.2 Systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées et critères de caractérisation

Les systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées sont les mêmes cités dans les chapitres précédents (S_1 à S_{15}). Les critères de caractérisation sont aussi les mêmes, mais nous ne distinguons pas les critères critiques des ceux de performance. Les dix-neuf identifiants des critères $CC_1, \dots, CC_{13}, CP_1, .., CP_6$ sont remplacés par C_1 à C_{19}. Plus de descriptions peuvent être retrouvées dans la Liste des sigles et abréviations.

Nous rappelons qu'il a été possible d'harmoniser les données en utilisant la caractérisation à l'aide du langage flou pour la plupart des dix-neuf critères selon les termes flous : très faible, faible, moyen, élevé, très élevé, excellent. Le C_{10}, profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées), est soit un chiffre exact, soit une limite inférieure ou supérieure, soit un intervalle. Le C_{12}, nombre de charges palettisées par référence idéalement requis, est un intervalle ou un terme flou.

6.3 Caractérisation à l'aide du langage vulgaire

Les six premiers critères (C_1 à C_6) sont spécifiques à la charge palettisée qui sera entreposée dans les systèmes d'entreposage. Les valeurs de ces six critères sont des expressions précises : cassure, croisement médiocre, bosse, escalier, gîte, tubérosité, caverne, couloir, cheminée, poche, faible débord, retrait, faible résistance, surdimensionnement, bon, et mauvais. Les défauts sont des formes de déformation qui apparaissent sur la charge palettisée et sont visibles à l'œil nu. Ils peuvent apparaitre durant le processus de palettisation ou en cours de vie de la charge palettisée. La caractérisation à ce niveau consiste de définir si tel système peut s'accommoder à tel défaut. Ces expressions n'ont pas besoin d'être converties en chiffres ou vulgarisées.

Le C_7 traduit le mode de rotation des stocks du système d'entreposage. Les deux modes de rotation sont : premier entré, premier sorti (PEPS) et dernier entré, premier sorti (DEPS). La caractérisation à ce niveau consiste à définir le mode de rotation du système et il n'y a pas un besoin de chiffrer ou vulgariser PEPS et DEPS.

Le C_8 permet d'identifier les formes d'agressions physiques subies par les charges palettisées lors de la pose, du retrait et de séjour de cette dernière dans les systèmes d'entreposage. Elles dépendent de la structure des systèmes d'entreposage et peuvent être des chocs et des pressions de dessus ou latéraux. La caractérisation à ce niveau n'a pas besoin d'être vulgarisée.

Le C_9 spécifie les causes limitatives des hauteurs des travées des systèmes d'entreposage. Trois cas de figure sont identifiés. Le premier cas regroupe trois causes de limite de la hauteur, le deuxième cas regroupe deux causes et le troisième cas présente une seule cause. Cette forme de caractérisation relève du langage flou.

Le C_{10} spécifie la profondeur des systèmes d'entreposage en nombre d'unités de charge (charge palettisée). Les valeurs de ce critère sont déjà vulgarisées et chiffrées. Elles sont soit des nombres entiers (1; 2), soit des intervalles (3 à 6; 5 à 10), soit des limites inférieures ou supérieures (≥ 5; ≥ 6; ≥ 10; ≤ 10). Cette forme de caractérisation relève du langage flou traduit par les intervalles et les limites inférieures et supérieures.

Le reste des critères de caractérisation est au nombre de neuf. Ces critères sont tous exprimés en langage flou avec les termes très faible, faible, moyen, élevé, très élevé, et excellent. La valeur Nul est ajoutée particulièrement pour le C_{18}. Dans l'objectif de rendre vulgaires (au sens de Kaufmann

(1973) et Tong-Tong (1995) i.e. non flou) les valeurs floues, nous classons ces neuf critères selon trois groupes.

Le premier groupe est formé par le C_{15} qui peut être vulgarisé et modélisé. Ce critère traduit le taux d'utilisation de l'espace par les systèmes d'entreposage et revient à dimensionner la zone d'entreposage. Certains auteurs ont abordé ce sujet de dimensionnement comme Matson et White (1981) qui ont calculé l'espace moyen au sol nécessaire pour quatre différentes alternatives d'entreposage (entreposage de masse, entreposage à simple profondeur, entreposage à double profondeur, et entreposage à grande profondeur). Différentes simulations sont menées dans cette étude et il est possible de comparer les systèmes sur ce critère. La comparaison soutient effectivement les valeurs floues de C_{15}, plus on réduit les allées de service et on utilise les hauteurs, plus on économise de l'espace.

Le deuxième groupe est composé des critères C_{18} et C_{19}. Ces deux critères peuvent être vulgarisés. Le C_{18} exprime le coût d'installation et le C_{19} exprime la vitesse d'opération. Différents modèles de calcul spécifiques aux systèmes d'entreposage sont disponibles dans la littérature. Concernant le C_{18}, la vitesse est une fonction de temps et de distance, c'est pourquoi les chercheurs parlent de temps de cycle et de temps de voyage pour les systèmes d'entreposage automatique avec transtockeur (Bozer & White, 1984; Chang, Wen, & Lin, 1995). Pour les autres systèmes d'entreposage avec chariot élévateur, ils parlent de distances et de temps de mouvement dans les allées de service, dans les allées de circulation, en mouvement vertical, de passage d'allée de service en allée de circulation et de prise et de dépôt d'unité de charge (Matson & White, 1981). Concernant le C_{19}, en se basant sur les travaux de Zollinger (1975), Tompkins et al. (2010) présentent une forme de calcul des coûts des systèmes d'entreposage automatique avec transtockeur (coût du bâtiment, du transtockeur et du palettier). De leur côté, Matson et White (1981) proposent une forme de calcul des coûts de l'entreposage de masse et des indications pour les autres systèmes d'entreposage. Il devient difficile de se baser sur ces quelques résultats pour mener des comparaisons puisque les variables et les paramètres considérés changent d'un système d'entreposage à un autre et que nous n'avons pas toutes les données. Le langage flou des experts et des professionnels devient une issue.

Le troisième groupe est formé par les critères C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{16} et C_{17}. Nous n'avons pas trouvé des méthodes de vulgarisation et de modélisation des caractéristiques traduites pour ces critères. Il

existe dans la littérature quelques valeurs en pourcentage pour certains systèmes sur certains critères tel que le C_{16} dans Manley et al. (2008) et le C_{17} dans Rushton et al. (2014). D'autres auteurs emploient directement le langage flou, ce qui a permis de garder les expressions floues pour tous ces six critères.

6.4 Extraction d'information

Connaissant la performance de chaque système d'entreposage destiné aux charges palettisées en fonction des dix-neuf critères de caractérisation, l'interrogation qui se pose est de savoir comment lire lesdits Tableaux 5.3 et 5.4. La méthodologie la plus utilisée pour ce genre de problème dans la littérature est le système expert. Le système expert permet de raisonner comme un expert humain en manutention et entreposage en utilisant les règles Si-Alors jusqu'à aboutir à un choix ou à de multiple choix. Autant pour le système expert, il est difficile de prouver le critère par lequel il faut commencer le test.

Afin de contourner ce problème et justifier mathématiquement le choix de commencer par un critère, une piste serait d'utiliser un algorithme qui permet de tester avec tous les critères pour savoir les plus appropriés. Nous avons implanté un algorithme appartenant à la famille des algorithmes supervisés de classification. Le choix de l'algorithme a été arrêté sur le C4.5 qui a été publié par Quinlan (1993) et utilisé pour les problèmes similaires de génération de connaissances à partir des données (Dancey et al., 2007; De Vos & Van Landeghem, 2004; Frank & Kramer, 2004). Il appartient à la famille des algorithmes de l'intelligence artificielle de type Machine learning. Le C4.5 est une amélioration de l'algorithme ID3. Il permet de construire un arbre de décision de types n-aires en mesurant la qualité du partitionnement à chaque séparation. Un partitionnement de qualité est créé lorsque le degré de désordre (mélange) dans chaque classe est minimisé. L'algorithme C4.5 est capable de fonctionner avec des valeurs discrètes ou continues, ce qui est le cas de notre problème. Il est aussi capable de fonctionner avec des valeurs manquantes. L'algorithme permet d'obtenir un arbre réduit en utilisant l'élagage des feuilles, c'est-à-dire couper des branches de l'arbre selon un niveau de confiance préalablement défini. Finalement, une matrice de confusion est calculée afin d'évaluer l'arbre obtenu selon le pourcentage de données mal classées.

Le gain informationnel $\mathrm{Gain}(C_x)$ est calculé à chaque partitionnement. Il traduit l'évolution globale de l'entropie $\mathrm{Info(T)}$. Les formules de calcul de l'entropie et du cas sont selon les équations Éq. 6.1 et Éq. 6.2 avec T, S_j (S_1 à S_{15}), et C_x (C_1 à C_{19}) représentant respectivement l'ensemble des données d'apprentissage, les classes, et les critères. Les systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées représentent les classes.

$$\mathrm{Info(T)} = -\sum_{j=1}^{k} \frac{\mathrm{freq}(S_j,\mathrm{T})}{|\mathrm{T}|} * \log_2\left(\frac{\mathrm{freq}(S_j,\mathrm{T})}{|\mathrm{T}|}\right) \qquad \text{(Éq. 6.1)}$$

$$\mathrm{Gain}(C_x) = \mathrm{Info(T)} - \sum_{i=1}^{n} \frac{|\mathrm{T_i}|}{|\mathrm{T}|} * \mathrm{Info}(\mathrm{T_i}) \qquad \text{(Éq. 6.2)}$$

La fonction entropie Info(T) calcule le niveau de désordre dans un nœud de l'arbre de décision à élaborer. Le désordre est le mélange de classes dans le nœud. Les fréquences des classes dans le nœud sont calculées.

La séparation des branches à partir d'un nœud est réalisée en utilisant le critère qui permet de créer le moins de désordre possible dans les nœuds fils. Les gains informationnels Gain(C_x) obtenus avec chaque critère sont calculés et comparés. Le gain informationnel mesure l'évolution de l'entropie. L'objectif est de minimiser le désordre c'est-à-dire l'entropie et maximiser le gain informationnel. Ce processus se répète jusqu'à obtenir le plus faible désordre possible dans les nœuds.

Selon Quinlan (1993), il existe trois possibilités lors de l'élaboration de l'arbre.

- Les données de T appartiennent toutes à une seule classe S_j, alors T est une feuille identifiant la classe S_j.
- T n'a pas de données, alors T est une feuille associée à la classe la plus fréquente du nœud parent.
- T contient des données appartenant à plusieurs classes, alors T est partitionné en plusieurs sous-ensemble T_1, T_2, …, T_n où Ti contient les données qui correspondent à un résultat du test au nœud.

6.5 Base de données

À partir de la base de connaissances des Tableaux 5.3 et 5.4, nous avons généré une base de données composée de 11 160 entrées (lignes), quinze différentes classes représentées par les quinze systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées (S_1 à S_{15}) et dix-neuf critères de décision

représentés par les dix-neuf critères de caractérisation (C_1 à C_{19}). La base de connaissances regroupe les meilleures pratiques des applications des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées répertoriées dans la littérature par les experts comme James A. Tompkins (Tompkins et al., 2010).

La génération de la base de données a permis de créer des zones d'interférence entre les quinze systèmes d'entreposage. Une énumération des cas possibles pour chaque système d'entreposage a été réalisée en faisant presque toutes les combinaisons de valeurs pour chaque système d'entreposage. Les cas possibles ont été répétés pour permettre à l'algorithme de reconnaitre les cas similaires et apprendre à ne pas faire d'erreurs. Par exemple, le système S_1 prend plusieurs valeurs sur des critères C_1, C_3, C_8 et C_{10} (Tableau 6.1) et une seule valeur sur d'autres critères. Selon le Tableau 6.2, les combinaisons possibles avec ces valeurs qui caractérisent toutes S_1 ont été réalisées, ce qui veut dire que S_1 est retrouvé dans tous ces cas possibles. Les zones d'interférence apparaissent lorsque des systèmes d'entreposage distincts possèdent des combinaisons de valeurs de critères similaires ou presque similaires. L'algorithme doit être capable d'identifier les spécificités de chaque système parmi toutes les ressemblances.

L'ANNEXE H présente un extrait de la base de données. La plupart des critères possèdent des valeurs discrètes qui sont soit des valeurs floues soit des valeurs spécifiques. Le C_{10} (profondeur de la travée en nombre de charges palettisées) prend des valeurs continues. À chaque entrée a été attribuée une valeur aléatoire appartenant soit à l'intervalle ou la limite définie comme suit et visible dans les Tableaux 19 et 20, et l'extrait de la base de données de l'ANNEXE H.

- Si la profondeur a une valeur unique (1 ou 2), alors les mêmes valeurs sont utilisées et aucun nombre aléatoire n'est généré, c'est le cas de S_2, S_3, S_4, S_{11}, S_{12}, et S_{13}.
- Si la profondeur a un intervalle (3 à 6 et 5 à 10), le nombre aléatoire généré est dans les intervalles définis respectivement pour S_8 et S_5.
- Si la profondeur a une limite supérieure et qu'elle est égale à 10 (≤ 10), alors le nombre aléatoire généré est entre 1 et 10, c'est le cas de S_1.
- Si la profondeur a une limite inférieure et qu'elle est inférieure à 10 (≥ 5 et ≥ 6), alors le nombre aléatoire généré est soit entre 5 et 10, soit entre 6 et 10 respectivement, c'est le cas de S_6 et S_7.

- Si la profondeur a une limite inférieure et qu'elle est égale à 10 (≥ 10), le nombre aléatoire généré est entre 10 et 20, c'est le cas de S_9, S_{10}, S_{14} et S_{15} qui peuvent être plus denses et dépassés les 20 charges palettisées en profondeur.

Tableau 6.1 : Critères prenant plusieurs valeurs pour le système d'entreposage S_1 selon la base de connaissances

	C_1	C_3	C_8	C_{10}
S_1	Aucun; croisement médiocre	Aucun; occupation au mieux	Choc de dessus ; pression de dessus	≤ 10

Tableau 6.2 : Exemples d'énumération des cas possibles pour le système d'entreposage S_1

Classe	C_1	C_3	C_8	C_{10}
S_1	Aucun	Occupation au mieux	Pression de dessus	4
S_1	Aucun	Aucun	Pression de dessus	8
S_1	Aucun	Occupation au mieux	Choc de dessus	6
S_1	…	…	…	…

6.6 Arbre de décision

Lorsque les entrées sont très nombreuses comme c'est le cas, il n'est pas possible d'élaborer l'arbre de décision avec l'algorithme C4.5 manuellement. Nous avons exécuté le C4.5 sous le logiciel Tanagra 1.4.50 (Rakotomalala, 2005) avec toutes les données d'entrées, un niveau de confiance égale à 100 % et aucun élagage. L'environnement de travail a été Intel® Pentium® CPU N3530 2.16 GHz 64-bit.

Pour exécuter l'algorithme, nous avons séparé les données (11 160 entrées) en deux, données d'apprentissage et données de test. Pour notre cas, 67 % des données ont servi d'apprentissage (7 440 entrées) et 33 % ont servi de test (3 720 entrées). La colonne nommée Test_App de l'ANNEXE H présente un extrait de cette séparation et la colonne Ordre a permis de rendre les lignes de la base de données désordonnées pour faire apparaitre l'aspect aléatoire dans le traitement. Les pourcentages n'ont pas une signification particulière, il est nécessaire d'apprendre sur un plus grand nombre de données et tester sur le reste. Les classes des entrées des deux groupes sont initialement connues dans la base de données. À la suite de la phase d'apprentissage, un arbre de décision a été obtenu. La Figure 6.2 schématise l'arbre de décision pour la sélection des cas particuliers des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. Les losanges représentent les tests sur les critères et les cercles représentent les classes qui sont les systèmes d'entreposage

proposés à la fin du parcours de l'arbre. La taille des flèches (1 pt ou 6 pt) représente les différents chemins pour arriver à un choix de système d'entreposage.

La phase de test a permis de valider l'arbre de décision. Nous avons pu affecter une classe à chaque entrée de test en suivant l'arbre de décision de la Figure 6.2 réalisé après apprentissage. En langage algorithmique, il est dit que l'algorithme prédit la classe. Connaissant déjà les classes des entrées de test (classes réelles), nous les avons comparés aux classes prédites à l'aide de l'arbre de décision afin de mesurer la qualité des résultats obtenus. Ce processus de comparaison a été effectué en réalisant une matrice dite de confusion. Techniquement, lorsque la classe prédite est différente de la classe réelle, il est dit que l'entrée est mal classée. Le Tableau 6.3 présente la matrice de confusion du processus de test avec les bons et mauvais classements. Les colonnes indiquent les classes prédites et les lignes indiquent les classes réelles. Les entrées testées sont 3 720 divisées entre les quinze systèmes d'entreposage (classes), par exemple pour S_1 il y a 400 entrées de test et 440 pour S_{10}. Ces valeurs représentent le nombre de fois que chaque système apparait dans la base de données après génération et répétition des combinaisons possibles. La quantité des entrées est aléatoire sans signification particulière. Les entrées sont bien classées lorsque les classes prédites et les classes réelles sont les mêmes pour toutes les entrées. Le classement est idéal si l'on n'observe des valeurs non nulles que sur la diagonale de la matrice et des valeurs nulles ailleurs. Pour le cas étudié, il n'y a pas eu d'entrées mal classées représentées par les valeurs nulles de la matrice. La qualité de l'apprentissage est aussi mesurée initialement par une autre matrice de confusion. En faisant tous les calculs et aboutissant aux feuilles de l'arbre, l'algorithme attribue par lui-même à chaque feuille une classe. De la même manière que la prédiction est comparée à la réalité en phase de test, la matrice de confusion de la phase d'apprentissage vérifie si les classes attribuées aux entrées par l'algorithme sont différentes des classes de la base de données. Pour notre cas, l'apprentissage a été parfait sans entrées mal classées. La matrice de confusion de la phase d'apprentissage n'est pas présentée ici. Elle est similaire à la matrice de confusion de la phase de test (Tableau 6.3) avec uniquement un changement des valeurs sur la diagonale puisque les entrées d'apprentissage sont plus nombreuses que les entrées de test (7 440 au lieu de 3 720 entrées). Généralement, lorsque l'algorithme apprend avec un faible taux d'erreur, il est capable de prédire tout seul avec aussi un faible taux d'erreur.

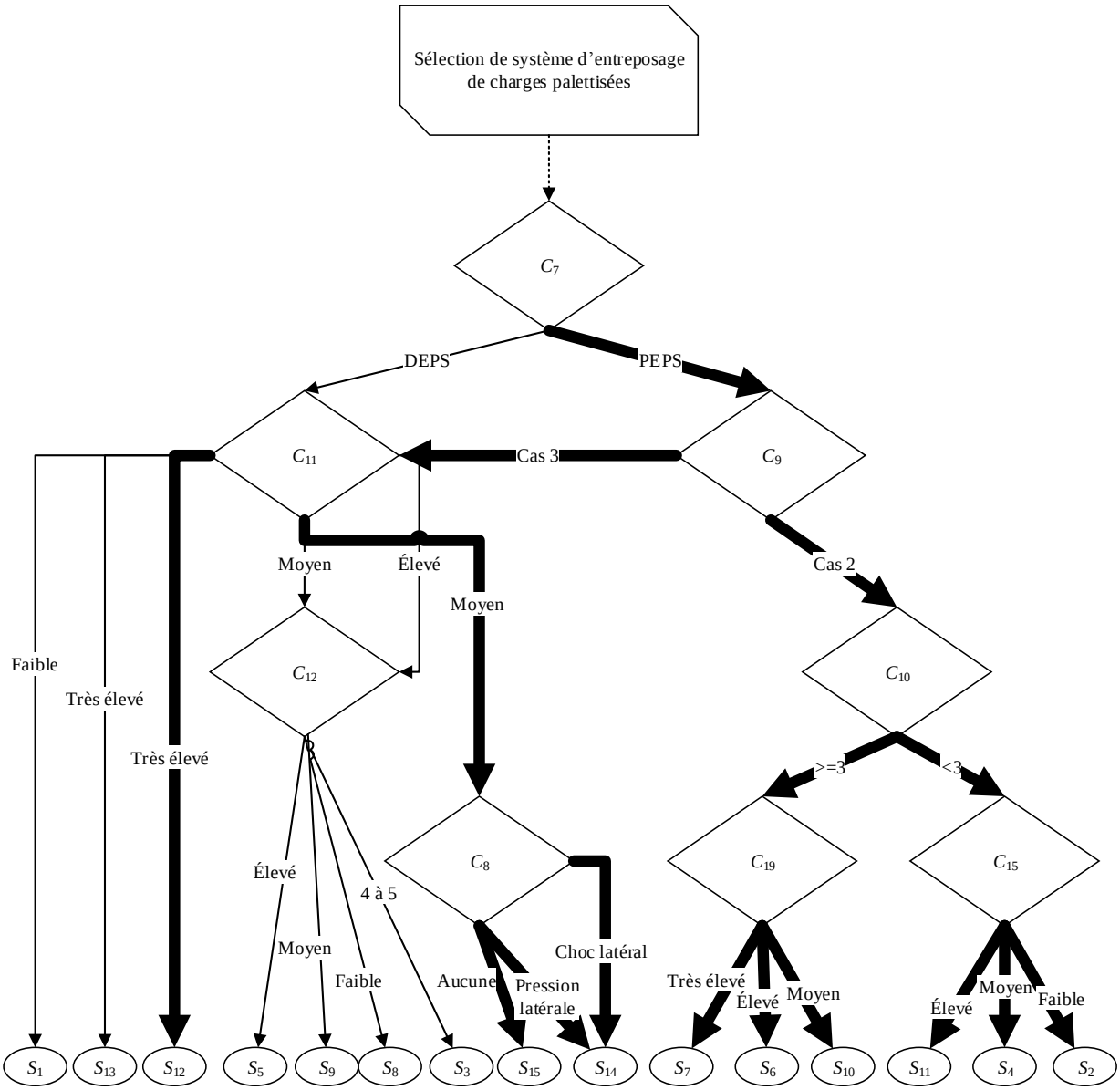


Figure 6.2 : L'arbre de décision pour la sélection des cas particuliers des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées

Tableau 6.3 : Matrice de confusion du test de l'arbre de décision pour la sélection des cas particuliers des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées

		Classes prédites															
		S_1	S_{10}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{15}	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	Total classes réelles
Classes réelles	S_1	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	400
	S_{10}	0	440	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	440
	S_{11}	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80
	S_{12}	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80
	S_{13}	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80
	S_{14}	0	0	0	0	0	220	0	0	0	0	0	0	0	0	0	220
	S_{15}	0	0	0	0	0	0	880	0	0	0	0	0	0	0	0	880
	S_2	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	80
	S_3	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	80
	S_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	80
	S_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	480	0	0	0	0	480
	S_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0	0	0	200
	S_7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	120	0	0	120
	S_8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0	60
	S_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	440	440
Total classes prédites		400	440	80	80	80	220	880	80	80	80	480	200	120	60	440	3720

6.7 Guide de sélection des cas particuliers des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées

La Figure 6.2 fournit des chemins de sélection composés de critères et de leurs valeurs. Ils aboutissent à des choix uniques de solution d'entreposage, et ce très rapidement. La lecture de l'arbre de décision constitue le guide de sélection des cas particuliers des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées.

- S_1, entreposage de masse avec chariot élévateur standard, est suggéré si une méthode de rotation des stocks DEPS est employée et que le nombre de références de produits est faible.
- S_{13}, système d'entreposage automatisé à double profondeur, est suggéré si une méthode de rotation des stocks DEPS est utilisée et que le nombre de références de produits est très élevé.
- S_{12}, système d'entreposage automatisé à simple profondeur, est suggéré si une méthode de rotation des stocks PEPS est employée, que la hauteur de la travée est uniquement limitée par la hauteur disponible du bâtiment, et que le nombre de références de produits est très élevé.

- S_5, palettier à accumulation statique ouvert sur une face avec chariot élévateur standard, est suggéré si une méthode de rotation des stocks DEPS est employée, que le nombre de références de produits est moyen ou élevé et que le nombre de charges palettisées par référence est élevé.
- S_9, palettier satellite ouvert sur une face avec chariot élévateur standard, est suggéré si une méthode de rotation des stocks DEPS est employée, que le nombre de références de produits est moyen ou élevé et que le nombre de charges palettisées par référence est moyen.
- S_8, palettier à gravité inversée avec chariot élévateur standard, est suggéré si une méthode de rotation des stocks DEPS est employée, que le nombre de références de produits est moyen ou élevé et que le nombre de charges palettisées par référence est faible.
- S_3, palettier à double profondeur avec chariot élévateur standard, est suggéré si une méthode de rotation des stocks DEPS est employée, que le nombre de références de produits est moyen ou élevé et que le nombre de charges palettisées par référence est de 4 à 5 charges.
- S_{15}, système d'entreposage automatisé à accumulation statique, est suggéré si une méthode de rotation des stocks PEPS est employée, que la hauteur de la travée est uniquement limitée par la hauteur disponible du bâtiment, que le nombre de références de produits est moyen avec la possibilité d'éviter l'agression des charges palettisées.
- S_{14}, système d'entreposage automatisé à accumulation dynamique, est suggéré si une méthode de rotation des stocks PEPS est employée, que la hauteur de la travée est uniquement limitée par la hauteur disponible du bâtiment, que le nombre de références de produits est moyen et que les agressions des charges palettisées de deux types, les chocs et pressions latéraux ne gênent pas.
- S_7, palettier à accumulation dynamique avec chariot élévateur standard, est suggéré si une méthode de rotation des stocks PEPS est employée, que la hauteur de la travée est limitée soit par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé, soit par la hauteur disponible du bâtiment, que la profondeur de la travée souhaitée (en nombre de charges palettisées) est supérieure ou égale à trois, et que la vitesse d'opération attendue est très élevée.
- S_6, palettier à accumulation statique ouvert sur deux faces avec chariot élévateur standard, est suggéré si une méthode de rotation des stocks PEPS est employée, que la hauteur de la travée est limitée soit par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé, soit par la hauteur disponible du bâtiment, que la profondeur de la travée souhaitée (en nombre de charges palettisées) est supérieure ou égale à trois, et que la vitesse d'opération attendue est élevée.

- S_{10}, palettier à satellite ouvert sur deux faces avec chariot élévateur standard, est suggéré si une méthode de rotation des stocks PEPS est employée, que la hauteur de la travée est limitée soit par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé, soit par la hauteur disponible du bâtiment, que la profondeur de la travée souhaitée (en nombre de charges palettisées) est supérieure ou égale à trois, et que la vitesse d'opération attendue est moyenne.
- S_{11}, palettier mobile avec chariot élévateur standard, est suggéré si une méthode de rotation des stocks PEPS est employée, que la hauteur de la travée est limitée soit par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé, soit par la hauteur disponible du bâtiment, que la profondeur de la travée souhaitée (en nombre de charges palettisées) est inférieure à trois, et que le taux d'utilisation de l'espace est élevé.
- S_4, palettier à simple profondeur avec chariot élévateur pour allées étroites, est suggéré si une méthode de rotation des stocks PEPS est employée, que la hauteur de la travée est limitée soit par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé, soit par la hauteur disponible du bâtiment, que la profondeur de la travée souhaitée (en nombre de charges palettisées) est inférieure à trois, et que le taux d'utilisation de l'espace est moyen.
- S_2, palettier à simple profondeur avec chariot élévateur standard, est suggéré si une méthode de rotation des stocks PEPS est employée, que la hauteur de la travée est limitée soit par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé, soit par la hauteur disponible du bâtiment, que la profondeur de la travée souhaitée (en nombre de charges palettisées) est inférieure à trois, et que le taux d'utilisation de l'espace est faible.

6.8 Discussion

L'arbre de décision de la Figure 6.2 commence avec le test sur le critère C_7 (méthode de rotation des stocks). Ce choix a été fait par l'algorithme C4.5 après tous les calculs des gains informationnels sur tous les dix-neuf critères. Il a été trouvé que le critère C_7 est celui qui crée le moins de désordre (plus de gain informationnel) et c'est basé sur cet état de fait qu'une première partition est effectuée. Ainsi de suite, plus un critère crée moins de désordre, plus il a été retenu par l'algorithme. Au total, huit critères parmi les dix-neuf critères de caractérisation ont été exploités et testés, ce qui montre que l'algorithme est capable d'aboutir à des classes totalement homogènes avec simplement huit critères. Les classes sont les quinze systèmes d'entreposage S_1 à S_{15}.

Plus loin, les résultats de la Figure 6.2 montrent qu'il est possible d'atteindre un choix unique de sélection sans passer par tous les huit critères un après l'autre. Deux à quatre critères sont uniquement nécessaires. Avec deux critères ($C_7 \rightarrow C_{11}$), un choix unique parmi deux systèmes d'entreposage est proposé (S_1 et S_{13}). Avec trois critères ($C_7 \rightarrow C_{11} \rightarrow C_{12}$, $C_7 \rightarrow C_{11} \rightarrow C_8$ et $C_7 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{11}$), l'arbre propose un choix unique parmi six systèmes d'entreposage (S_3, S_5, S_8, S_9, S_{12}, S_{14}, et S_{15}). Avec quatre critères ($C_7 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{10} \rightarrow C_{19}$ ou $C_7 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{10} \rightarrow C_{15}$), l'arbre propose un choix unique parmi six autres systèmes d'entreposage (S_2, S_4, S_6, S_7, S_{10} et S_{11}).

L'arbre de décision est composé de quatre niveaux et il est possible d'élaguer l'arbre selon ces niveaux. Chaque niveau est formé par le nombre de critères testés pour arriver à un choix de système d'entreposage. Il s'avère que l'élagage à un niveau supérieur créerait des groupes de systèmes et non pas un choix unique de système. Par exemple, l'élagage avant le quatrième niveau, c'est sans faire le test sur le quatrième critère de chaque branche du troisième niveau, les groupes de systèmes formés sont (S_2, S_4 et S_{11}), (S_6, S_7, S_{10}) et (S_{14} et S_{15}). Le critère C_{11} est placé entre le deuxième niveau et le troisième, car il est pour certains systèmes un deuxième critère de test et pour d'autres un troisième critère de test.

Il a été possible de trouver un chemin unique de sélection pour chaque système d'entreposage destiné aux charges palettisées parmi les quinze qui sont traités dans ce chapitre. Chaque chemin de l'arbre de décision de la Figure 6.2 aboutit à une seule solution. Cette solution est la seule qui possède les caractéristiques telles que spécifiées dans l'arbre.

6.9 Conclusion

Les systèmes experts se basent sur les règles de décision Si-Alors. Afin d'exécuter ces règles, il faut commencer le test par un parmi tous les critères. Le guide de sélection des cas particuliers des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées proposé est basé sur un arbre de décision obtenu avec l'algorithme C4.5 et dont l'ordre des critères de décision est justifié mathématiquement.

L'arbre propose des choix uniques de solution d'entreposage en exploitant simplement deux à quatre critères parmi les dix-neuf critères de caractérisation. Le guide de sélection des cas particuliers des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées est un premier essai avec cette technique dans le domaine. Des critères décisifs pour la sélection des systèmes ont été

considérés. L’arbre de décision proposé a été validé par un test. La matrice de confusion est diagonale. Elle montre que la base de données est complète et que les données sont convergentes.

La base de données est générée à partir de la base de connaissances qui contient les meilleures pratiques des applications des systèmes d’entreposage destinés aux charges palettisées répertoriées dans la littérature par les experts comme James A. Tompkins. Les énumérations réalisées représentent les cas possibles pour chaque système d’entreposage. Une base de données regroupant les contextes réels des entrepôts existants aurait peut-être donnée d’autres règles de sélection et un autre arbre de décision avec une autre matrice de confusion. Il est possible qu’un système d’entreposage soit implanté dans la réalité dans un contexte qui ne correspond pas à celui recommandé dans la base de données générée. À ce moment, il apparaitrait des erreurs et des mauvais classements dans la matrice de confusion. Il n’a pas été possible d’obtenir cette base de données du terrain.

Le chapitre suivant présente une méthodologie de sélection des équipements d’entreposage destinés aux petites charges.

CHAPITRE 7 SÉLECTION DES ÉQUIPEMENTS D'ENTREPOSAGE DESTINÉS AUX PETITES CHARGES

7.1 Introduction

En entrepôt, les produits sont généralement entreposés dans la zone de réserve sous forme de charges palettisées. Ils peuvent aussi être entreposés sous forme de plus petites unités de charges dans cette zone. Les petites unités de charges sont généralement plus communes dans la zone de préparation de commande. Le problème traité dans ce chapitre est la sélection des équipements d'entreposage pour ces petites charges. Les petites charges peuvent être soit un produit de faible volume, soit des bacs, soit des petites caisses, soit des petits cartons.

L'objectif est de proposer une méthodologie de sélection des équipements d'entreposage de petites charges afin d'outiller les concepteurs d'entrepôt. Elle leur permettra de mieux connaitre leurs besoins lors de la rédaction des cahiers de charges pour acheter ces types équipements auprès des fournisseurs. Elle est constituée d'un SBC et la méthode AHP. La Figure 7.1 décrit la démarche globale de sélection des équipements d'entreposage destinés aux petites charges. Les étapes de la démarche sont expliquées et détaillées dans les sections suivantes du chapitre.

Après l'introduction, la section 7.2 décrit le problème de sélection des équipements d'entreposage destinés aux petites charges. La section 7.3 présente les données d'entrée de la méthodologie de sélection. La section 7.4 décrit la méthodologie de sélection développée dans ce chapitre. Un exemple illustratif de la méthodologie est proposé à la section 7.5. Finalement, la section 7.6 conclut ce chapitre.

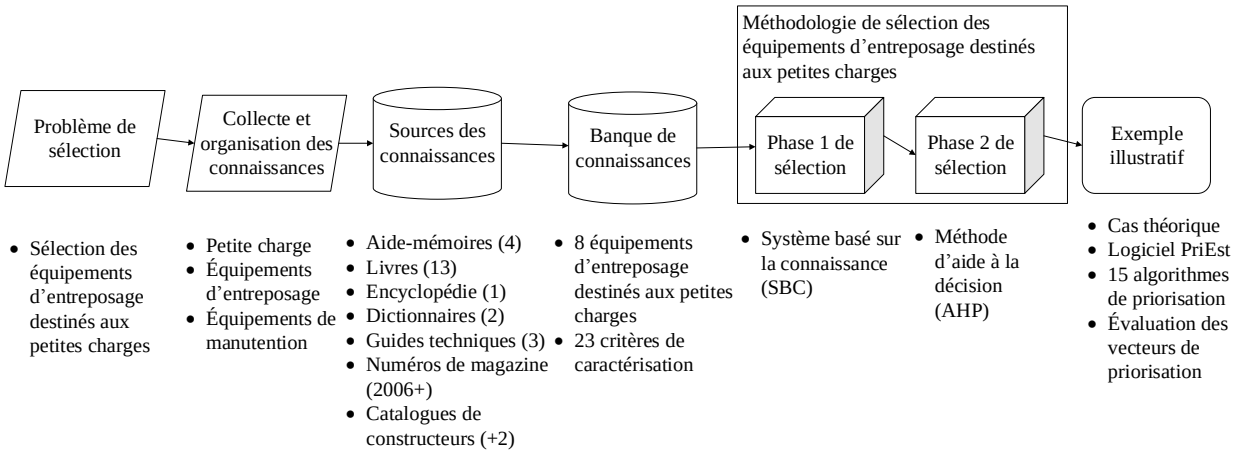


Figure 7.1 : Démarche globale de sélection des équipements d'entreposage destinés aux petites charges

7.2 Description du problème

Généralement, les marchandises arrivent ou sortent de l'entrepôt, par le biais des transporteurs livreurs, sous forme de charge palettisée. La paletée d'une charge palettisée est constituée de petites charges regroupées. Les petites charges peuvent être des cartons ou d'autres emballages de petit format contenant les marchandises. La paletée peut être une charge homogène, c'est-à-dire qu'elle est constituée de marchandises identiques. Elle peut être aussi hétérogène, c'est-à-dire qu'elle est constituée de marchandises qui sont de nature, de forme, de dimensions ou de poids différents (Riopel & Croteau, 2013). Pour faciliter leur prélèvement lors de la préparation de commande, les petites charges peuvent être entreposées dans la zone de préparation de commande soit en pièces individuelles, soit en bacs, soit en petites caisses ou petits cartons fermés.

Deux raisons peuvent être citées pour expliquer cette variété de l'unité de charge que nous appelons petite charge. Certains équipements d'entreposage sont mieux adaptés à certains types d'unités de charge que d'autres. Par exemple, le « cabinet d'entreposage à tiroirs » est adapté aux pièces individuelles, alors que l' « étagère d'entreposage » est mieux adaptée aux petits cartons et bacs. D'autre part, les préparateurs des commandes peuvent être servis dépendamment des quantités exigées par les commandes clients. Par exemple, si la quantité exigée d'un produit est égale à celle

contenue dans le petit carton fermé de l' « étagère d'entreposage », le préparateur ne va pas prélever des pièces individuelles à partir du bac, mais plutôt ramasser un petit carton entier.

L'effort humain est au centre de la manutention et l'entreposage des petites charges dans la plupart des cas. L'équipement de manutention sert à déplacer les petites charges regroupées dans les allées de service et de circulation et l'opérateur se charge de les placer manuellement dans l'équipement d'entreposage. La conception des équipements d'entreposage des petites charges doit tenir compte des limites physiques des préparateurs. Par exemple, la longueur moyenne étendue d'un bras humain est de 25 pouces (63,5 cm). La hauteur des équipements d'entreposage et la localisation des petites charges dans ces équipements doivent s'approcher de même de la taille humaine (Klein et al., 2008).

Dans les chapitres précédents, nous analysons et traitons la sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. Ces systèmes d'entreposage sont constitués d'équipements d'entreposage couplés par définition à des équipements de manutention pour deux raisons citées précédemment. Dans ce chapitre, nous traitons la sélection des équipements d'entreposage destinés aux petites charges sans les coupler initialement aux équipements de manutention. Le choix de l'équipement de manutention destiné aux petites charges est fait par l'utilisateur de la méthodologie de sélection, il devient un critère de sélection. Cette façon de procéder est différente de l'approche utilisée aux deux chapitres précédents parce que les deux raisons citées pour les équipements de manutention destinés aux charges palettisées ne sont pas totalement vérifiées pour les équipements de manutention destinés aux petites charges. Les équipements de manutention destinés aux petites charges sont plus nombreux et chaque équipement d'entreposage peut être associé à plusieurs équipements de manutention comme décrits à la section 7.4.1.

De la même manière que la sélection précédente des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées, la sélection des équipements d'entreposage destinés aux petites charges nécessite l'analyse d'un ensemble de critères caractérisant les équipements d'entreposage. Nous n'avons pas pu trouver dans la littérature les performances et les caractéristiques complètes de tous les équipements d'entreposage destinés aux petites charges par rapport à chaque critère. Les avantages et inconvénients des équipements d'entreposage sont généralement décrits (Halsey, 1998; Klein et al., 2008; Manley et al., 2008; Riopel & Croteau, 2013; Roux, 2011; Syndicat des industries de matériels de manutention, 1983b; Tompkins et al., 2010; Weiss & Cramer, 1988). Des fiches

techniques complètes standardisées des équipements d'entreposage destinés aux petites charges n'ont pas pu être réalisées.

7.3 Données d'entrée

Au même titre que la sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées, la sélection des équipements d'entreposage destinés aux petites charges utilise deux types de données d'entrée : équipements d'entreposage des petites charges et critères de sélection caractérisant les équipements d'entreposage.

7.3.1 Équipements d'entreposage destinés aux petites charges

À partir de la littérature spécialisée et présentée à la section 4.1 nous avons pu identifier huit équipements d'entreposage destinés aux petites charges. Ils sont décrits comme suit.

- Étagère d'entreposage : « équipement d'entreposage de biens, dont la structure est constituée principalement d'échelles et de tablettes. La hauteur des tablettes peut être modifiée, dans le but de les adapter aux dimensions des différents biens à entreposer » (Riopel & Croteau, 2013; Tompkins et al., 2010).
- Cabinet d'entreposage à tiroirs : « équipement d'entreposage modulable, généralement métallique, qui est constitué de tiroirs de différentes tailles, divisés en compartiments, de manière à jouer le rôle d'un meuble » (Riopel & Croteau, 2013; Tompkins et al., 2010).
- Rayonnage dynamique pour petites charges : « Rayonnage à gravité dont les petites charges non palettisées, légères ou lourdes, sont posées à partir de l'une de ses faces et retirées à partir de l'autre » (Riopel & Croteau, 2013; Tompkins et al., 2010).
- Carrousel horizontal : « carrousel d'entreposage dont les casiers, disposés en colonnes, sont accrochés à une chaîne à rotation horizontale. Il peut recevoir un poids total plus important de biens que le carrousel vertical, et la pose ou le retrait de ceux-ci se fait habituellement à partir d'une de ses extrémités. Il peut être actionné manuellement ou commandé à l'aide d'un ordinateur qui assure la gestion des stocks et des emplacements » (Riopel & Croteau, 2013; Tompkins et al., 2010).
- Carrousel vertical : « carrousel d'entreposage dont les casiers, disposés en lignes horizontales, sont accrochés à des chaînes à rotation verticale. Il reçoit généralement un poids total moins important de biens que le carrousel horizontal, et la pose ou le retrait de ceux-ci se fait

habituellement à la hauteur d'une table, à partir de la partie avant du carrousel. Il peut être actionné manuellement ou commandé à l'aide d'un ordinateur qui assure la gestion des stocks et des emplacements » (Riopel & Croteau, 2013; Tompkins et al., 2010).

- Carrousel à rotation indépendante : « carrousel d'entreposage qui est constitué de carrousels horizontaux superposés qui tournent indépendamment les uns des autres, afin que le préparateur de commande puisse avoir accès aux casiers qui se situent à différents niveaux de l'appareil » (Riopel & Croteau, 2013; Tompkins et al., 2010).
- Machine de préparation de commande : « machine construite autour d'un convoyeur horizontal à bandes. Des chargeurs sont répartis de part et d'autre de ce convoyeur. Ces chargeurs contiennent des articles stockés en piles et sont équipés, à leur base, d'un extracteur » (Roux, 2011; Tompkins et al., 2010).
- Système d'entreposage automatisé pour petites charges : système de palettier de grande hauteur et de grande profondeur dont le déplacement des petites charges peut être par gravité, par exemple. Il est muni de transtockeurs (Institute of Industrial Engineers, 2000; Riopel & Croteau, 2013; Rushton et al., 2014; Tompkins et al., 2010).

Le Tableau 7.1 présente les équipements d'entreposage destinés aux petites charges et leurs identifiants.

Tableau 7.1 : Équipements d'entreposage destinés aux petites charges

Identifiants	**Équipements d'entreposage**
E_1	Étagère d'entreposage
E_2	Cabinet d'entreposage à tiroirs
E_3	Rayonnage dynamique pour petites charges
E_4	Carrousel horizontal
E_5	Carrousel vertical
E_6	Carrousel à rotation indépendante
E_7	Machine de préparation de commande
E_8	Système d'entreposage automatisé pour petites charges

7.3.2 Critères de sélection caractérisant les équipements d'entreposage destinés aux petites charges

Nous avons fait une compilation des critères caractérisant les équipements d'entreposage destinés aux petites charges identifiés dans la littérature, ils sont au nombre de 23. Ils représentent pour la plupart les différents éléments interpellés dans les portraits des avantages et inconvénients de ces

équipements. Les descriptions des critères sont comme suit. Certains critères servent aussi à la sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées, nous les avons marqués par une étoile (*).

- Opérateur et stock *(en installant cet équipement d'entreposage, est-ce que c'est l'opérateur qui se déplace vers le stock ou c'est le stock qui se déplace vers l'opérateur?)*.

  Ce critère permet de savoir si l'opérateur se déplace vers le produit entreposé ou si c'est le produit qui se présente à l'opérateur qui reste à son poste de travail. Les deux cas possibles sont comme suit.

  - Opérateur vers stock (OVS).
  - Stock vers opérateur (SVO).

- Équipement de manutention *(quel équipement de manutention peut être associé à cet équipement d'entreposage?)*.

  Différents équipements de manutention peuvent être employés pour déplacer les petites charges. Nous les regroupons dans six groupes. Ils sont décrits comme suit.

  - Chariot de manutention pour petites charges (CMPC) : le terme générique chariot de manutention est défini à la section 2.4.1. Nous spécifions dans ce chapitre le chariot de manutention destiné aux petites charges. Il peut être manuel ou motorisé *(chariot à plateforme, un chariot à tablettes, chariot-échelle à tablettes, transplateforme manuel, transplateforme motorisé, etc.)*.
  - Chariot à poste de conduite élevable (CPCÉ) : « chariot élévateur qui est muni d'un poste de conduite à partir duquel le cariste porté debout le manœuvre et peut s'élever de plusieurs mètres de manière à pouvoir effectuer la préparation manuelle de commandes et le réapprovisionnement des stocks » (Institute of Industrial Engineers, 2000; Riopel & Croteau, 2013).
  - Transtockeur semi-automatique avec personne à bord (TSAPB) : le terme générique transtockeur est défini à la section 4.2.2 du Chapitre 4. Nous spécifions le transtockeur semi-automatique dans lequel prend place une personne chargée d'effectuer manuellement des prélèvements des petites charges.

- Transtockeur automatique (TA) : le terme générique transtockeur est défini à la section 4.2.2 du Chapitre 4. Nous spécifions le transtockeur automatique pour les petites charges.
- Transporteur à rouleaux ou à courroie (TRC) : le terme générique transporteur est défini dans le Tableau 2.2 du Chapitre 2 sous l'acronyme CTCI. Pour les petites charges, le transporteur muni de rouleaux ou d'une courroie peut être employé. « Le transporteur à rouleaux possède deux longerons parallèles à l'intérieur desquels se trouvent des rouleaux qui, mobiles autour de leur axe, assurent la manutention des petites charges. Le transporteur à courroie peut être horizontal, ascendant ou descendant, et le circuit peut être rectiligne ou en courbe. Il peut être fixe, mobile, portable ou télescopique » (Institute of Industrial Engineers, 2000; Riopel & Croteau, 2013)..
- Système des véhicules à guidage automatique (SVGA) : le terme est défini dans le Tableau 2.2 du Chapitre 2. L'équipement peut être utilisé pour le cas des petites charges à soulever et déplacer les étagères d'entreposage dans lesquelles elles sont entreposées.

- Options additionnelles *(quelle option additionnelle peut être ajoutée à cet équipement d'entreposage?)*.

  Les différentes options additionnelles permettent de créer des équipements combinés comme décrits dans la littérature. Elles facilitent à mieux utiliser l'espace disponible.

  - Mezzanine (Me);
  - Mobile (Mob);
  - Grande hauteur (GH).

- Coût initial (*) *(quel est le coût initial de cet équipement de manutention?).*

  Ce critère est similaire au critère de coût d'installation des chapitres précédents.

- Coût d'espace *(quel est le coût de l'espace du bâtiment?)*.

  Ce critère permet, entre autres, de déterminer si l'exploitation de la hauteur du bâtiment est nécessaire, c'est le cas où le coût de l'espace est élevé.

- Précision du prélèvement *(quelle est la précision du prélèvement obtenue avec cet équipement d'entreposage?)*.

Certains équipements d'entreposage offrent une grande précision de prélèvement tels que les carrousels.

- Reconfigurabilité (*) *(quel est le degré de reconfigurabilité offert par cet équipement d'entreposage?)*.

  Ce critère est similaire au critère de flexibilité des chapitres précédents.

- Difficulté lors de l'installation *(quel est le degré de difficulté rencontrée lors de l'installation de cet équipement d'entreposage?)*.

  Ce critère peut faire référence au délai d'installation de l'équipement d'entreposage. Il est cité dans la littérature en comparant les équipements entre eux.

- Besoins en maintenance *(quel est le taux des besoins en maintenance pour cet équipement d'entreposage?)*.

  Ce critère est cité dans la littérature en comparant les équipements entre eux.

- Taux d'utilisation de l'espace (*) *(quel est le taux d'utilisation de l'espace par cet équipement d'entreposage?)*

  Ce critère est similaire au critère d'utilisation de l'espace des chapitres précédents.

- Taux d'utilisation des dimensions internes de l'équipement (*) *(quel est le taux d'utilisation des dimensions internes de cet équipement d'entreposage?)*.

  Ce critère est similaire au critère de coefficient d'occupation des alvéoles des chapitres précédents.

- Taux d'utilisation du volume cubique du bâtiment (*) *(quel est le taux d'utilisation du volume cubique du bâtiment par cet équipement d'entreposage?)*.

  Ce critère fait référence dans les chapitres précédents par les critères de hauteur de la travée et utilisation de l'espace. Le volume est la surface multipliée par la hauteur.

- Problèmes de supervision *(quels sont les problèmes de supervision qui peuvent exister avec cet équipement d'entreposage?)*.

  Certains équipements d'entreposage sont faciles à superviser et contrôler comme les équipements de types stock vers opérateur.

- Problèmes de design de la manutention *(quels sont les problèmes de design de la manutention pour cet équipement d'entreposage?)*.

  Ce critère fait référence à la complexité de la conception de la manutention pour l'équipement d'entreposage. Certaines contraintes et difficultés peuvent apparaitre lorsque l'option additionnelle mezzanine est ajoutée à l'équipement d'entreposage.

- Sécurité et protection des items *(quel est le niveau de sécurité et de protection des items offert par cet équipement d'entreposage?).*

  Le niveau de sécurité et de protection peut être élevé lorsque les items sont entreposés dans des compartiments fermés, c'est le cas par exemple du carrousel vertical donnant accès à une seule ligne à la fois.

- Limite de la hauteur (*) *(quelle est la limite disponible de la hauteur de cet équipement d'entreposage?)*.

  Ce critère est similaire au critère de hauteur de la travée des chapitres précédents.

- Besoin d'espace au-dessus de l'item pour le prélèvement *(est-ce qu'il y a un besoin d'espace au-dessus de l'item pour le prélèvement?).*

  Certains équipements d'entreposage n'ont pas besoin d'espace au-dessus de l'item pour le prélèvement, c'est le cas du cabinet d'entreposage à tiroirs.

- Méthode de rotation de stock (*) *(quelle est la méthode de rotation de stock adoptée par cet équipement d'entreposage?)*.

  Ce critère est de même cité dans les chapitres précédents pour les systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées.

- Nombre de références des produits dans une petite zone *(combien de références de produits peuvent être entreposées dans une petite zone avec cet équipement d'entreposage?)*.

  Le nombre de références de produits pouvant être entreposées dans une petite zone dépend aussi de la taille de l'unité de charge. Les petites charges peuvent être des pièces individuelles, des petits cartons, des bacs, etc.

- Besoins en travailleurs *(quels sont les besoins en travailleurs pour cet équipement d'entreposage?)*.

  Certains équipements d'entreposage n'ont pas besoin d'un nombre élevé de travailleurs, c'est le cas des équipements de type stock vers opérateur.

- Nombre d'allées *(combien d'allées de service et de circulation sont nécessaires pour cet équipement d'entreposage?)*.

  Les équipements d'entreposage avec l'option additionnelle mobilité permettent de limiter le nombre d'allées nécessaires.

- Débit (*) *(pour quel niveau de flux de petites charges cet équipement d'entreposage est-il idéalement adapté ?).*

  Ce critère est similaire au critère de flux des charges palettisées idéalement requis des chapitres précédents.

- Niveau d'automatisation *(quel est le niveau d'automatisation de cet équipement d'entreposage?)*.

  Le niveau d'automatisation est différent pour les équipements d'entreposage des petites charges. Certains équipements peuvent être automatisés entièrement ou partiellement comme les carrousels.

Les critères caractérisant les équipements d'entreposage destinés aux petites charges sont utilisés pour critères de sélection. Le Tableau 7.2 présente les critères de sélection et leurs valeurs. Les équipements d'entreposage des petites charges peuvent être classés d'abord selon trois différents critères dits critiques : opérateur et stock (CC_1^*); équipement de manutention (CC_2^*) et options additionnelles (CC_3^*) (Klein et al., 2008; Manley et al., 2008; Roux, 2011; Tompkins et al., 2010; Weiss & Cramer, 1988). Ils sont critiques parce qu'ils permettent de classifier les équipements d'entreposage et d'obtenir une présélection comme pour les systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. Au-delà de ces trois critères, le Tableau 7.2 comporte 20 autres critères que nous classons en deux groupes : critères additionnels (CA_1 à CA_8) et critères de performance (CP_1^* à CP_{12}^*). Les étoiles sur les identifiants des critères servent à les différencier des critères des chapitres précédents puisqu'ils ont les mêmes noms. Les huit critères additionnels peuvent être utilisés dans le SBC pour choisir l'équipement qui convient aux besoins d'entreposage des petites

charges. Les douze critères de performance seront exploités dans la deuxième phase de la méthodologie avec la méthode AHP. La méthode AHP permet d'obtenir une liste ordonnée des équipements présélectionnés dans la première phase. Parmi les douze critères, certains sont des critères de maximisation ($CP_3^*, CP_4^*, CP_7^*, CP_8^*, CP_9^*\ et\ CP_{12}^*$) et les autres sont des critères de minimisation ($CP_1^*, CP_2^*, CP_5^*, CP_6^*, CP_{10}^*\ et\ CP_{11}^*$). Il faut rappeler que l'installation et la maintenance des équipements d'entreposage sont des activités réglementées (Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) & Association sectorielle transport entreposage (ASTE), 2009).

Tableau 7.2 : Critères de sélection et caractéristiques des équipements d'entreposage destinés aux petites charges

Identifiants	**Critères de sélection**	**Caractéristiques des équipements d'entreposage**
CC_1^*	Opérateur et stock	OVS; SVO
CC_2^*	Équipement de manutention	CMPC; CPCÉ; TSAPB; TA; TRC; SVGA
CC_3°	Options additionnelles	Me; Mob; GH
CA_1	Limite de la hauteur	Non spécifiés
CA_2	Besoins d'espace au-dessus de la charge pour le prélèvement	Non spécifiés
CA_3	Méthode de rotation de stock	Non spécifiés
CA_4	Nombre d'UGS dans une petite zone	Non spécifiés
CA_5	Besoins en travailleurs	Non spécifiés
CA_6	Nombre d'allées	Non spécifiés
CA_7	Débit	Non spécifiés
CA_8	Niveau d'automatisation	Non spécifiés
CP_1^*	Coût initial	Non spécifiés
CP_2^*	Coût d'espace	Non spécifiés
CP_3^*	Précision du prélèvement	Non spécifiés
CP_4^*	Reconfigurabilité	Non spécifiés
CP_5^*	Difficulté lors de l'installation	Non spécifiés
CP_6^*	Besoins en maintenance	Non spécifiés
CP_7^*	Taux d'utilisation de l'espace	Non spécifiés
CP_8^*	Taux d'utilisation des dimensions internes de l'équipement	Non spécifiées
CP_9^*	Taux d'utilisation du volume cubique du bâtiment	Non spécifiées
CP_{10}^*	Problèmes de supervision	Non spécifiées
CP_{11}^*	Problèmes de design de la manutention	Non spécifiées
CP_{12}^*	Sécurité et protection des items	Non spécifiées

7.4 Méthodologie de sélection

La méthodologie proposée est divisée en deux phases. La première phase est l'exploration des données avec un autre SBC spécifique à ce problème pour faire une présélection. La deuxième phase est un classement des équipements présélectionnés par ordre de performance. Une méthode d'aide à la décision peut être adaptée pour la deuxième phase. Après avoir fait une comparaison des méthodes d'aide à la décision multicritère, Triantaphyllou (2000) affirme qu'il est impossible de trouver la meilleure méthode. Selon Wallenius et al. (2008), la méthode AHP proposée par Saaty (1980) est considéré comme étant le domaine de recherche le plus actif parmi les autres méthodes d'aide à la décision multicritère. Elle permet aussi de générer des données en faisant des comparaisons par paire entre les éléments. Pour notre cas, les données manquantes sur les caractéristiques des équipements d'entreposage destinés aux petites charges sont obtenues par les jugements apportés en faisant les comparaisons par paire entre les critères et les équipements d'entreposage.

7.4.1 Phase 1 : SBC

7.4.1.1 Principe

Le principe d'un SBC est décrit précédemment au Chapitre 5 à la section 5.5.1.1. Le principe ne change pas, mais les critères de la base de connaissances changent. Le concepteur exploite dans ce autre SBC les trois critères de présélection afin d'identifier un ou des équipements d'entreposage potentiels. Une suite de conditions Si-Alors explore la base de connaissances. Le SBC repère les équipements qui ont les caractéristiques recherchées par l'utilisateur. La liste obtenue est analysée davantage dans la Phase 2 de résolution.

7.4.1.2 Connaissances sur les équipements d'entreposage destinés aux petites charges

Selon la littérature consultée, nous avons remarqué que les connaissances sur les équipements d'entreposage destinés aux petites charges ne sont pas aussi documentées que celles sur les systèmes d'entreposage destinés aux petites charges. La troisième colonne du Tableau 7.3 présente les caractéristiques des équipements d'entreposage destinés aux petites charges par rapport aux critères critiques.

Les trois critères critiques forment alors la base de connaissances. La matrice du Tableau 7.3 représente cette base de connaissances et les sources des données sont précisées. De la même manière que la base de connaissances du Chapitre 5, cette dernière n'est pas présentée sous forme d'arbre qui possèderait des critères parents et d'autres fils. L'utilisateur serait dans ce cas obligé de parcourir toutes les branches représentées par les critères avant d'arriver à une présélection d'équipements. Il lui est possible avec le Tableau 7.3 d'avoir l'option de choisir seulement un, deux ou tous les trois critères sur lesquels basés son choix de présélection. Le manque d'information complète sur les autres critères est surmonté en adoptant des comparaisons par paire entre les équipements à la deuxième phase de cette méthodologie.

Tableau 7.3 : Connaissances sur les équipements d'entreposage destinés aux petites charges par rapport aux critères critiques de présélection

	CC_1^*	CC_2^*	CC_3^*
E_1	OVS[1]	CMPC[2, 1, 3]; CPCÉ[2, 1, 3]; TSAPB[2, 1, 3]; SVGA[2, 1, 3]	Aucune[1, 3]; Me[1, 3]; Mob[1, 3]; GH[1, 3]
E_2	OVS[1]	CMPC[2, 1, 3]; CPCÉ[2, 1, 3]; TSAPB[2, 1, 3]	Aucune[1, 3]; Me[1, 3]; Mob[1, 3]; GH[1, 3]
E_3	OVS[1]	CMPC[2, 1, 3]; CPCÉ[2, 1, 3]; TSAPB[2, 1, 3]	Aucune[1, 3]; Me[1, 3]; Mob[1, 3]; GH[1, 3]
E_4	SVO[1]	CMPC[2, 1]	Aucune[1]; Me[1]; GH[1]
E_5	SVO[1]	CMPC[2, 1]	Aucune[1]; Me[1]; GH[1]
E_6	SVO[1]	CMPC[2, 1]	Aucune[1]; Me[1]
E_7	SVO[1]	TRC[2, 1]	Aucune[1]; Me[1]
E_8	SVO[1]	TSAPB[2, 1, 4]; TA[2, 1, 4]	Aucune[2, 1]

7.4.2 Phase 2 : méthode AHP

Cette partie section présente le cadre de résolution du problème avec la méthode AHP. La méthode AHP se base sur la comparaison par paire des critères et des possibilités d'équipements (Saaty, 2008). Elle permet d'obtenir un classement ou une priorisation des critères et des équipements.

[1] (Tompkins et al., 2010)

[2] Adaptation de(s) (la) source(s) couplée(s)

[3] (Syndicat des industries de matériels de manutention, 1983b)

[4] (Rushton et al., 2014)

7.4.2.1 Étape 1 : sélection des critères de performance

Le concepteur d'entrepôt peut décider de ne pas utiliser tous les douze critères de performance. La comparaison par paire sera alors faite pour les m critères choisis $(CP_1^*, CP_2^*, \dots, CP_m^*)$ avec $m =$ 1 à 12 afin d'obtenir les poids de priorisation de ces derniers.

7.4.2.2 Étape 2 : priorisation des équipements et des critères de performance

Une priorisation est faite des n possibilités d'équipements d'entreposage des petites charges $E_1, E_2, \dots, E_n$ avec $n = 2$ à 8 présélectionnés à la première phase de cette méthodologie. Elle est réalisée par une comparaison par paire des équipements en fonction des m critères de performance. Cette étape pourrait être faite en collaboration avec les constructeurs vendeurs des équipements d'entreposage pour petites charges. Ces derniers sont utiles pour avoir les jugements de leurs experts sur chaque équipement selon les critères retenus. Un jugement sous forme de ratio a_{ij} est établi pour spécifier le niveau de préférence de l'élément E_i par rapport à l'élément E_j, avec i et j les indices des éléments de 1 à n avec :

$$\begin{cases} \text{Si } E_i \text{ est préféré à } E_j, \text{alors } a_{ij} > 1 \\ \text{Si } E_i \text{ et } E_j \text{ sont égaux en préférence, alors } a_{ij} = 1 \\ \text{Si } E_j \text{ est préféré à } E_i, \text{alors } a_{ij} < 1 \end{cases}$$

Le nombre de jugements pour les équipements est égal à $\frac{n(n-1)}{2}$ et celui des critères est égal à $\frac{m(m-1)}{2}$.

Nous notons aussi que :

$$\begin{cases} a_{ji} = \dfrac{1}{a_{ij}} \\ a_{ii} = 1 \end{cases}$$

Une matrice de comparaison par paire (MCP) d'équipement $A = [a_{ij}]$ d'ordre $n * n$ est obtenue. Une matrice similaire d'ordre $m * m$ est réalisable pour la comparaison des critères.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & 1/a_{3n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Les jugements a_{ij} peuvent être cardinaux en respectant une échelle de préférence prédéterminée. Dans le cas de critères tangibles, les jugements peuvent être des mesures directes soit du poids ou des prix. Lorsqu'il s'agit des critères intangibles, Saaty (2008) propose une échelle de comparaison de ratio de 1 à 9 selon le Tableau 7.4.

Tableau 7.4 : Échelle de valeurs (Saaty, 2008)

Degrés d'importance	**Définitions**	**Explications**
1	Importance égale des deux éléments	Deux éléments contribuent autant à la caractéristique
2	Faible ou légère importance	
3	Importance modérée	L'expérience et l'appréciation favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
4	Importance plus modérée	
5	Forte importance	L'expérience et l'appréciation favorisent fortement un élément par rapport à un autre
6	Plus forte importance	
7	Importance beaucoup plus forte ou importance démontrée	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
8	Importance très très forte	
9	Extrême importance	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible

Le problème de priorisation consiste à déterminer un vecteur de priorité $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ de l'ensemble des ratios de jugements noté J avec $w_i > 0$ et $\sum w_i = 1$.

7.4.2.3 Étape 3 : extraction du vecteur de priorité

Le processus d'extraction du vecteur de priorité Eigenvector (EV) de la matrice MCP se résume en trois étapes : cumuler chaque colonne; diviser ensuite toutes les entrées de chaque colonne par leur somme respective (matrice MCP normalisée); calculer la moyenne des lignes de la matrice MCP normalisée pour obtenir le vecteur priorité.

Néanmois, il existe différentes méthodes de priorisation d'éléments à partir d'un ensemble de jugements. Choo et Wedley (2004) ont fait une comparaison de dix-huit méthodes de priorisation.

Ils expliquent que dans le cas où il n'y a pas d'erreurs de consistance des jugements, les méthodes donnent les mêmes résultats, mais les résultats sont différents lorsqu'il y a des erreurs de consistance dans la matrice de jugements. Siraj (2011) a fait un historique des méthodes de priorisation.

Pour pouvoir exploiter plusieurs de ces méthodes et comparer leurs résultats, nous résolvons le problème automatiquement avec un logiciel spécialisé appelé PriEst (Siraj, Mikhailov, & Keane, 2015), développé à l'University of Manchester. Le logiciel propose quinze méthodes de priorisation et nous les avons toutes utilisées afin de comparer les différentes propositions de classement des équipements.

7.4.2.4 Étape 4 : évaluation du vecteur de priorité

Après avoir obtenu le vecteur de priorité avec les méthodes, il faut évaluer la cohérence des jugements. La qualité de jugement peut être connue par différents critères d'évaluation des méthodes de priorisation. Selon Saaty (1980) le ratio de cohérence RC doit être inférieur à 10 % (une imprécision de moins de 10 %). Pour ce faire, on utilise des indices aléatoires RI obtenus sous forme de simulation et représentés par les indices aléatoires du Tableau 7.5.

Tableau 7.5 : Indices aléatoires RI (Saaty, 1980)

$\boldsymbol{n}$ **(ou** $\boldsymbol{m}$**)**	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	…
$\boldsymbol{RI}$	0.00	0.00	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	…

Le RC se calcule comme suit (Saaty, 1980) :

1. Multiplier chaque colonne de la matrice MCP par son poids respectif du vecteur de priorité trouvé.
2. Additionner les lignes de la nouvelle matrice pour obtenir un vecteur colonne.
3. Diviser le dernier vecteur par le vecteur de priorité.
4. Calculer la moyenne des valeurs de ce vecteur pour obtenir la valeur propre maximale de la matrice nommée λ_{max}.
5. Calculer l'indice de cohérence IC de la matrice MCP avec $IC = \frac{\lambda_{max}-N}{N-1}$ et N le nombre d'éléments en comparaison (n pour les équipements et m pour les critères).

6. Calculer le ratio de cohérence RC par : $RC = \frac{IC}{RI}$.

On peut aussi utiliser le critère de déviation quadratique ou déviation totale (DT) (Mikhailov & Singh, 1999; Srdjevic, 2005). Il évalue la distance entre les jugements et les ratios obtenus par la priorisation. TD est similaire à la distance euclidienne. Le calcul de TD se fait selon la formule suivante :

$$TD(w) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \left(a_{ij} - \frac{w_i}{w_j} \right)^2$$

Un autre critère nommé violation de priorité (VP) introduit par Ali, Cook et Kress (1986) peut être utilisé pour comparer les résultats des méthodes de priorisation et la cohérence des jugements. Quand E_i est préféré à E_j, la priorité de ces deux éléments devrait toujours préserver l'ordre de préférence ($w_i > w_j$). Si E_j obtient un plus grand poids de priorité que E_i ($w_i < w_j$), alors il y a une violation de priorité. La violation v_{ij} est formulée sous forme logarithmique $v_{ij} = step(loga_{ij}\ log\frac{w_j}{w_i})$. La fonction $step$ retourne 1 pour les valeurs positives sinon 0. On utilise aussi dans la littérature le concept de demi-violation (Golany & Kress, 1993) et nous obtenons :

$$v_{ij} = \begin{cases} 1 & si\ (w_i < w_j)\ et\ (a_{ij} > 1) \\ \frac{1}{2} & si\ (w_i \neq w_j) et\ (a_{ij} = 1) \\ \frac{1}{2} & si\ (w_i = w_j)\ et\ (a_{ij} \neq 1) \\ 0 & autrement \end{cases}$$

Le nombre total de violations devient $NV(w)$ avec :

$$NV(w) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} v_{ij}$$

Un vecteur de priorité idéal est celui qui donne un classement des équipements d'entreposage pour notre cas sans violation de priorité en respectant toutes les directions de préférence.

7.5 Exemple illustratif

Phase 1

L'utilisateur spécifie les valeurs des trois premiers critères. Il recherche un équipement d'entreposage de type opérateur vers stock, avec l'option mobilité de l'équipement. Il voudrait aussi que l'équipement soit adapté à la manutention avec un chariot à poste de conduite élevable.

D'après le SBC, le traitement se fait de la manière ci-dessous.

Si critère opérateur et stock == opérateur vers stock **Alors**;

Si critère équipement de manutention == chariot à poste de conduite élevable **Alors;**

Si critère options additionnelles == mobile **Alors;**

- Étagère d'entreposage (E_1);
- Cabinet d'entreposage à tiroirs (E_2);
- Rayonnage dynamique pour petites charges (E_3).

Trois possibilités d'équipements d'entreposage pour petites charges sont proposées à savoir l'étagère d'entreposage, le cabinet d'entreposage à tiroirs et le rayonnage dynamique pour petites charges.

Nous supposons que l'utilisateur n'a pas ajouté d'autres exigences en fonction des critères de spécificité.

Il faut maintenant pouvoir classer les trois équipements en ordre performance. Selon le Tableau 7.2, il existe douze critères de performance. Nous supposons que l'utilisateur a choisi d'évaluer les trois équipements en fonction de trois critères de maximisation parmi les douze, c'est-à-dire ceux qui reflètent le plus ses besoins en entreposage. Les trois critères sont la précision de prélèvement (CP_3^*), la reconfigurabilité (CP_4^*), la sécurité et protection des items (CP_{12}^*).

Phase 2

Étape 1

La méthode AHP s'appuie sur une hiérarchie des éléments du problème. Pour notre cas, la Figure 7.2 présente la hiérarchie des équipements et des critères.

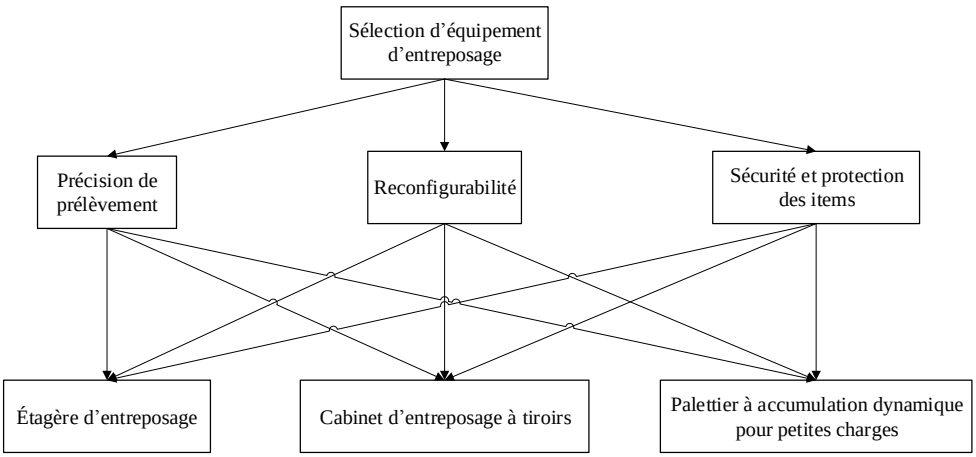


Figure 7.2 : Décomposition hiérarchique

Étape 2

Les tableaux suivants représentent les matrices de comparaison des critères et des équipements par paire. Pour le moment, les jugements apportés ne viennent pas des experts de l'entreprise collaboratrice, mais de l'expérience de l'auteur. Ils sont formulés pour l'exercice de l'exemple d'application et ne sont pas les résultats d'une étude préalable. Ils sont présentés dans les Tableaux 7.6, 7.7, 7.8, et 7.9. Ils sont traduits en chiffre selon l'échelle de valeurs de Saaty du Tableau 7.4.

Étape 3

L'étape suivante consiste à introduire ces données dans le logiciel PriEsT (Siraj et al., 2015) pour obtenir le classement des équipements d'entreposage des petites charges selon différentes méthodes de priorisation et évaluer la consistance des jugements.

Les résultats des quinze différentes méthodes de priorisation sont présentés dans le Tableau 7.10. Nous obtenons les poids de préférence estimés avec le vecteur de priorité des équipements qui sont $w_2 > w_3 > w_1$ avec toutes les méthodes de priorisation. Les méthodes de priorisation calculent le vecteur de priorité différemment, c'est pourquoi les valeurs de $w_1, w_2\ et\ w_3$ du Tableau 7.10 sont légèrement différentes (Siraj, 2011). Le vecteur de priorité w obtenu avec la méthode EV est acceptable, $w = (0.164\,, 0.579\,, 0.256\,)^T$. Le classement des trois équipements d'entreposage devient $E_2 > E_3 > E_1$. L'équipement E_2 est le cabinet d'entreposage à tiroirs.

Étape 4

Le Tableau 7.11 présente l'évaluation des résultats obtenus avec les différentes méthodes de priorisation. La deuxième colonne NV montre qu'il n'y a eu aucune violation de priorité dans toutes les méthodes.

La déviation totale TD pour chaque méthode est présentée à la première colonne du Tableau 7.11. On note que les trois méthodes Direct Least Sq, Logarithmic Least Abs. Value et Two-Objective obtiennent les plus petits TD de l'ordre de 1.554; 1.985; et 1.554 respectivement.

Le ratio de cohérence RC de chacune des quatre matrices des Tableaux 7.6, 7.7, 7.8 et 7.9 se calcule. Ils sont respectivement égaux à 0.033; 0.056; 0.003 et 0.000. Tous les ratios sont inférieurs à 0.1, ce qui montre que les jugements sont cohérents.

Tableau 7.6 : Matrice de comparaison par paire des critères

Objectif	$\boldsymbol{CP_3^*}$	$\boldsymbol{CP_4^*}$	$\boldsymbol{CP_{12}^*}$
$\boldsymbol{CP_3^*}$	1	5	3
$\boldsymbol{CP_4^*}$	1/5	1	1/3
$\boldsymbol{CP_{12}^*}$	1/3	3	1

Tableau 7.7 : Matrice de comparaison des équipements selon le critère précision de prélèvement CP_3^*

$\boldsymbol{CP_3^*}$	$\boldsymbol{E_1}$	$\boldsymbol{E_2}$	$\boldsymbol{E_3}$
$\boldsymbol{E_1}$	1	1/7	1/5
$\boldsymbol{E_2}$	7	1	3
$\boldsymbol{E_3}$	5	1/3	1

Tableau 7.8 : Matrice de comparaison des équipements selon le critère de reconfigurabilité CP_4^*

$\boldsymbol{CP_4^*}$	$\boldsymbol{E_1}$	$\boldsymbol{E_2}$	$\boldsymbol{E_3}$
$\boldsymbol{E_1}$	1	5	3
$\boldsymbol{E_2}$	1/5	1	1/3
$\boldsymbol{E_3}$	1/3	3	1

Tableau 7.9 : Matrice de comparaison des équipements selon le critère de protection et sécurité des items CP_{12}^{*}

$\boldsymbol{CP_{12}^{*}}$	$\boldsymbol{E_1}$	$\boldsymbol{E_2}$	$\boldsymbol{E_3}$
$\boldsymbol{E_1}$	1	1/3	1
$\boldsymbol{E_2}$	3	1	3
$\boldsymbol{E_3}$	1	1/3	1

Tableau 7.10 : Résultats des vecteurs de priorité selon différentes méthodes de priorisation

Méthodes de priorisation	$\boldsymbol{w_1}$	$\boldsymbol{w_2}$	$\boldsymbol{w_3}$
Geometric Mean	0.164	**0.579**	0.256
Eigenvector	0.164	**0.579**	0.256
Normalized Column Sum	0.166	**0.575**	0.259
Enumerating All Trees	0.163	**0.581**	0.256
Geometric Mean of All Trees	0.164	**0.579**	0.256
GM Random Spanning Trees	0.164	**0.58**	0.256
Random Spanning Trees Spit All	0.192	**0.589**	0.219
Column-Row Orientation	0.164	**0.579**	0.257
Direct Least Sq	0.173	**0.527**	0.3
Weighted Least Sq	0.175	**0.592**	0.233
Logarithmic Least Abs. Value	0.15	**0.553**	0.297
Logarithmic Least Sq	0.164	**0.579**	0.256
Fuzzy Preference Programming	0.17	**0.585**	0.245
Two-Objective	0.173	**0.527**	0.3
Multi-Objective	0.166	**0.585**	0.249

Tableau 7.11 : Résultats des critères d'évaluation des méthodes de priorisation

Méthodes de priorisation	$\boldsymbol{TD}$	$\boldsymbol{NV}$
Geometric Mean	3.893	0
Eigenvector	3.893	0
Normalized Column Sum	3.247	0
Enumerating All Trees	5.387	0
Geometric Mean of All Trees	3.893	0
GM Random Spanning Trees	3.878	0
Random Spanning Trees Spit All	4.4913	0
Column-Row Orientation	3.845	0
Direct Least Sq	**1.554**	0
Weighted Least Sq	3.914	0
Logarithmic Least Abs. Value	**1.985**	0

Tableau 7.11 : Résultats des critères d'évaluation des méthodes de priorisation (suite et fin)

Méthodes de priorisation	$\boldsymbol{TD}$	$\boldsymbol{NV}$
Logarithmic Least Sq	3.893	0
Fuzzy Preference Programming	3.61	0
Two-Objective	**1.554**	0
Multi-Objective	6.454	0

7.6 Conclusion et discussion

La proposition faite dans ce chapitre est une méthodologie de sélection des équipements d'entreposage des petites charges. Elle est constituée d'un SBC et une adaptation de la méthode d'aide à la décision multicritère AHP.

La littérature du domaine a été exploitée pour extraire les données sur les équipements et leurs caractéristiques, mais elles ne sont pas complètes comme pour les systèmes des charges palettisées. Les données manquantes sont générées en faisant des comparaisons par paire des équipements d'entreposage à l'aide de la méthode AHP. Néanmoins, les jugements de préférence devraient être ceux d'un spécialiste des équipements d'entreposage des petites charges, c'est pourquoi la collaboration avec les constructeurs de ces équipements est nécessaire pour appliquer cette méthodologie.

L'exemple illustratif suppose que l'utilisateur dispose déjà un équipement de manutention qui est le chariot à poste de conduite élevable. Ce dernier chercherait à choisir un équipement d'entreposage des petites charges parmi les possibilités existantes. Dans ce cas, un cabinet d'entreposage à tiroirs lui est proposé en tenant compte des autres caractéristiques qu'il a spécifiées. Une suite de ces travaux de recherche serait d'analyser le cas où l'utilisateur ne dispose pas actuellement d'équipement de manutention et qu'il voudrait être conseiller sur lequel choisir en même temps que l'équipement d'entreposage des petites charges.

En faisant toutes les combinaisons des trois critères de présélection de la Phase 1, il existe le cas où l'utilisateur pourrait directement être aiguillé vers un seul choix d'équipement d'entreposage des petites charges. Il s'agit de la machine de préparation de commande. Cette machine est la seule qui utilise un transporteur à rouleaux ou à courroie comme équipement de manutention principal selon le Tableau 7.3. Il ne sera pas nécessaire de passer en Phase 2 de la méthodologie de sélection proposée puisque le choix est unique.

Les critères de sélection des équipements d'entreposage destinés aux petites charges sont plus nombreux que ceux des systèmes d'entreposages des charges palettisées, 23 et 19 critères respectivement. Même si une différence de nombre apparait, il est vu dans les exemples illustratifs que tous les critères ne sont pas utilisés. Plus loin, l'exploration de la base de connaissances faite dans le Chapitre 6 a montré que pour certains cas, seulement deux critères seraient suffisants pour proposer un choix.

Les données du SBC devraient être mises à jour en intégrant les avancées technologiques. Une application informatique pourrait être développée afin d'automatiser et rendre pratique la méthodologie de sélection.

Le chapitre suivant présente une évaluation des défis de sélection des équipements de manutention et d'entreposage dans un contexte 4.0.

CHAPITRE 8 DÉFIS DE SÉLECTION DES ÉQUIPEMENTS DE MANUTENTION ET D'ENTREPOSAGE EN CONTEXTE 4.0

8.1 Introduction

L'industrie a traversé jusqu'à présent trois révolutions. La première a eu lieu vers la fin du 18ème siècle. Elle est caractérisée par le passage du travail manuel à la production mécanisée. Ce passage a été favorisé par l'utilisation de la machine à vapeur. La seconde a eu lieu à la fin du 19ème siècle. Elle est marquée par l'introduction de la production de masse et la division du travail avec l'essor de l'énergie électrique et du moteur à explosion. La troisième a eu lieu à partir des années 1970. Elle est manifestée avec plus d'automatisation des processus de production en se servant des systèmes électroniques et informatiques (Kagermann, Helbig, Hellinger, & Wahlster, 2013; Kirazli & Hormann, 2015; MacDougall, 2014).

De nos jours, une quatrième révolution conduite par une démarche vers une industrie intelligente est déjà en cours. Elle est engendrée par les grands défis sans précédent que rencontrent les entreprises manufacturières. La production personnalisée, les petits lots de fabrication, les cycles de vie des produits qui deviennent plus courts, les délais raccourcis, la pression croissante à innover et les réseaux logistiques de plus en plus complexes sont parmi les défis (McKinsey Global Institute, 2012). Le facteur clé de survie et de compétitivité des entreprises est donc la flexibilité (Brettel, Fischer, Bendig, Weber, & Wolff, 2016). Certains spécialistes vont plus loin en exprimant que la flexibilité n'est plus suffisante. Ils proposent de parler de transformabilité. Selon Bauer, Hämmerle, Schlund et Vocke (2015), la flexibilité serait une qualité fondamentalement intrinsèque à un système tandis que la transformabilité serait la capacité de faire des changements structurels rapides et durables à un système existant.

Ce projet de révolution n'est pas limité aux industriels, les gouvernements sont les premiers propulseurs (Wang, Wan, Li, & Zhang, 2016). Des plans d'action stratégiques et des politiques d'accompagnement sont mis en place pour garantir le succès du changement. Différents termes sont employés pour désigner cette transformation. En Allemagne et au Canada, on parle d'« Industrie 4.0 » (Gouvernement du Québec, 2016; Kagermann et al., 2013). Aux États-Unis, ils évoquent l'« Internet industriel » (The industrial internet consortium, 2016). En Chine, ils proposent l'« Internet plus » (Premier Li Keqiang, 2015).

Le changement vers une industrie intelligente affecte aussi les réseaux logistiques. De nouveaux concepts favorisant cette transformation se développent comme l'internet physique. Un besoin d'avoir des équipements de manutention et d'entreposage adaptés se fait sentir pour mieux fonctionner en 4.0. Il est traduit par un certain nombre de défis imposés aux équipements et par conséquent à leurs constructeurs.

Les tenants et les aboutissants de ce chapitre sont l'identification et l'analyse des nouvelles exigences du contexte 4.0 vis-à-vis de la sélection des équipements de manutention et d'entreposage. Les travaux de proposition de méthodologies de sélection des équipements dans la littérature n'ont pas été réalisés dans un contexte 4.0, mais plutôt dans un contexte avant 4.0. Nous essayons de spécifier les nouvelles exigences pour la sélection des équipements de manutention et d'entreposage. Une évaluation des capacités d'adaptabilité des équipements est réalisée. Ces résultats permettront aux constructeurs des équipements d'entrepôt de s'adapter au contexte 4.0 et aux acheteurs d'en tenir compte lors de la sélection de ces équipements pour mieux fonctionner en 4.0. La Figure 8.1 présente la démarche globale de l'évaluation de la capacité d'adaptation des équipements de manutention et d'entreposage au contexte 4.0. Les étapes de la démarche sont expliquées et détaillées dans les sections suivantes du chapitre.

Après l'introduction, la section 8.2 présente les concepts et les caractéristiques de l'industrie 4.0. La section 8.3 décrit la logistique 4.0. Une comparaison entre logistique 4.0 et industrie 4.0 est faite. La section 8.4 présente les nouveaux défis des équipements de manutention et d'entreposage. La section 8.5 et la section 8.6 analysent respectivement les capacités des équipements de manutention et des équipements d'entreposage à s'adapter à ce nouveau contexte. Finalement, la section 8.7 conclut ce chapitre.

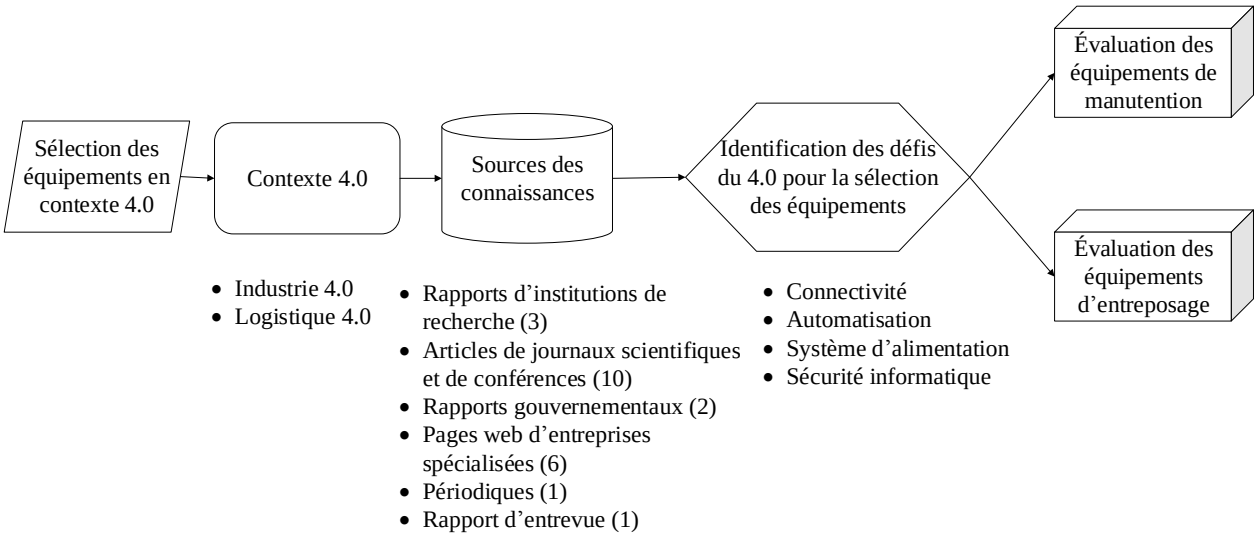


Figure 8.1 : Démarche globale de l'évaluation des capacités d'adaptation des équipements de manutention et d'entreposage au contexte 4.0

8.2 Industrie 4.0

La logique traditionnelle du processus de production est inversée en industrie 4.0. Désormais, c'est le produit qui communique avec la machine pour lui dire exactement ce qu'il faut faire. Des réseaux d'objets intelligents et une gestion indépendante des processus sont créés en connectant le monde réel au monde virtuel (MacDougall, 2014).

L'internet des objets, l'internet des services, les systèmes cyber-physiques et l'exploitation des données massives avec de puissants algorithmes favorisent entre autres ce nouvel environnement appelé aussi industrie intelligente (Dominici, Roblek, Abbate, & Tani, 2016; Roblek, Meško, & Krapež, 2016).

Afin d'implanter une démarche d'industrie 4.0, Kagermann et al. (2013) recommandent trois types d'intégration à réaliser primordialement : (1) intégration horizontale à travers les réseaux de valeurs, (2) intégration numérique de bout en bout de l'ingénierie à travers la chaîne de valeur, et (3) intégration verticale et réseautage des systèmes manufacturiers. Les auteurs détaillent les trois éléments dans leur rapport.

8.3 Logistique 4.0

Le terme logistique 4.0 commence à être employé par les professionnels du domaine pour spécifier une forme de logistique qui devrait accompagner la quatrième révolution industrielle en cours. Selon Gazin (2016), la chaîne logistique doit s'adapter aux changements qui s'opèrent dans l'industrie. Il sera toujours nécessaire de manutentionner, de transporter et d'entreposer les marchandises jusqu'à leur livraison au consommateur final.

Le Tableau 8.1 présente une comparaison entre l'industrie 4.0 et la logistique 4.0. La littérature collectée sur le sujet comprend des rapports d'institutions de recherche (3), des articles de journaux scientifiques et de conférences (10), des rapports gouvernementaux (2), des pages web d'entreprises spécialisées (6), des périodiques (1), et un rapport d'entrevue (1).

Les domaines d'application de l'industrie 4.0 et la logistique 4.0 sont distincts. Les convoyeurs et les systèmes de véhicules à guidage automatique (SVGA) utilisés en industrie 4.0 pour la manutention en interne figurent aussi dans les équipements de manutention de la logistique 4.0. Les concepts de base sont les mêmes dans les deux domaines à l'exception de l'internet physique de Montreuil (2011) qui peut être exploité en logistique 4.0. Ce dernier vise à interconnecter les réseaux logistiques séparés des entreprises. Certaines technologies à implanter afin de fonctionner en contexte 4.0 se retrouvent dans les deux domaines. D'autres technologies sont plus spécifiques aux équipements de manutention pour assurer leurs mouvements de façon autonome.

Tableau 8.1 : Comparaison entre industrie 4.0 et logistique 4.0

	Industrie 4.0	**Logistique 4.0**
Installations	• Usine	• Entrepôt • Plateforme • Magasin • Transporteur
Équipements de travail	• Machines • Robots • Convoyeurs • SVGA	• Équipements de manutention • Équipements d'entreposage • Camions • Trains
Concepts de base	• Internet des objets • Internet des services • Systèmes cyber-physiques • Données massives	• Internet des objets • Internet des services • Systèmes cyber-physiques • Données massives • Internet physique

Tableau 8.1 : Comparaison entre industrie 4.0 et logistique 4.0 (suite et fin)

	Industrie 4.0	**Logistique 4.0**
Technologies à implanter	• Capteurs • Identification par radiofréquence • Actionneurs • Progiciel de gestion intégré • Système d'exécution manufacturière	• Capteurs • Identification par radiofréquence • Actionneurs • Systèmes de localisation • Système de contrôle et de détection • Système de géoguidage • Système de navigation dans les allées étroites • Progiciel de gestion intégré • Système de gestion d'entrepôt • Système de pilotage d'entrepôt • Système d'exécution d'entrepôt

8.4 Défis de sélection des équipements de manutention et d'entreposage en contexte 4.0

Dans le contexte 4.0, les machines et les produits communiquent et interagissent entre eux de façon autonome. L'internet des objets et les systèmes cyber-physiques créent de nouvelles exigences (Kagermann et al., 2013). En logistique, les équipements de manutention et d'entreposage bénéficient de plus d'autonomie en opération.

Afin d'acquérir cette autonomie, nous avons identifié quatre nouveaux défis que les constructeurs d'équipements d'entrepôt doivent relever. Connaissant les caractéristiques des équipements d'entrepôt, l'identification des nouvelles exigences est faite à partir de la littérature publiée sur le concept 4.0 et les développements des équipements de manutention et d'entrepôt. Elle regroupe des articles scientifiques, des rapports techniques, des rapports de gouvernement, des rapports d'institutions spécialisées, des numéros de magazine et des pages web (Bauer et al., 2015; Brettel, Klein, & Friederichsen, 2016; Egemin Group NV, 2016; Gazin, 2016; Gouvernement du Québec, 2016; Kagermann et al., 2013; Kirazli & Hormann, 2015; Lawson, 2016; Linde Material Handling GmbH, 2016a, 2016b, 2016c, 2016d; Lom, Pribyl, & Svitek, 2016; MacDougall, 2014; McKinsey Global Institute, 2012; Premier Li Keqiang, 2015; The industrial internet consortium, 2016; Wang et al., 2016). Ils s'agissent notamment de posséder une connectivité, une automatisation, un

système d'alimentation et une sécurité informatique. Ce sont des caractéristiques incontournables en logistique 4.0. La méthodologie de sélection s'attardera désormais à filtrer tout d'abord les équipements selon ces quatre caractéristiques.

En analysant les données des articles de la littérature et plus particulièrement les caractéristiques, il s'avère que les auteurs n'ont pas travaillé dans le contexte d'une usine intelligente ou d'entrepôt intelligent. Premièrement, selon les données de l'ANNEXE E, la connectivité des équipements n'est pas questionnée. Nous estimons que c'est une caractéristique qui est apparue avec le 4.0. L'automatisation est interpellée par sept articles pour certains types d'équipements ou de mouvements (Chan, 2002; Chan et al., 2001; Cho & Egbelu, 2005; De Lit et al., 2002; Kulak, 2005; Matson et al., 1992; Mirhosseyni & Webb, 2009; Park, 1996). Six articles ont évoqué la disponibilité de source d'énergie comme caractéristique d'équipement ou de milieu, mais à des échelles différentes (Athawale & Chakraborty, 2011; Chakraborty & Banik, 2006; Fonseca et al., 2004; Malmborg et al., 1989; Sawant & Mohite, 2013; Sawant et al., 2011). Dans le contexte 4.0, on cherche à mettre l'accent sur de nouvelles technologies de batteries. Dix articles ont tenu compte des risques et de sécurité des équipements ainsi que la protection des produits tandis que la sécurité informatique devient plus préoccupante en logistique 4.0. (Ahmed & Lam, 2014; Ahmed Bouh & Riopel, 2017c; Cho & Egbelu, 2005; Gabbert & Brown, 1988, 1989; Hadi-Vencheh & Mohamadghasemi, 2015; Matt et al., 2011; Momani & Ahmed, 2011; Nguyen et al., 2016; Shelton & Jones, 1987).

8.4.1 Connectivité

La connectivité est réalisable avec des capteurs, des étiquettes d'identification par radiofréquence plus connues sous l'acronyme anglais RFID (Radio-frequency identification) et des systèmes de communication (WI-FI, Bluetooth ou Mobile Broadband). Elle permet de communiquer avec les unités de charge à déplacer, les autres équipements de manutention qui se déplacent et travaillent en équipe, ainsi qu'avec les équipements d'entreposage. Certaines technologies qui peuvent s'incorporer sur les équipements actuellement en service dans l'entrepôt sont déjà disponibles sur le marché. Des équipements conçus dès le départ avec ces caractéristiques seraient plus adaptés à fonctionner en 4.0 (Egemin Group NV, 2016; Linde Material Handling GmBH, 2016b).

La connectivité permet aussi aux équipements de recevoir et d'envoyer des données et des instructions aux systèmes centraux. Ces derniers sont des progiciels de gestion intégrés, des

systèmes de gestion d'entrepôt, des systèmes de pilotage d'entrepôt et des systèmes d'exécution d'entrepôt. Les progiciels de gestion intégrés sont plus connus sous l'acronyme anglais ERP (Enterprise ressource planning). Ils sont au plus haut niveau de l'architecture du réseau d'information et de communication de l'entrepôt. Des plateformes partagées avec les autres acteurs du réseau de distribution et des industriels peuvent être créées. Les systèmes de gestion d'entrepôt, plus connus sous l'acronyme anglais WMS (Warehouse management system), se situent au deuxième niveau de l'architecture. Ils alimentent en données l'ERP du niveau supérieur. Les systèmes de pilotage d'entrepôt, plus connus sous l'acronyme anglais WCS (Warehouse control system), se trouvent au troisième niveau de l'architecture. En recevant les informations des capteurs et des autres technologies placés sur les équipements, il alimente à leur tour le WMS en données. Les systèmes d'exécution d'entrepôt, plus connus sous l'acronyme WES (Warehouse execution system) combinent des fonctionnalités des WMS et des WCS et visent à les remplacer.

Jusqu'à aujourd'hui, les entrepôts automatisés et ceux employant des SVGA sont les seuls utilisant cette architecture développée du réseau d'information et de communication. Dans le contexte 4.0, les technologies de l'information et de communication sont très présentes.

8.4.2 Automatisation

L'automatisation se traduit par la capacité de se déplacer, de lever et de poser une charge sans l'intervention d'un opérateur humain. Elle s'applique aux équipements de manutention et aux transtockeurs qui desservent les palettiers de grande hauteur.

Pour ce faire, les technologies doivent ensemble concourir pour atteindre un maximum d'efficacité et d'opérabilité. On retrouve parmi elles des capteurs, des actionneurs, des systèmes de localisation, des systèmes de contrôle et de détection, des systèmes de géoguidage, et des systèmes de navigation dans les allées étroites. Certaines de ces technologies existent déjà sur le marché telles que des lasers de navigation ou des caméras 3D. D'autres technologies plus adaptées pour le 4.0 sont à développer. Certains transpalettes automatisés sont proposés par Linde Material Handling GmBH (2016b). Roux (2011) décrit certains types d'automatisme tels que l'automatisme de gestion de la rotation des fourches des chariots élévateurs plus particulièrement de type chariots élévateurs à fourche tridirectionnelle. Les fourches de ces chariots peuvent être pivotantes ou multidirectionnelles. Elles sont généralement montées sur un axe vertical qui peut lui-même se déplacer transversalement. L'automatisme gère simultanément la rotation des fourches et la

translation de l'axe sur lequel sont montées les fourches. Il facilite les transferts de palettes d'un côté de l'allée de service à l'autre sans sortir de l'allée ni risquer la collision avec les palettiers ou les palettes en place. Dans la plupart des cas, cet automatisme est devenu une caractéristique de base pour ce type de chariot. D'autres automatismes tels que l'assistance au positionnement en grandes hauteurs ou encore la détermination en temps réel de la position du chariot afin d'interdire l'accès à une allée ou une alvéole qui ne correspond pas à celle indiquée pour la préparation de la commande, etc.

8.4.3 Système d'alimentation

Le système d'alimentation doit être fait avec une technologie durable respectant les réglementations d'émission de gaz. Elle doit posséder une efficacité et une autonomie accrues. Les batteries lithium-ion se démarquent en ce moment des batteries plomb-acide conventionnelles. Elles ont été testées dans les équipements de manutention de Linde Material Handling GmBH (2016c). Le Tableau 8.2 montre la différence qui existe entre ces deux technologies.

Tableau 8.2 : Comparaison des batteries Lithium-ion et plomb-acide

Critères	**Lithium-ion**	**Plomb-acide**
Temps de chargement à plein	1,5 heures	8 heures
Niveau bas de déchargement	Jusqu'à 2%	Plus de 20%
Pourcentage de rétention de charge après 1250 cycles de chargement	50%	75%

Source : Linde Material Handling GmBH (2016c).

8.4.4 Sécurité informatique

La sécurité des travailleurs est une priorité en entrepôt. Les accidents de travail (décès) causés par les chariots élévateurs sont de deux à trois par année au Québec (Commission des normes & Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en Sécurité du travail (IRSST), 2015). Le risque n'est pas absent.

Dans un environnement 4.0, les humains et les machines robotisés vont se croiser dans les allées de service et les allées de circulation. L'automatisation des équipements ne devrait pas être vue comme une perte de l'intervention du cariste sur les machines en cas de nécessité. La coexistence des êtres humains et des machines est nécessaire même si le travail de routine est exécuté par les machines. Un haut niveau de sécurité est exigé (Kagermann et al., 2013).

Un deuxième type de sécurité est nécessaire. Il s'agit de la sécurité des réseaux informatiques auxquels sont connectés les équipements. Cheminod, Durante et Valenzano (2013) décrivent les risques qui existent dans les réseaux industriels. L'émergence de l'internet des objets a créé de nouvelles menaces de piratage. Waidner et Kasper (2016) rappellent que d'autres architectures et mécanismes de sécurité informatiques sont à développer pour le contexte 4.0. Les outils disponibles ne suffisent pas. Nous analysons la sécurité des réseaux informatiques des équipements dans les sections suivantes.

8.5 Équipements de manutention face aux défis de sélection en contexte 4.0

Il existe plusieurs types d'équipements de manutention en entrepôt. Ils peuvent être regroupés en neuf groupes : transpalettes, chariots manuels, appareils de levage, appareils élévateurs, gerbeurs, chariots automoteurs, tracteurs, équipements de manutention continue, systèmes de véhicules à guidage automatique. Les dictionnaires Institute of Industrial Engineers (2000) et Riopel et Croteau (2013) définissent ces groupes d'équipements. Certes, d'autres technologies existent et sont en développement, mais nous examinons simplement les équipements qui ont fait leurs preuves et qui sont traités dans la littérature scientifique.

En entrepôt, tous les équipements de manutention ne sont pas disposés à intégrer des technologies qui leur permettraient de posséder les quatre nouvelles caractéristiques. À partir de la liste de Ahmed Bouh et Riopel (2015a), le Tableau 8.3 présente une analyse de ces derniers.

La première colonne contient les groupes d'équipements de manutention. Les trois colonnes qui suivent spécifient si l'incorporation de technologies nécessaires pour la connectivité, l'automatisation et le système d'alimentation est réalisable sur lesdits équipements. Il y a quatre niveaux de réalisation : non réalisable pour une raison connue, réalisable avec condition, réalisable, et déjà presque réalisée. La raison connue de non-réalisation est l'absence totale de motorisation et d'énergie, c'est le cas des chariots manuels. Ils ne peuvent pas accueillir des technologies pour être automatisés parce qu'ils ne possèdent pas de moteurs ni de systèmes d'alimentation. Ils sont manœuvrés manuellement. En revanche, il est possible d'employer des technologies pour localiser les chariots manuels dans l'entrepôt, c'est la raison pour dire dans le Tableau 8.3 que la connectivité serait réalisable avec condition.

Le deuxième niveau est une incorporation de technologies réalisable avec condition. Elle s'applique à quatre groupes : les transpalettes, les appareils de levage, les tracteurs et les équipements de manutention continue. Le caractère commun de ces groupes est que leurs équipements peuvent être motorisés et ne sont pas tous manuels. La condition ici est la motorisation de l'équipement qui implique la présence d'un système d'alimentation. Le troisième niveau indique que l'incorporation est aisément réalisable, c'est le cas pour les appareils élévateurs, les gerbeurs et les chariots automoteurs. Ces équipements sont presque tous motorisés. Toutefois, l'équipement « escabeau roulant » appartenant aux appareils élévateurs est manuel. Il existe aussi certains gerbeurs qui sont manuels, mais à levée motorisée. Le dernier niveau de réalisation est celui des systèmes de véhicules à guidage automatique. Ils possèdent déjà certaines de ces caractéristiques, c'est pourquoi il est dit presque déjà réalisé. Il leur faudrait simplement une adaptation.

La cinquième colonne indique si la sécurisation informatique de l'équipement est nécessaire ou pas. Quatre niveaux de nécessité de la sécurisation informatique sont identifiés : non nécessaire, nécessaire avec condition, nécessaire, et déjà presque réalisée. La non-nécessité apparait pour le groupe des chariots manuels puisque les équipements ne sont ni connectés ni automatisés. La condition du deuxième niveau de nécessité de sécurisation informatique est la connectivité de l'équipement. Si l'équipement de manutention est connecté à l'internet, il est nécessaire de le sécuriser, c'est le cas des quatre groupes d'équipements connectables avec condition. En troisième niveau, la sécurisation est clairement nécessaire pour les mêmes groupes d'équipements dont la connectivité, l'automatisation et le système d'alimentation sont aisément réalisables. Les systèmes de véhicules à guidage automatique sont presque déjà sécurisés, une adaptation avec le 4.0 est nécessaire.

Tableau 8.3 : Équipements de manutention, connectivité, automatisation et système d'alimentation, sécurité informatique

Équipements de manutention		**Connectivité**	**Automatisation**	**Système d'alimentation**	**Sécurité informatique**
AL	Appareils de levage	Réalisable avec condition	Réalisable avec condition	Réalisable avec condition	Nécessaire avec condition

Tableau 8.3 : Équipements de manutention, connectivité, automatisation et système d'alimentation, sécurité informatique (suite et fin)

Équipements de manutention		**Connectivité**	**Automatisation**	**Système d'alimentation**	**Sécurité informatique**
CM	Transpalettes	Réalisable avec condition	Réalisable avec condition	Réalisable avec condition	Nécessaire avec condition
	Chariots manuels	Réalisable avec condition	Non réalisable	Non réalisable	Nécessaire avec condition
	Appareils élévateurs	Réalisable	Réalisable	Réalisable	Nécessaire
	Gerbeurs	Réalisable	Réalisable	Réalisable	Nécessaire
	Chariots automoteurs	Réalisable	Réalisable	Réalisable	Nécessaire
	Tracteurs	Réalisable avec condition	Réalisable avec condition	Réalisable avec condition	Nécessaire avec condition
CTCI et CTCV	Équipements de manutention continue	Réalisable avec condition	Réalisable avec condition	Réalisable avec condition	Nécessaire avec condition
SVGA	Systèmes de véhicules à guidage automatique	Presque déjà réalisée	Presque déjà réalisée	Presque déjà réalisée	Presque déjà réalisée

En évaluant la potentialité des équipements de manutention à s'adapter au nouveau contexte, il s'avère qu'une grande majorité est capable de fonctionner en 4.0 par le biais d'une mise à niveau. La condition de motorisation pour l'automatisation et la disponibilité d'une source d'énergie qui conditionne la connectivité disqualifie certains équipements. Par exemple, la connectivité des chariots manuels est classée comme étant non réalisable, car les chariots manquent de source d'énergie pour alimenter les appareils et interfaces personne-machine qui seraient installés.

8.6 Équipements d'entreposage face aux défis de sélection en contexte 4.0

Il existe plusieurs types d'équipements d'entreposage pour différentes unités de charge. Ils peuvent être classés en sept groupes : palettiers, palettiers avec transtockeur(s), équipements pour charge

longue, équipements pour charge de faible épaisseur, équipements pour charge conteneurisée, équipements pour charge à forme non standardisée, et équipements pour charge en vrac à granulométrie. Les palettiers peuvent être à simple profondeur, à double profondeur, à crémaillères, à accumulation statique ouvert sur une face, à accumulation statique ouvert sur deux faces, à accumulation dynamique, et à gravité inversée. Les râteliers en porte-à-faux et les râteliers d'entreposage vertical sont utilisés pour entreposer les charges longues. Des supports d'entreposage vertical et des pupitres d'entreposage sont utilisés pour les charges de faible épaisseur. Pour les charges conteneurisées, on peut utiliser des casiers à accumulation dynamique, des carrousels verticaux ou horizontaux, des systèmes d'entreposage dynamique sur transporteurs, des étagères d'entreposage, des casiers à rotation indépendante, des magasins automatisés ou des magasins mobiles. Pour les charges à forme non standardisée, on utilise des cabinets à tiroirs, des panneaux d'accrochage ou des structures portatives. Pour les charges en vrac à granulométrie, on retrouve généralement des silos ou des trémies. Les définitions de ces équipements fournies par Institute of Industrial Engineers (2000) et Riopel et Croteau (2013) sont adoptées. Certes, d'autres technologies existent et sont en développement, comme il a déjà été mentionné nous examinons simplement les équipements qui ont fait leurs preuves et qui sont traités dans la littérature scientifique.

Le Tableau 8.4 présente une analyse des équipements d'entreposage selon les quatre défis de sélection en contexte 4.0.

La première colonne contient les équipements d'entreposage. La deuxième colonne indique si la connectivité est réalisable ou pas sur ces équipements. Il s'avère qu'elle est réalisable sur tous les équipements d'entreposage. Elle s'explique par leur caractère de structures fixes et statiques qui pourraient recevoir des sources d'alimentation en énergie. Par exemple, des capteurs de poids peuvent être placés sur les équipements d'entreposage pour peser les unités de charges palettisées présentes dans une alvéole de palettier. Cette donnée serait envoyée au WCS qui la transmettrait au WMS afin de prendre des décisions d'allocation des espaces.

La troisième et la quatrième colonne spécifient si l'automatisation et le système d'alimentation sont nécessaires et à quel niveau. Nous avons établi trois niveaux : non nécessaire, réalisable avec condition et presque déjà réalisée. Selon le Tableau 8.4, l'automatisation et le système d'alimentation ne seraient pas nécessaires pour onze groupes d'équipements puisqu'ils sont fixes

et statiques. La condition du deuxième niveau de réalisation est la motorisation de l'équipement. Les équipements appartenant au même groupe peuvent être manuels ou motorisés, c'est le cas de six groupes d'équipements d'entreposage. Il existe, par exemple, des râteliers en porte-à-faux mécanisés. L'équipement peut être automatisé s'il est motorisé et il a donc besoin d'un système d'alimentation. En troisième niveau, les transtockeurs et les magasins automatisés sont déjà automatisés. Une modification adaptée au 4.0 est nécessaire.

La cinquième colonne indique si la sécurisation informatique de l'équipement est demandée ou pas. Puisque tous les équipements sont connectables, il est impératif de les sécuriser.

Les équipements d'entreposage sont pour la plupart des structures fixes. Dans le contexte 4.0, ils ne serviront plus seulement qu'à servir d'espaces pour accueillir des unités de charge. Ils vont aussi être connectés à l'internet et au réseau d'entreprise. Ils pourront communiquer avec les produits, les équipements de manutention et les systèmes de gestion ou autres.

Est-ce qu'une automatisation est nécessaire ? Pour certains équipements comme les transtockeurs et les palettiers mobiles, l'automatisation existe déjà et pourra être adaptée au 4.0. Pour les autres, le besoin n'a pas lieu puisque ce sont des équipements fixes et statiques.

L'alimentation en énergie des structures peut se faire directement à travers un branchement sur le secteur du bâtiment. Des batteries sont utiles pour les appareils mobiles qui se déplacent.

La sécurisation des données, du réseau et du bon fonctionnement des équipements est impérative. Les étiquettes d'identification par radiofréquence installées sur les équipements ou produits peuvent être elles aussi piratées (Lawson, 2016).

Tableau 8.4 : Équipements d'entreposage, connectivité, automatisation, système d'alimentation, sécurité informatique

Équipements d'entreposage		**Connectivité**	**Automatisation**	**Système d'alimentation**	**Sécurité informatique**
Pa	Palettiers	Réalisable	Non nécessaire	Non nécessaire	Nécessaire
	Palettiers mobiles	Réalisable	Réalisable avec condition	Réalisable avec condition	Nécessaire
AS/RS	Palettiers avec transtockeur(s)	Réalisable	Presque déjà réalisée	Presque déjà réalisée	Nécessaire
ASE	Râteliers en porte-à-faux	Réalisable	Réalisable avec condition	Réalisable avec condition	Nécessaire
	Râteliers d'entreposage vertical	Réalisable	Non nécessaire	Non nécessaire	Nécessaire
	Supports d'entreposage vertical	Réalisable	Non nécessaire	Non nécessaire	Nécessaire
	Pupitres d'entreposage	Réalisable	Non nécessaire	Non nécessaire	Nécessaire
	Casiers à accumulation dynamique	Réalisable	Non nécessaire	Non nécessaire	Nécessaire
	Carrousels	Réalisable	Réalisable avec condition	Réalisable avec condition	Nécessaire
	Entreposages dynamiques sur transporteurs	Réalisable	Réalisable avec condition	Réalisable avec condition	Nécessaire
	Étagères d'entreposage	Réalisable	Non nécessaire	Non nécessaire	Nécessaire
	Casiers à rotation indépendante	Réalisable	Réalisable avec condition	Réalisable avec condition	Nécessaire
	Magasins automatisés	Réalisable	Presque déjà réalisée	Presque déjà réalisée	Nécessaire
	Magasins mobiles	Réalisable	Réalisable avec condition	Réalisable avec condition	Nécessaire
	Cabinets à tiroirs	Réalisable	Non nécessaire	Non nécessaire	Nécessaire
	Panneaux d'accrochage	Réalisable	Non nécessaire	Non nécessaire	Nécessaire
	Structures portatives	Réalisable	Non nécessaire	Non nécessaire	Nécessaire
SECV	Silos	Réalisable	Non nécessaire	Non nécessaire	Nécessaire
	Trémies	Réalisable	Non nécessaire	Non nécessaire	Nécessaire

8.7 Conclusion

Une logistique adaptée est nécessaire pour accompagner le passage vers la quatrième révolution industrielle qui se prépare. Elle est connue sous le nom de logistique 4.0.

Désormais, les prochains équipements d'entrepôt seront équipés de technologies leur permettant de posséder de nouvelles caractéristiques. Ils serviront de critères de sélection. Il s'agit en l'occurrence de la connectivité, de l'automatisation, du système d'alimentation et de la sécurité informatique. Les autres équipements de manutention qui sont en cours d'exploitation dans les entrepôts pourront bénéficier d'une mise à niveau. Certaines technologies peuvent s'imbriquer sur les équipements sans complication (Linde Material Handling GmBH, 2016b). D'autres équipements ne seront pas envisageables.

Le nouveau contexte crée des espaces de travail partagés par des humains et des machines transformées pour certaines en robots. La sécurité des vies humaines, des équipements et de produits prend plus de poids. À cela s'ajoute la sécurité des réseaux, des données et des équipements connectés. De nouvelles menaces informatiques ciblant, par exemple, l'internet des objets apparaissent. Des moyens de protection adaptés au 4.0 sont nécessaires.

L'entrepôt peut toujours garder une partie de ses activités en mode traditionnel. Le besoin des tâches et le contexte d'entreprise détermineront, entre autres, la nécessité de basculer ou pas totalement en 4.0. Un équipement uniquement connecté est considéré comme un équipement capable de fonctionner en contexte 4.0. Il n'est pas nécessaire d'automatiser complètement tous les équipements de manutention et d'entreposage pour les transformer en des SVGA ou des AS/RS.

Le changement de la quatrième révolution industrielle est une opportunité pour plusieurs acteurs du domaine. Les constructeurs d'équipements de manutention et d'entreposage, les fournisseurs de progiciels et de systèmes d'information et de pilotage, les fournisseurs de capteurs et des technologies d'information et de communication, etc. De nouvelles demandes et de nouveaux marchés vont se créer. Il est temps de se rendre compte de cette réalité et de garder son élan d'avance sur les autres avant qu'ils envahissent les marchés. En l'occurrence, c'est le cas du groupe Équipement BONI avec lequel nous collaborons dans ces recherches.

Le chapitre suivant conclut la thèse.

CHAPITRE 9 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'entreposage est un maillon essentiel de la chaîne logistique par sa mission et ses fonctions. La maitrise des coûts logistiques passe également par la maitrise des coûts de manutention et d'entreposage. Il est exprimé dans la littérature du domaine qu'il y a un besoin de guide de sélection des équipements de manutention et d'entreposage. Nous avons effectué une revue de littérature sur la sélection des équipements de manutention et d'entreposage qui analyse 74 articles publiés de 1985 à 2017. Elle a permis de présenter ce qui a été réalisé jusqu'à aujourd'hui dans ce domaine et faire des suggestions de recherche. Certaines des suggestions de recherche de la revue de littérature ont fait l'objet des travaux de cette thèse et nous avons essayé d'apporter des propositions. Les propositions et les recommandations sont décrites dans les paragraphes qui suivent.

Il existe plusieurs types d'équipements de manutention et d'entreposage dépendamment de l'unité de charge des produits. Nous avons consulté une vaste documentation sur les systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. Un système d'entreposage est un équipement d'entreposage couplé à un équipement de manutention. Les données collectées ont permis d'élaborer et de proposer des fiches techniques caractérisant quinze systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. Elles ont été validées par un industriel québécois Équipement BONI. La synthèse des fiches techniques est exploitée dans les chapitres 5 et 6 comme base de données. Nous avons mené le même travail de documentation pour les petites charges, mais les données n'ont pas été suffisantes pour réaliser des fiches techniques sur les équipements d'entreposage destinés aux petites charges.

Les méthodologies de sélection existantes dans la littérature concernent en grande partie la sélection des équipements de manutention. Nous proposons une méthodologie qui aide les concepteurs à mieux choisir les systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. Elle est constituée d'un SBC et de la méthode FTOPSIS. La modélisation et la résolution se font par logique floue. Les formes des fonctions d'appartenance des ensembles flous sont descriptives pour le moment et les paramètres sont des valeurs prédéterminées. Différents projets de recherche sont à mener pour pouvoir mesurer avec des simulateurs les performances de chaque système d'entreposage par rapport aux critères afin de définir les formes et les paramètres des fonctions d'appartenance des ensembles flous.

Une extraction automatique de règles de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées est faite. Une base de données est générée à partir de la base de connaissances sur les systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées répertoriées dans la littérature par les experts comme James A. Tompkins. Il n'a pas été possible d'obtenir cette base de données du terrain. L'algorithme C4.5 de type apprentissage machine a été implanté pour réaliser l'extraction d'information. Un arbre de décision pour la sélection des cas particuliers des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées est élaboré. La succession des critères de décision de l'arbre est justifiée mathématiquement. Une base de données regroupant les contextes réels des entrepôts existants aurait peut-être donnée d'autres règles de sélection.

Un entrepôt n'est pas toujours constitué que par des rayonnages de charges palettisées. On retrouve aussi l'entreposage des petites charges. Elle est principalement réalisée dans la zone de préparation de commande et en zone de réserve pour certains types de produits qui sont approvisionnés en petites quantités. Nous proposons une méthodologie de sélection des équipements d'entreposage pour ce type d'unité de charge. Elle est constituée d'un SBC et de la méthode AHP. Les données sur les équipements et leurs caractéristiques sont de la littérature, mais elles ne sont pas complètes comme pour les systèmes des charges palettisées. Les données manquantes sont générées en faisant des comparaisons par paire des équipements d'entreposage et des critères à l'aide de la méthode AHP. La collaboration avec les spécialistes des équipements d'entreposage des petites charges est nécessaire pour le moment pour appliquer cette méthodologie.

Trois révolutions industrielles ont eu lieu dans le passé. Elles ont été caractérisées par les avancées scientifiques et techniques des époques. Cela a conduit à des progrès sociaux et économiques considérables. Une autre révolution est en train de se vivre. Elle est connue sous le nom d'industrie 4.0. Le concept d'internet des objets est importé en contexte industriel. Les produits pourront communiquer avec les machines pour leur dire quoi faire. Ce changement des processus industriels impacte les processus logistiques. Une logistique adaptée est nécessaire. Cette dernière crée de nouveaux défis à plusieurs niveaux. Une identification et une analyse des nouveaux défis de sélection des équipements d'entrepôt en ce contexte sont faites. Les capacités d'adaptation des équipements de manutention et d'entreposage aux nouvelles exigences sont évaluées.

L'originalité des travaux de cette thèse peut être décrite comme suit. Pour la première fois dans la littérature, les défauts de la charge palettisée sont tenus en compte lors de la sélection des systèmes

d'entreposage destinés aux charges palettisées aux côtés des autres critères. Les défauts de la charge palettisée sont : défauts de construction; défauts de forme; défauts d'occupation de la surface de la palette; autres types de défauts; défauts d'emballage des colis et état de la palette. Ces défauts caractérisent la stabilité et la compacité de la charge palettisée. Ils ne sont pas tous tolérables par les systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées pour leur exploitation en toute sécurité. La méthodologie proposée permet d'identifier les défauts qui apparaissent sur la charge palettisée et écarter les systèmes d'entreposage qui ne les tolèrent pas avant d'analyser les autres caractéristiques. Pour la première fois dans la littérature, une technique d'exploration de données (Data mining) est appliquée au problème de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. Les techniques d'exploration de données peuvent être exploitées davantage pour apporter des solutions aux différents problèmes de sélection des équipements de manutention et d'entreposage. Pour la première fois dans la littérature, la sélection des équipements de manutention et d'entreposage est regardée du point de vue de la quatrième révolution industrielle.

Les propositions de cette thèse sont pour la plupart des premiers essais dans ce domaine. Les dernières sections des chapitres discutent les limites des propositions qui y sont faites. Nous recommandons une mise à jour continue des différentes bases de connaissances afin d'intégrer les avancements technologiques. Pour le problème de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées, il n'est pas obligatoire que toutes les formes de représentation des fonctions d'appartenance de tous les ensembles flous de chaque critère soient les mêmes. Les paramètres de chaque fonction d'appartenance sont supposés être mesurés, discutés et validés. Les méthodologies de sélection pourraient être améliorées et programmées en langage informatique afin d'automatiser les processus. Les problèmes de sélection des équipements de manutention et d'entreposage destinés aux types d'unités de charges (charges longues, charges en vrac, etc.) sont à traiter. Les problèmes de sélection des modèles des équipements de manutention et d'entreposage sont à couvrir. L'application des techniques d'intelligence artificielle autre que les systèmes experts et systèmes basés sur la connaissance dans les problèmes de sélection des équipements est un autre axe de recherche. Une mise à jour des défis du contexte 4.0 et des évaluations des capacités de maturité des équipements de manutention et d'entreposage est nécessaire. La collaboration entre les chercheurs et les praticiens est recommandée pour mieux aider les industries à résoudre leurs problèmes.

Nous espérons que les propositions de cette thèse serviront d'inspiration à d'autres efforts de recherche pour contribuer davantage à améliorer les outils d'aide à la décision destinés aux concepteurs d'entrepôt et d'usine.

BIBLIOGRAPHIE

Ahmed, A., & Lam, S. S. (2014). *Material Handling Equipment Selection Using Multi-Attribute Utility Theory and Monte Carlo Simulation.* Communication présentée à 2014 Industrial and Systems Engineering Research Conference, Toronto, Canada.

Ahmed Bouh, M., & Riopel, D. (2015a). *Material handling equipment selection: new classifications of equipments and attributes.* Acte du 6th IESM Conference, Seville (p. 461-468). doi: 10.1109/IESM.2015.7380198

Ahmed Bouh, M., & Riopel, D. (2015b). *Sélection des équipements de manutention: revue de littérature.* Acte du 11e Congrès international de génie industriel-CIGI2015, Québec (p. 10).

Ahmed Bouh, M., & Riopel, D. (2016a). *Fiches techniques des systèmes d'entreposage des charges palettisées* (Rapport no CIRRELT-2016-21). Montréal: CIRRELT. Tiré de https://www.cirrelt.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2016-21.pdf

Ahmed Bouh, M., & Riopel, D. (2016b). *Système hybride flou multicritère à base de connaissance pour la sélection des systèmes d'entreposage des charges palettisées.* Acte du 11th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation - MOSIM'16, Montréal (p. 10).

Ahmed Bouh, M., & Riopel, D. (2017a). *Défis de sélection des équipements d'entrepôt en contexte 4.0.* Acte du 12e Congrès international de génie industriel - CIGI 2017, Compiègne (p. 10).

Ahmed Bouh, M., & Riopel, D. (2017b). *Guide de sélection des systèmes d'entreposage des charges palettisées caractérisés en langage flou* (Rapport no CIRRELT-2017-66). Montréal: CIRRELT. Tiré de http://www.cirrelt.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2017-66.pdf

Ahmed Bouh, M., & Riopel, D. (2017c). *Méthodologie de sélection des équipements d'entreposage des petites charges à l'aide d'un système basé sur la connaissance et la méthode AHP.* Acte du 12e Congrès international de génie industriel - CIGI 2017, Compiègne (p. 10).

Al-Meshaiei, E. A. E. S. (1999). *An expert system for material handling equipment selection.* (Ph.D, University of Warwick, Warwick).

Ali, I., Cook, W. D., & Kress, M. (1986). On the minimum violations ranking of a tournament. *Management Science, 32*(6), 660-672.

Anthony, S. (2008). Packaging and materials handling. Dans R. A. Kulwiec (Édit.), *Materials Handling Handbook* (p. 717-728). doi: 10.1002/9780470172490.ch15

Apple, J. M. (1972). *Material handling systems design*. New York: The Ronald Press Company.

Apple, J. M. (1977). *Plant layout and material handling*. New York: Wiley.

Apple, J. M., Meller, R. D., & White, J. A. (2010). Empirically-based warehouse design: can academics accept such an approach. Dans *Progress in Material Handling Research: 2010* (p. 1-24). Charlotte, NC: Material Handling Institute.

Apté, C. (1997). Data mining: an industrial research perspective. *IEEE Computational Science and Engineering, 4*(2), 6-9.

Athawale, V. M., & Chakraborty, S. (2011). Decision making for material handling equipment selection using ELECTRE II method. *Journal of the Institution of Engineers, 91*(March), 9-17.

Attia, F., Hosny, O., Ramu, S., & Chawla, N. (1992). *EMHES: an expert system for material handling equipment selection.* Communication présentée à Artificial Intelligence and Expert Systems Applications, Gournay sur Marne, France (p. 407-412).

Bagadia, K. (2008). Definitions and classifications. Dans R. A. Kulwiec (Édit.), *Materials Handling Handbook* (p. 101-116). doi: 10.1002/9780470172490.ch4

Baker, P., & The Chartered Institute of Logistics and Transport. (2010). *The Principles of Warehouse Design* (3e éd.). United Kingdom: Institute of Logistics & Transport.

Ballou, R. H. (2004). *Business logistics/supply chain management: Planning, organizing, and controlling the supply chain*. London: Pearson Prentice Hall.

Bandopadhyay, S., & Venkatasubramanian, P. (1987). Expert systems as decision aid in surface mine equipment selection. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 1*(2), 159-165.

Banks, J. (1990). The simulation of material handling systems. *Simulation, 55*(5), 261-270.

Bartholdi, J. J., & Hackman, S. T. (2014). *Warehouse & Distribution Science: Release 0.96*. http://warehouse-science.com: The Supply Chain and Logistics Institute.

Bauer, W., Hämmerle, M., Schlund, S., & Vocke, C. (2015). Transforming to a Hyper-connected Society and Economy–Towards an "Industry 4.0". *Procedia Manufacturing, 3* 417-424.

Bauters, K., Govaert, T., Limère, V., & Landeghem, H. V. (2015). Forklift Free Factory: a simulation model to evaluate different transportation systems in the automotive industry. *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology, 7*(2), 238-259.

Bookbinder, J. H., & Gervais, D. (1992). Material-handling equipment selection via an expert system. *Journal of Business Logistics, 13*(1), 149-172.

Bowersox, D. J., Closs, D. J., & Cooper, M. B. (2002). *Supply chain logistics management*. Boston: McGraw-Hill.

Bozer, Y. A., & White, J. A. (1984). Travel-time models for automated storage/retrieval systems. *IIE transactions, 16*(4), 329-338.

Braglia, M., Gabbrielli, R., & Miconi, D. (2001). Material handling device selection in cellular manufacturing. *Journal of Multi- Criteria Decision Analysis, 10*(6), 303-315.

Brettel, M., Fischer, F. G., Bendig, D., Weber, A. R., & Wolff, B. (2016). Enablers for self-optimizing production systems in the context of industrie 4.0. *Procedia CIRP, 41* 93-98. doi: 10.1016/j.procir.2015.12.065

Brettel, M., Klein, M., & Friederichsen, N. (2016). The relevance of manufacturing flexibility in the context of industrie 4.0. *Procedia CIRP, 41* 105-110. doi: 10.1016/j.procir.2015.12.047

Cai, X. (2010). *Performance evaluation of warehouses with automated storage and retrieval technologies.* (Ph.D, University of Louisville, Louisville, Kentucky).

Castleberry, G. A. (1990). *Material handling equipment decision making.* Communication présentée à Manufacturing International '90, New York, NY (p. 187-193).

Chai, J., Liu, J. N. K., & Ngai, E. W. T. (2013). Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature. *Expert Systems with Applications, 40*(10), 3872-3885. doi: 10.1016/j.eswa.2012.12.040

Chakraborty, S., & Banik, D. (2006). Design of a material handling equipment selection model using analytic hierarchy process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 28*(11-12), 1237-1245. doi: 10.1007/s00170-004-2467-y

Chakraborty, S., & Prasad, K. (2016). A QFD-based expert system for industrial truck selection in manufacturing organizations. *Journal of Manufacturing Technology Management, 27*(6), 800-817. doi: 10.1108/JMTM-02-2016-0020

Chan, F. T. S. (2002). Design of material handling equipment selection system: an integration of expert system with analytic hierarchy process approach. *Integrated Manufacturing Systems, 13*(1), 58-68. doi: 10.1108/09576060210411512

Chan, F. T. S., Ip, R. W. L., & Lau, H. (2001). Integration of expert system with analytic hierarchy process for the design of material handling equipment selection system. *Journal of Materials Processing Technology, 116*(2–3), 137-145. doi: 10.1016/S0924-0136(01)01038-X

Chan, F. T. S., & Swarnkar, R. (2006). Ant colony optimization approach to a fuzzy goal programming model for a machine tool selection and operation allocation problem in an FMS. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 22*(4), 353-362.

Chang, D.-T., Wen, U.-P., & Lin, J. T. (1995). The impact of acceleration/deceleration on travel-time models for automated storage/retrieval systems. *IIE transactions, 27*(1), 108-111.

Cheminod, M., Durante, L., & Valenzano, A. (2013). Review of security issues in industrial networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics, 9*(1), 277-293. doi: 10.1109/TII.2012.2198666

Cho, C., & Egbelu, P. J. (2005). Design of a web-based integrated material handling system for manufacturing applications. *International Journal of Production Research, 43*(2), 375-403. doi: 10.1080/0020754042000268866

Choo, E. U., & Wedley, W. C. (2004). A common framework for deriving preference values from pairwise comparison matrices. *Computers & Operations Research, 31*(6), 893-908.

Chopra, S., & Meindl, P. (2004). *Supply chain management: Strategy, planning, and operation*. Upper Saddle River: Prentice Hall.

Chu, H. K., Egbelu, P. J., & Wu, C.-T. (1995). ADVISOR: A computer-aided material handling equipment selection system. *International Journal of Production Research, 33*(12), 3311-3329. doi: 10.1080/00207549508904876

Chung, J., & Tanchoco, J. M. A. (2009). Material Handling Automation in Production and Warehouse Systems. Dans S. Y. Nof (Édit.), *Springer Handbook of Automation* (p. 961-979). Berlin Heidelberg: Springer.

Colloc, J. C. (1977). *Étude de l'entrepôt de stockage*: Commerciale Européenne d'Editions et de Promotion.

Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST), & Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en Sécurité du travail (IRSST). (2015). Le chariot élévateur : un véhicule répandu, mais incompris. *Prévention au travail, 27*(4), 47. Tiré de http://preventionautravail.com/archives-numeros/12-hiver-2014-2015/file.html

Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail (CNESST), & Association sectorielle transport entreposage (ASTE). (2009). *La sécurité des palettiers: Fabrication, achat, installation et utilisation*. Québec: CNESST.

Coyle, J. J., Bardi, E. J., & Langley, C. J. (2003). *The management of business logistics : a supply chain perspective*. Mason: South-Western/Thomson Learning.

Dancey, D., Bandar, Z. A., & McLean, D. (2007). Logistic model tree extraction from artificial neural networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 37*(4), 794-802. doi: 10.1109/TSMCB.2007.895334

De Lit, P., L'Eglise, T., Danloy, J., Rekiek, B., & Delchambre, A. (2002). Selecting Material Handling Equipment with Promethee. Dans P. Chedmail, G. Cognet, C. Fortin, C. Mascle & J. Pegna (Édit.), *Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering: Proceedings of the Third IDMME Conference Held in Montreal, Canada, May 2000* (p. 331-338). Dordrecht: Springer Netherlands.

De Vos, D., & Van Landeghem, H. (2004). *Automated knowledge creation from logistical benchmarking data.* Communication présentée à International Conference on Cybernetics and Informatics Technologies, Systems and Applications and 10th International Conference on Information Systems Analysis and Synthesis (CITSA/ISAS 2004), Orlando (vol. 2, p. 369-374).

Deb, S., Bhattacharyya, B., & Sorhkel, S. (2003). Facility layout and material handling system selection planning using hybrid methodology. *International Journal of Industrial Engineering-Theory Applications and Practice, 10*(3), 289-297.

Deb, S. K., Bhattacharyya, B., & Sorkhel, S. K. (2002). *Material handling equipment selection by fuzzy multi-criteria decision making methods.* Communication présentée à International Conference on Fuzzy Systems, Berlin (p. 99-105).

Devys, P. (1985). *La Palettisation tome 1: les bases de la palettisation*: Technique et documentation.

Dominici, G., Roblek, V., Abbate, T., & Tani, M. (2016). Click and drive: Consumer attitude to product development: Towards future transformations of the driving experience. *Business process management journal, 22*(2), 420-434. doi: 10.1108/BPMJ-05-2015-0076

Egemin Group NV. (2016). We deliver value-added automated material handling solutions. Tiré de http://www.egemin-automation.com/en/

Fisher, E. L., Farber, J. B., & Kay, M. G. (1988). MATHES: An expert system for material handling equipment selection. *Engineering Costs and Production Economics, 14*(4), 297-310. doi: 10.1016/0167-188X(88)90034-1

Fonseca, D. J., Uppal, G., & Greene, T. J. (2004). A knowledge-based system for conveyor equipment selection. *Expert Systems with Applications, 26*(4), 615-623. doi: 10.1016/j.eswa.2003.12.011

Frank, E., & Kramer, S. (2004). *Ensembles of nested dichotomies for multi-class problems.* Communication présentée à Twenty-First International Conference on Machine Learning (ICML 2004), Banff (p. 305-312).

Frazelle, E. (1985). Suggested techniques enable multi-criteria evaluation of material handling alternatives. *Industrial Engineering, 17*(2), 42-48.

Gabbert, P. S., & Brown, D. E. (1988). *General Electric: A case study in materials handling system design.* Communication présentée à 1988 International Industrial Engineering Conference (p. 153-158).

Gabbert, P. S., & Brown, D. E. (1989). Knowledge-based computer-aided design of materials handling systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 19*(2), 188-196. doi: 10.1109/21.31025

Gazin, Y. (2016). *Intralogistics 4.0 at Egemin Automation* (F. Brandmaier, Intervieweur). Tiré de http://www.kiongroup.com/en/main/innovation/industrial_revolution/intralogistics_4_0/intralogistics4_0_9474.jsp

Georges, S. (2002). La manutention au cœur de la logistique. *Techniques de l'ingénieur Appareils de levage et chariots de manutention, TIB118DUO*(AG7000).

Golany, B., & Kress, M. (1993). A multicriteria evaluation of methods for obtaining weights from ratio-scale matrices. *European Journal of Operational Research, 69*(2), 210-220. doi: http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(93)90165-J

Gouvernement du Canada. (2016). Transport et entreposage (SCIAN 48-49) : Investissement en capital. Tiré de https://www.ic.gc.ca/app/scr/sbms/sbb/cis/investissementenCapital.html?code=48-49&lang=fra

Gouvernement du Québec. (2016). *Plan d'action en économie numérique*. Québec: Gouvernement du Québec. Tiré de https://www.economie.gouv.qc.ca/fileadmin/contenu/documents_soutien/strategies/economie_numerique/paen.pdf

Greengard, S. (2015). The Internet of things. Boston: MIT Press.

Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. F. (2010). Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research, 203*(3), 539-549. doi: 10.1016/j.ejor.2009.07.031

Hadi-Vencheh, A., & Mohamadghasemi, A. (2015). A new hybrid fuzzy multi-criteria decision making model for solving the material handling equipment selection problem. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 28*(5), 534-550. doi: 10.1080/0951192X.2014.880948

Haidar, A., & Naoum, S. (1996). Opencast mine equipment selection using genetic algorithms. *International Journal of Surface Mining and Reclamation, 10*(2), 61-67.

Halsey, M. (1998). Order Picking Systems. Dans J. A. Tompkins & J. D. Smit (Édit.), *The warehouse management handbook* (2e éd.). Raleigh: Tompkins Press.

Hassan, M. M. D. (2010). A framework for selection of material handling equipment in manufacturing and logistics facilities. *Journal of Manufacturing Technology Management, 21*(2), 246-268. doi: 10.1108/17410381011014396

Hassan, M. M. D. (2014). An evaluation of input and output of expert systems for selection of material handling equipment. *Journal of Manufacturing Technology Management, 25*(7), 1049-1067. doi: 10.1108/JMTM-08-2012-0077

Hassan, M. M. D., Hogg, G. L., & Smith, D. R. (1985). A construction algorithm for the selection and assignment of materials handling equipment. *International Journal of Production Research, 23*(2), 381-392. doi: 10.1080/00207548508904715

Heragu, S. S. (2008). *Facilities design*. Boca Raton: CRC Press.

Heragu, S. S., Cai, X., Krishnamurthy, A., & Malmborg, C. J. (2011). Analytical models for analysis of automated warehouse material handling systems. *International Journal of Production Research, 49*(22), 6833-6861.

Heragu, S. S., & Ekren, B. (2009). Materials Handling System Design. Dans M. Kutz (Édit.), *Environmentally Conscious Materials Handling* (p. 1-29). New York, NY: Wiley.

Hosni, Y. A. (1989). Inference engine for material handling selection. *Computers & Industrial Engineering, 17*(1–4), 79-84. doi: 10.1016/0360-8352(89)90040-5

Institut national de recherche et de sécurité (INRS), & Syndicat des industries de matériels de manutention. (2001). *Les rayonnages métalliques*. Paris: Institut national de recherche et de sécurité (INRS).

Institute of Industrial Engineers. (2000). *Industrial engineering terminology: a revision of ANSI Z94.0-1989 : an American national standard, approved 1998*. Norcross: Industrial Engineering and Management Press.

Jiamruangjarus, P., & Naenna, T. (2016). An integrated multi-criteria decision-making methodology for conveyor system selection. *Cogent Engineering, 3*(1), 16. doi: 10.1080/23311916.2016.1158515

Johnson, J. C., Wood, D. F., Wardlow, D. L., & Murphy, P. R. (1999). *Contemporary logistics*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.

Julien, B. (1994). An extension to possibilistic linear programming. *Fuzzy Sets and Systems, 64*(2), 195-206.

Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., & Wahlster, W. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0: Securing the future of german manufacturing industry Final report of the industrie 4.0 working group*. Tiré de http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf

Karande, P., & Chakraborty, S. (2013). Material handling equipment selection using weighted utility additive theory. *Journal of Industrial Engineering, 2013* 9. doi: 10.1155/2013/268708

Kaufmann, A. (1973). *Introduction à la théorie des sous-ensembles flous à l'usage des ingénieurs (Fuzzy sets theory) 1. Éléments théoriques de base*. Paris: Masson et Cie.

Kay, M. G. (2012). *Material handling equipment*. North Carolina State University: Fitts Dept. of Industrial and Systems Engineering Tiré de http://www4.ncsu.edu/~kay/Material_Handling_Equipment.pdf

Khan, A., & Turowski, K. (2016). A survey of current challenges in manufacturing industry and preparation for industry 4.0. Dans A. Abraham, S. Kovalev, V. Tarassov & V. Snášel (Édit.), *Proceedings of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'16): Volume 1* (p. 15-26). Cham: Springer International Publishing.

Khandekar, A. V., & Chakraborty, S. (2015). Selection of material handling equipment using fuzzy axiomatic design principles. *Informatica, 26*(2), 259-282.

Kim, K. S., & Eom, J. K. (1997). An expert system for selection of material handling and storage systems. *International Journal of Industrial Engineering, 4*(2), 81-89.

Kirazli, A., & Hormann, R. (2015). *A conceptual approach for identifying industrie 4.0 application scenarios.* Communication présentée à IIE Annual Conference, Nashville.

Klein, H. H., Fowler, W. S., Devaney, W., Footlik, R. B., & Strombeck, T. (2008). Basic storage equipment and methods. Dans R. A. Kulwiec (Édit.), *Materials Handling Handbook* (p. 533-588). doi: 10.1002/9780470172490.ch11

Komljenovic, D., & Kecojevic, V. (2009). Multi-attribute selection method for materials handling equipment. *International Journal of Industrial and Systems Engineering, 4*(2), 151-173.

Kouvelis, P., & Lee, H. L. (1990). The material handling system design of integrated manufacturing systems-a graph-theoretic modelling framework for the initial design phase. *Annals of Operations Research, 26*(1-4), 379-396.

Kulak, O. (2005). A decision support system for fuzzy multi-attribute selection of material handling equipments. *Expert Systems with Applications, 29*(2), 310-319. doi: 10.1016/j.eswa.2005.04.004

Kulak, O., Satoglu, S. I., & Durmusoglu, M. B. (2004). *Multi-attribute material handling equipment selection using information axiom.* Communication présentée à The Third International Conference on Axiomatic Design, Seoul.

Kulwiec, R. A. (2008a). Basic materials handling concepts. Dans R. A. Kulwiec (Édit.), *Materials Handling Handbook* (p. 1-18). doi: 10.1002/9780470172490.ch1

Kulwiec, R. A. (Édit.). (2008b). *Materials handling handbook* (2e éd.). New York: John Wiley & Sons.

Langevin, A., & Riopel, D. (2005). *Logistics systems : design and optimization*. New York: Springer.

Lashgari, A., Yazdani-Chamzini, A., Fouladgar, M. M., Zavadskas, E. K., Shafiee, S., & Abbate, N. (2012). Equipment selection using fuzzy multi criteria decision making model: key study of Gole Gohar iron mine. *Engineering economics, 23*(2), 125-136.

Lashkari, R. S., Boparai, R., & Paulo, J. (2004). Towards an integrated model of operation allocation and material handling selection in cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Economics, 87*(2), 115-139. doi: 10.1016/S0925-5273(03)00097-5

Lawson, S. (2016). Arm builds up security in the tiniest internet of things chips. Tiré de http://www.pcworld.com/article/3135066/components-processors/arm-builds-up-security-in-the-tiniest-iot-chips.html#i-D59EA0F6-38D8-4398-858A-C64BFE06DDD5

Liang, M., Dutta, S. P., & Abdou, G. (1989). *A new approach to material handling equipment selection in a manufacturing environment.* Communication présentée à International Industrial Engineering Conference (p. 225-230).

Linde Material Handling GmbH. (2016a). connect: Linde connected solutions. Tiré de https://connected-solutions.de/wp-content/uploads/2016/07/linde-connect-brochure-en-160422.pdf

Linde Material Handling GmBH. (2016b). Linde robotics – the future is now. Tiré de http://www.linde-mh.com/en/main_page/products_features_1/linde_robotics/content_page_1.html#

Linde Material Handling GmBH. (2016c). Ongoing development of all power systems. Tiré de https://womh.linde-mh.com/en/energy-systems/

Linde Material Handling GmbH. (2016d). World of material handling 2016. Tiré de https://womh.linde-mh.com/en/

Lom, M., Pribyl, O., & Svitek, M. (2016). *Industry 4.0 as a part of smart cities.* Communication présentée à 2016 Smart Cities Symposium Prague (SCSP), Prague (p. 1-6). doi: 10.1109/SCSP.2016.7501015

MacDougall, W. (2014). *Industrie 4.0 smart manufacturing for the future* J. Hull & S. Sasse (Édit.), (p. 39).

Mahadevan, B., & Narendran, T. (1994). A hybrid modelling approach to the design of an AGV-based material handling system for an FMS. *The international journal of production research, 32*(9), 2015-2030.

Mahdavi, I., Shirazi, B., & Sahebjamnia, N. (2011). Development of a simulation-based optimisation for controlling operation allocation and material handling equipment selection in FMS. *International Journal of Production Research, 49*(23), 6981-7005. doi: 10.1080/00207543.2010.534826

Malmborg, C. J., Krishnakumar, B., Simons, G. R., & Agee, M. H. (1989). EXIT: a PC-based expert system for industrial truck selection. *International Journal of Production Research, 27*(6), 927-941. doi: 10.1080/00207548908942599

Malmborg, C. J., Simons, G. R., & Agee, M. H. (1986). *Knowledge engineering approaches to material handling equipment specification.* Communication présentée à 1986 Fall Industrial Engineering Conference (p. 148-151).

Maloney, D. (2002). Just what the doctor ordered. *Modern Materials Handling, 57*(2), 24-29. Tiré de http://search.proquest.com/docview/236622366/5518E23E1DEF4B76PQ/17?accountid=40695#

Maniya, K. D., & Bhatt, M. G. (2011). A multi-attribute selection of automated guided vehicle using the AHP/M-GRA technique. *International Journal of Production Research, 49*(20), 6107-6124. doi: 10.1080/00207543.2010.518988

Manley, C. E., Fowlston, D. L., Nagy, A. J., Sanford, B. W., Midgley, W. R., Weiss, D. J., & Castaldi, J. (2008). Storage systems. Dans R. A. Kulwiec (Édit.), *Materials Handling Handbook* (p. 589-652). doi: 10.1002/9780470172490.ch12

Material Handling Institute. (2017). Material Handling Equipment Taxonomy. Tiré de http://www.mhi.org/cicmhe/resources/taxonomy

Matson, J. O., Mellichamph, J. M., & Swaminathan, S. R. (1992). EXCITE: Expert consultant for in-plant transportation equipment. *International Journal of Production Research, 30*(8), 1969-1983. doi: 10.1080/00207549208948133

Matson, J. O., Swaminathan, S. R., & Mellichamp, J. M. (1990). *Knowledge-based material handling equipment selection.* Communication présentée à 1990 International Industrial Engineering Conference, San Francisco, USA (p. 212-217).

Matson, J. O., & White, J. A. (1981). *Storage system optimization* (Rapport n° Production and distribution research center PDRC Report Series 81-09). Atlanta: Georgia Institute of Technology.

Matt, D. T., Fraccaroli, D., Franzellin, V. M., & Rauch, E. (2011). *Design of flexible and ergonomic material handling systems for large and heavy goods.* Communication présentée à 21st International Conference on Production Research: Innovation in Product and Production, ICPR 2011, Stuttgart, Germany.

McGinnis, L. F., Goetschalckx, M., Sharp, G., Bodner, D., & Govindaraj, T. (2000). *Rethinking warehouse design research.* Communication présentée à Proceedings of the Material Handling Research Colloquium.

McKinsey Global Institute. (2012). *Manufacturing the future: The next era of global growth and innovation*. Tiré de https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/mep/data/Manufacturing-the-Future.pdf

Mikhailov, L., & Singh, M. G. (1999, 1999). *Comparison analysis of methods for deriving priorities in the analytic hierarchy process.* Communication présentée à 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (vol. 1, p. 1037-1042 vol.1031). doi: 10.1109/ICSMC.1999.814236

Mirhosseyni, S. H. L., & Webb, P. (2009). A hybrid fuzzy knowledge-based expert system and genetic algorithm for efficient selection and assignment of material handling equipment. *Expert Systems with Applications, 36*(9), 11875-11887. doi: 10.1016/j.eswa.2009.04.014

Momani, A. M., & Ahmed, A. A. (2011). Material handling equipment selection using hybrid Monte Carlo simulation and analytic hierarchy process. *World Academy of Science, Engineering and Technology, 59* 953-958.

Montreuil, B. (2011). Toward a Physical Internet: meeting the global logistics sustainability grand challenge. *Logistics Research, 3*(2), 71-87. doi: 10.1007/s12159-011-0045-x

Mousavi, S. M., Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Tajik, N. (2014). Soft computing based on a fuzzy grey group compromise solution approach with an application to the selection problem of material handling equipment. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 27*(6), 547-569. doi: 10.1080/0951192X.2013.834460

Mulcahy, D. E. (1999). *Materials handling handbook*. New York: McGraw-Hill.

Muther, R. (1973). *Systematic layout planning*. Boston: Cahners books.

Muther, R., & Haganäs, K. (1969). *Systematic handling analysis*. Kansas City: Management and Industrial Research Publications.

Muther, R., & Webster, D. B. (2008). Plant layout and materials handling. Dans R. A. Kulwiec (Édit.), *Materials Handling Handbook* (p. 19-77). doi: 10.1002/9780470172490.ch2

Nguyen, H.-T., Dawal, S. Z. M., Nukman, Y., Rifai, A. P., & Aoyama, H. (2016). An integrated MCDM model for conveyor equipment evaluation and selection in an FMC based on a fuzzy AHP and fuzzy ARAS in the presence of vagueness. *PloS one, 11*(4).

Noble, J. S., Klein, C. M., & Midha, A. (1998). An integrated model of the material handling system and unit load design problem. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, 120*(4), 802-806.

Noble, J. S., & Tanchoco, J. M. A. (1993a). A framework for material handling system design justification. *International Journal of Production Research, 31*(1), 81-106. doi: 10.1080/00207549308956714

Noble, J. S., & Tanchoco, J. M. A. (1993b). *Selection and specification of a material handling system.* Communication présentée à 2nd Industrial Engineering Research Conference (p. 787-791).

Nolan, J. (2008). Introduction. Dans R. A. Kulwiec (Édit.), *Materials Handling Handbook* (p. 865-879). doi: 10.1002/9780470172490.ch19

Office québécois de la langue française. (2012). Le grand dictionnaire terminologique (GDT). Tiré de http://www.granddictionnaire.com/index.aspx

Onut, S., Kara, S. S., & Mert, S. (2009). Selecting the suitable material handling equipment in the presence of vagueness. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 44*(7-8), 818-828. doi: 10.1007/s00170-008-1897-3

Park, Y.-B. (1996). ICMESE: Intelligent consultant system for material handling equipment selection and evaluation. *Journal of Manufacturing Systems, 15*(5), 325-333. doi: 10.1016/0278-6125(96)84195-1

Paulo, J., Lashkari, R. S., & Dutta, S. P. (2002). Operation allocation and materials-handling system selection in a flexible manufacturing system: a sequential modelling approach. *International Journal of Production Research, 40*(1), 7-35. doi: 10.1080/00207540110073028

Pazour, J. A., & Meller, R. D. (2014). A framework and analysis to inform the selection of piece-level order-fulfillment technologies. Dans *Progress in Material Handling Research: 2014*. Charlotte, NC: Material Handling Institute.

Peters, B. A., Malmborg, C., Petrina, G., Pratt, D., & Taylor, D. (1998). An introduction to material handling equipment selection. *College-Industry Council on Material Handling Education (CICMHE).*

Poon, T. C., Choy, K. L., Cheng, C. K., Lao, S. I., & Lam, H. Y. (2011). Effective selection and allocation of material handling equipment for stochastic production material demand problems using genetic algorithm. *Expert Systems with Applications, 38*(10), 12497-12505. doi: 10.1016/j.eswa.2011.04.033

Premier Li Keqiang. (2015). *Report on the work of the government*. Communication présentée à Third Session of the 12th National People's Congress, Beijing. Tiré de http://english.gov.cn/archive/publications/2015/03/05/content_281475066179954.htm

Promisel, R. (2008). Unit load concepts. Dans R. A. Kulwiec (Édit.), *Materials Handling Handbook* (p. 117-163). doi: 10.1002/9780470172490.ch5

Public Works and Government Services Canada. (2015). Termium Plus, The Government of Canada's terminology and lingustic data bank. Tiré de http://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alpha-eng.html?lang=eng&i=&index=alt&__index=alt&codom2nd=&srchtxt=FORWARD+CHAINING

Quinlan, J. R. (1993). *C4.5: programs for machine learning*. San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers Inc.

Rahman, F., Hussain, I., Kharlamov, Y. A., Ali, A., & Saif Ul, I. (2007). *Selection and design of knowledge based (KB) AGVS system for material handling.* Communication présentée à 37th International Conference on Computers and Industrial Engineering, Alexandria, Egypt (vol. 3, p. 1859-1865).

Rakotomalala, R. (2005). *TANAGRA: a free software for research and academic purposes.* Communication présentée à Extraction et gestion des connaissances (EGC'2005), RNTI-E-3, Paris (vol. 2, p. 697-702).

Raman, D., Nagalingam, S. V., Gurd, B. W., & Lin, G. C. I. (2009). Quantity of material handling equipment—A queuing theory based approach. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 25*(2), 348-357. doi: 10.1016/j.rcim.2008.01.004

Reza Ziai, M., & Sule, D. R. (1989). Computerized materials handling and facility layout design. *Computers & industrial engineering, 17*(1-4), 55-60.

Riopel, D. (2014). *Distribution physique de biens: notes de cours IND6224A*. Montréal: Presses Internationales Polytechnique.

Riopel, D. (2015). *Implantation et manutention: notes de cours IND6209*. Montréal: Presses Internationales Polytechnique.

Riopel, D., Chouinard, M., Marcotte, S., & Ait-Kadi, D. (2011). *Ingénierie et gestion de la logistique inverse : vers des réseaux durables*. Paris: Lavoisier.

Riopel, D., & Croteau, C. (2013). *Dictionnaire illustré des activités de l'entreprise : industrie, techniques et gestion* (Édition mise à jour). Montréal: Presses internationales Polytechnique.

Roblek, V., Meško, M., & Krapež, A. (2016). A complex view of industry 4.0. *SAGE Open, 6*(2), 11. doi: 10.1177/2158244016653987

Rossi, D., Bertoloni, E., Fenaroli, M., Marciano, F., & Alberti, M. (2013). A multi-criteria ergonomic and performance methodology for evaluating alternatives in "manuable" material handling. *International Journal of Industrial Ergonomics, 43*(4), 314-327. doi: 10.1016/j.ergon.2013.04.009

Roux, M. (2011). *Entrepôts et magasins: Tout ce qu'il faut savoir pour concevoir une unité de stockage* (5e éd.). Paris: Éditions d'Organisation.

Roux, M., & Liu, T. (2010). *Optimisez votre plate-forme logistique* (4e éd.). Paris: Éditions d'Organisation.

Rushton, A., Croucher, P., & Baker, P. (2014). *The Handbook of Logistics and Distribution Management: Understanding the Supply Chain* (5e éd.). London, UK: Kogan Page.

Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process, planning, piority setting, resource allocation*. New York: McGraw-Hill.

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences, 1*(1), 83-98.

Saputro, T. E., Masudin, I., & Daneshvar Rouyendegh, B. (2015). A literature review on MHE selection problem: levels, contexts, and approaches. *International Journal of Production Research, 53*(17), 5139-5152. doi: 10.1080/00207543.2015.1005254

Sawant, V. B., & Mohite, S. S. (2013). A composite weight based multiple attribute decision support system for the selection of automated guided vehicles. *International Journal of Computer Applications, 70*(19), 8-16.

Sawant, V. B., Mohite, S. S., & Patil, R. (2011). *A decision-making framework using a preference selection index method for automated guided vehicle selection problem.* Communication présentée à International Conference on Technology Systems and Management (ICTSM), Mumbai, India (p. 12-16).

Sharp, G., Wan, Y.-T., McGinnis, L. F., Goetschalckx, M., Bodner, D., Govindaraj, T., . . . Everette, J. (2001). *A structured approach to material handling system selection and specification for manufacturing.* Communication présentée à Industrial Engineering Research Conference, Dallas (p. 1-6).

Shelton, D., & Jones, M. S. (1987). A selection method for automated guided vehicles. *Material flow, 4*(1-2), 97-107.

Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., & Simchi-Levi, E. (2003). *Designing and managing the supply chain: Concepts, strategies, and case studies*. Boston: McGraw-Hill/Irwin.

Siraj, S. (2011). *Preference elicitation from pairwise comparisons in multi-criteria decision making.* (Ph.D., University of Manchester, Manchester).

Siraj, S., Mikhailov, L., & Keane, J. A. (2015). PriEsT: an interactive decision support tool to estimate priorities from pairwise comparison judgments. *International Transactions in Operational Research, 22*(2), 217-235. doi: 10.1111/itor.12054

Srdjevic, B. (2005). Combining different prioritization methods in the analytic hierarchy process synthesis. *Computers & Operations Research, 32*(7), 1897-1919.

Stock, J. R., & Lambert, D. M. (2001). *Strategic logistics management*. New York: McGraw-Hill.

Sujono, S., & Lashkari, R. S. (2007). A multi-objective model of operation allocation and material handling system selection in FMS design. *International Journal of Production Economics, 105*(1), 116-133. doi: 10.1016/j.ijpe.2005.07.007

Syndicat des industries de matériels de manutention. (1983a). Logistique. Dans *Encyclopédie de la manutention*. Paris: AFNOR.

Syndicat des industries de matériels de manutention. (1983b). Stockage et distribution physique des marchandises. Dans *Encyclopédie de la manutention*. Paris: AFNOR.

Telek, P. (2013). Equipment preselection for integrated design of materials handling systems. *Advanced Logistics Systems, 7*(2), 57-66.

The industrial internet consortium. (2016). The industrial internet consortium: A global not-for-profit partnership of industry, government and academia. Tiré de http://www.iiconsortium.org/about-us.htm

Tompkins, J. A., & Smith, J. D. (1998). *The warehouse management handbook* (2e éd.). Raleigh: Tompkins press.

Tompkins, J. A., Smith, J. D., Huffman, J. R., & Ackerman, K. B. (2008). Warehousing. Dans R. A. Kulwiec (Édit.), *Materials Handling Handbook* (p. 653-708). doi: 10.1002/9780470172490.ch13

Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., Frazelle, E. H., Tanchoco, J. M. A., & Trevino, J. (1996). *Facilities Planning* (2e éd.). New York: Wiley.

Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., & Tanchoco, J. M. A. (2010). *Facilities planning* (4e éd.). New York: Wiley.

Tong-Tong, J.-R. (1995). *La logique floue*. Paris: Hermes.

Trevino, J., Hurley, B. J., Clincy, V., & Jang, S. C. (1991). Storage and industrial truck selection expert system (SITSES). *International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 4*(3), 187-194. doi: 10.1080/09511929108944494

Triantaphyllou, E. (2000). Multi-criteria decision making methods. Dans *Multi-criteria Decision Making Methods: A Comparative Study* (vol. 44, p. 5-21). Dordrecht: Springer.

Tuzkaya, G., Gülsün, B., Kahraman, C., & Özgen, D. (2010). An integrated fuzzy multi-criteria decision making methodology for material handling equipment selection problem and an application. *Expert Systems with Applications, 37*(4), 2853-2863. doi: 10.1016/j.eswa.2009.09.004

Ustundag, A. (2014). Selection and Assignment of Material Handling Devices Under Uncertainty. Dans C. Kahraman & B. Öztayşi (Édit.), *Supply Chain Management Under Fuzziness* (vol. 313, p. 553-564). Berlin Heidelberg: Springer.

Varun, S., Harshita, R., Pramod, S., & Nagaraju, D. (2017). *Evaluation and selection of material handling equipment in iron and steel industry using analytic hierarchy process.* Communication présentée à 2nd International Conference on Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering, Chennai, India (vol. 197). doi: 10.1088/1757-899X/197/1/012060

Velury, J., & Kennedy, W. J. (1992). A systematic procedure for the selection of bulk material handling equipment. *International Journal of Production Economics, 27*(3), 233-240. doi: 10.1016/0925-5273(92)90097-Q

Vijayaram, T. R. (2006). Materials handling technology and significance of expert systems to select appropriate handling equipments in engineering industries: A review. *Journal of Scientific & Industrial Research, 65*(August), 619-624.

Waidner, M., & Kasper, M. (2016). *Security in industrie 4.0 - challenges and solutions for the fourth industrial revolution.* Communication présentée à 2016 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), Dresden (p. 1303-1308).

Wallenius, J., Dyer, J. S., Fishburn, P. C., Steuer, R. E., Zionts, S., & Deb, K. (2008). Multiple criteria decision making, multiattribute utility theory: recent accomplishments and what lies ahead. *Management science, 54*(7), 1336-1349.

Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (2016). Implementing smart factory of Industrie 4.0: an outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks, 2016*(7), 10. doi: 10.1155/2016/3159805

Ward, R. E. (1986). *An Overview of Basic Material Handling Equipment*. Charlotte: Material Handling Institute.

Webster, D. B. (1969). *Determination of a materials handling systems decision model.* (Ph.D., Purdue University, Ann Arbor).

Weiss, D. J., & Cramer, M. A. (1988). Small-Parts storage systems. Dans J. A. Tompkins & J. D. Smit (Édit.), *The warehouse management handbook*. New york: McGraw-Hill Book Company.

Welgama, P. S., & Gibson, P. R. (1995). A hybrid knowledge based/optimization system for automated selection of materials handling system. *Computers & Industrial Engineering, 28*(2), 205-217. doi: 10.1016/0360-8352(94)00200-7

Yaman, R. (2001). A knowledge-based approach for selection of material handling equipment and material handling system pre-design. *Turkish Journal of Engineering And Environmental Sciences, 25*(4), 267-278.

Yazdani-Chamzini, A., & Shariati, S. (2013). Selection of material handling equipment system for surface mines by using a combination of fuzzy MCDM models. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences, 5*(12), 1501-1511.

Yilmaz, O. F., Oztaysi, B., Durmusoglu, M. B., & Oner, S. C. (2017). Determination of material handling equipment for lean in-plant logistics using fuzzy analytical network process considering risk attitudes of the experts. *International Journal of Industrial Engineering, 24*(1), 81-122.

Zollinger, H. A. (1975). *Planning, evaluating and estimating storage systems.* Communication présentée à The seminar on advanced material handling, Purdue University, West Lafayette, IN (p. 29-30).

ANNEXE A – NUMÉROS DES ARTICLES

Tableau A.1 : Articles de la revue de littérature

Numéro de l'article	Auteurs (date)
1	Ahmed et Lam (2014)
2	Ahmed Bouh et Riopel (2016)
3	Ahmed Bouh et Riopel (2017a)
4	Ahmed Bouh et Riopel (2017c)
5	Athawale et Chakraborty (2011)
6	Attia, Hosny, Ramu et Chawla (1992)
7	Bauters et al. (2015)
8	Bookbinder et Gervais (1992)
9	Braglia et al. (2001)
10	Castleberry (1990)
11	Chakraborty et Banik (2006)
12	Chakraborty et Prasad (2016)
13	Chan (2002)
14	Chan et al. (2001)
15	Cho et Egbelu (2005)
16	Chu et al. (1995)
17	De Lit, L'Eglise, Danloy, Rekiek et Delchambre (2002)
18	Deb, S. K., Bhattacharyya et Sorkhel (2002)
19	Deb, S., Bhattacharyya et Sorhkel (2003)
20	Fisher et al. (1988)
21	Fonseca et al. (2004)
22	Frazelle (1985)
23	Gabbert et Brown (1988)
24	Gabbert et Brown (1989)
25	Hadi-Vencheh et Mohamadghasemi (2015)
26	Hassan, Mohsen M. D. et al. (1985)
27	Hassan, Mohsen M.D. (2010)
28	Hassan, Mohsen M.D. (2014)
29	Hosni (1989)
30	Jiamruangjarus et Naenna (2016)
31	Karande et Chakraborty (2012)
32	Khandekar et Chakraborty (2015)
33	Kim et Eom (1997)
34	Kouvelis et Lee (1990)
35	Kulak (2005)
36	Kulak et al. (2004)
37	Lashkari et al. (2004)
38	Liang et al. (1989)

Tableau A.1 : Articles de la revue de littérature (suite et fin)

Numéro de l'article	**Auteurs (date)**
39	Mahdavi et al. (2011)
40	Malmborg et al. (1986)
41	Malmborg et al. (1989)
42	Maniya et Bhatt (2011)
43	Matson et al. (1992)
44	Matson et al. (1990)
45	Matt et al. (2011)
46	Mirhosseyni et Webb (2009)
47	Momani et Ahmed (2011)
48	Mousavi et al. (2014)
49	Nguyen et al. (2016)
50	Noble et al. (1998)
51	Noble et Tanchoco (1993a)
52	Noble et Tanchoco (1993b)
53	Onut et al. (2009)
54	Park (1996)
55	Paulo et al. (2002)
56	Poon et al. (2011)
57	Rahman et al. (2007)
58	Raman et al. (2009)
59	Reza Ziai et Sule (1989)
60	Rossi et al. (2013)
61	Sawant et al. (2011)
62	Sawant et Mohite (2013)
63	Sharp et al. (2001)
64	Shelton et Jones (1987)
65	Sujono et Lashkari (2007)
66	Telek (2013)
67	Trevino et al. (1991)
68	Tuzkaya et al. (2010)
69	Ustundag (2014)
70	Varun et al. (2017)
71	Velury et Kennedy (1992)
72	Welgama et Gibson (1995)
73	Yaman (2001)
74	Yilmaz et al. (2017)

ANNEXE B – PROCESSUS D'HARMONISATION DES DONNÉES

Tableau B.1 : Exemples types d'harmonisation des équipements de manutention (avant et après)

Numéro de l'article	**Avant**	**Après**							**Remarques**
		CTCI	**CTCV**	**AL**	**CM**	**SVGA**	**R**	**ÉC**	
1	Non classifiés. 4 possibilités. Utilise une catégorie comme un type d'équipement.	1			3				Pas de changements (4 à 4).
8	CTCI (14); AL (7); CM (8).	14		7	8				Pas de changements (29 à 29).
14	CTCI (14); Convoyeurs aériens (3); AL (5); CM (16); SVGA (8); R (4); AS/RS (11).	17		6	16	8	4		Changements (50 à 51). Potence et Portique sont spécifiés ensemble dans un seul type d'équipement. Nous les avons séparés comme dans Cho et Egbelu (2005).
15	Manutention : CM (6); SVGA (3); Monorails (1); Transporteurs par gravité (4); CTCI au sol (7); Convoyeurs aériens (2); AL (5); Équipements de positionnement (5); Entreposage : AS/RS (3); Palettiers (4).	13		6	6	3			Changements (28 à 28). Le transporteur à rouleaux est répété deux fois (par gravité, et au sol). Les équipements de positionnement et d'entreposage sont ignorés.
16	CTCI (12); AL (5); CM (15); Sans équipement (1 manuel). D'autres équipements sont cités.	12		5	10	5			Pas de changements (32 à 32)
20	Non classifiés. 23 Équipements de manutention. Manuel et non manuel sont cités.	9		3	6	4			Pas de changements (22 à 22).

Tableau B.1 : Exemples types d'harmonisation des équipements de manutention (avant et après) (suite et fin)

Numéro de l'article	**Avant**	**Après**							**Remarques**
		CTCI	**CTCV**	**AL**	**CM**	**SVGA**	**R**	**ÉC**	
21	CTCI (20, 6 classes); CTCI de tri (10); AL (4); CTCV (33, 7 classes)	20	33	4					Changements (67 à 57). Les CTCI de tri sont ignorés (10).
25	CTCI (5)	5							Pas de changements (5 à 5).
43	SVGA (4); CTCI (12); AL (6); CM (8).	12		6	8	4			Pas de changements. Des différences sur les noms des équipements.
72	CM (4 chariots élévateurs, 1 tracteur); AL (2 portiques, 3 ponts roulants, 1 grue mobile); SVGA (1); CTCI (4).	4		3	2	1			Changements concernant les AL. Les détails sont donnés dans l'ANNEX F en bas de page.

Tableau B.2 : Exemples types d'harmonisation des caractéristiques (avant et après)

Numéro de l'article	**Avant**	**Après**				**Remarques**
		UC	**Mo**	**É**	**Mi**	
8	Charge (6); Mo (13); Équipement (4)	6	14	2	1	Pas de changements majeurs (23 à 23)
11	Charge (3); Mo (4); Méthode (4)	6	12	4	1	Changements (11 à 23). Les caractéristiques ajoutées sont celles qui sont spécifiées, mais elles ont été déclarées sous d'autres caractéristiques comme des sous caractéristiques. Par exemple, trois caractéristiques sont déclarées sous la caractéristique « Move characteristics ».

Tableau B.2 : Exemples types d'harmonisation des caractéristiques (avant et après) (suite et fin)

Numéro de l'article	**Avant**	**Après**				**Remarques**
		UC	**Mo**	**É**	**Mi**	
14	Charge (13); Mo (9); Opération (10); Zone (4)	6	13	5	2	Changements (36 à 26). Le nombre de caractéristiques a été réduit par les redondances éliminées.
15	Général (8); Charge (8); Mo (15); Opération et attribution des traitement de données (7)	11	16	16	1	Changements (38 à 44). Les caractéristiques ajoutées sont deux caractéristiques dans le groupe Général qui ont été éclatées en 6 et en 2 respectivement (« evaluation factors » et « budget »).
20	Direct (8); Inféré (2); Direct/Inféré (2)	6	4	1		Changements (12 à 11). La caractéristique « Type of unit load » est redondante. Les appellations « Compared to pallet » et « Palletised » sont utilisées.
33	Non classifiées.	4	2			Pas de changements majeurs (6 à 6).
35	Charge (6); Opération (6); Mo (6); Contraintes de la Zone (4).	6	10	3	2	Changements (22 à 21). La caractéristique « Inventory turnover method (FIFO, LIFO) » est déplacée vers les caractéristiques additionnelles et spécifiques de l'entreposage.
41	Charge (2); Mo (7); Méthode (11).	2	9	9	6	Changements (20 à 26). Les caractéristiques mentionnées et regroupées comme des sous caractéristiques sont éclatées.
42	É (6)			6		Pas de changements (6 à 6).
43	Non classifiées. 28 caractéristiques.	6	19	2	1	Pas de changements majeurs (28 à 28).
46	Charge (6); Mo (6); Opération (3); Mi (6).	6	11	2	2	Pas de changements majeurs (21 à 21).
53	Coût d'acquisition et coût d'opération. É (2)			2		Pas de changements (2 à 2).
54	Charge (9); Mo (9); Opération (7); Mi (5).	7	12	7	3	Changements (30 à 29). La caractéristique « Path » est répétée (« Move path » et « Motion path »).
71	5 caractéristiques non classifiées.	1	1	4		Changements (5 à 6). La caractéristique « Budget » est ignorée puisque les deux coûts d'acquisition et d'opération sont considérés. La caractéristique « Demand » désignerait selon l'explication donnée « Quantity to handle » et « Move distance ».
74	Produit (5); Processus (6).	5	5	1		Pas de changements (11 à 11).

ANNEXE C – ÉQUIPEMENTS DE MANUTENTION DANS LES ARTICLES

Tableau C.1 : Convoyeurs / transporteurs pour charge isolée (CTCI)

CTCI	**Nom**	**Numéro de l'article**	**Total**
CTCI 1	Apron conveyor	8,13,14	3
CTCI 2	Arm conveyor	21	1
CTCI 3	Ball-Top conveyor	15	1
CTCI 4	Bant belt conveyor	17	1
CTCI 5	*Belt conveyor*	8,15,16,17,35,36,54,70,74	9
CTCI 6	Belt driven roller conveyor	21	1
CTCI 7	*Bucket conveyor*	8,35,36,54	4
CTCI 8	Cart-on-track conveyor	15,16,35,36,43,54	6
CTCI 9	*Chain conveyor*	8,15,16,17,30,35,36,46,54,72	10
CTCI 10	Chain driven roller conveyor	21	1
CTCI 11	Chain operated overhead conveyor	13,14,46	3
CTCI 12	Chain-on-edge conveyor	21	1
CTCI 13	Chute conveyor	8,13,14,15,16,21,25,35,36,43,54	11
CTCI 14	Continuous vertical conveyor	13,14,21	3
CTCI 15	**Conveyor**	1,45,47,53	4
CTCI 16	Drag chain conveyor	21	1
CTCI 17	Flat top chain conveyor	21	1
CTCI 18	Flat-belt conveyor	13,14,25,46	4
CTCI 19	Flight conveyor	8	1
CTCI 20	Flush tow conveyor	21	1
CTCI 21	Gravity roller conveyor	13,14,15,20,21,43,46,51,54	9
CTCI 22	Gravity skate conveyor	51	1
CTCI 23	Gravity wheel conveyor	46,54	2
CTCI 24	Gravity-bucket conveyor	13,14	2
CTCI 25	In-floor towline conveyor	43	1
CTCI 26	Inverted poer & free conveyor	17,43	2
CTCI 27	Light-duty belt conveyor	55,65	2
CTCI 28	Line shaft roller conveyor	21	1
CTCI 29	Live chain-roller conveyor	20	1
CTCI 30	Live roller conveyor	20	1
CTCI 31	Opposed shelf conveyor	21	1
CTCI 32	Overhead monorail conveyor	35,36	2
CTCI 33	Overhead tow conveyor	21	1
CTCI 34	Plain chain conveyor	35,36	2
CTCI 35	Pneumatic conveyor	8,13,14,16,25,54	6
CTCI 36	Pneumatic tube conveyor	35,36	2
CTCI 37	Power & free conveyor	8,13,14,15,16,17,20,43,46,54	10
CTCI 38	Powered belt conveyor	43,50,51	3
CTCI 39	Powered chain conveyor	43	1
CTCI 40	Powered overhead trolley	43	1
CTCI 41	Powered roller conveyor	13,14,43,46,50,51	6

Tableau C.1 : Convoyeurs / transporteurs pour charge isolée (CTCI) (suite et fin)

CTCI	**Nom**	**Numéro de l'article**	**Total**
CTCI 42	Reciprocating conveyor	21	1
CTCI 43	Roller bed belt conveyor	21,55,65	3
CTCI 44	*Roller conveyor*	8,15,16,17,25,30,35,36,54,72	10
CTCI 45	Screw conveyor	8,13,14,35,36,54	6
CTCI 46	Self-powered monorail conveyor	13,14,20,46	4
CTCI 47	Skate wheel conveyor	15,17	2
CTCI 48	Skatewheel gravity conveyor	20,21	2
CTCI 49	Slat chain conveyor	21	1
CTCI 50	*Slat conveyor*	8,13,14,15,16,17,20,35,36,43,46,54,72	13
CTCI 51	Slider bed belt conveyor	21	1
CTCI 52	Tow conveyor	8,15,16,20,35,36,54,72,74	9
CTCI 53	Trash belt conveyor	21	1
CTCI 54	Trolley conveyor	15,16,17,20,35,36,54	7
CTCI 55	Troughed-belt conveyor	13,14	2
CTCI 56	Underfloor tow conveyor	21	1
CTCI 57	Vertical reciprocating conveyor	13,14	2
CTCI 58	*Vibrating conveyor*	8,13,14,16,54	5
CTCI 59	*Wheel conveyor*	8,13,14,15,16,25,35,36,43	9

Tableau C.2 : Convoyeurs / transporteurs pour charge en vrac (CTCV)

CTCV	**Nom**	**Numéro de l'article**	**Total**
CTCV 1	Belt type centrifugal discharge bucket elevator	21	1
CTCV 2	Belt type continuous discharge elevator	21	1
CTCV 3	Chain type centrifugal discharge bucket elevator	21	1
CTCV 4	Chain type continuous discharge bucket elevator	21	1
CTCV 5	Deep pan apron chain conveyor	21	1
CTCV 6	Dilute phase system conveyor	21	1
CTCV 7	Enmasse conveyor	21	1
CTCV 8	Fan type system conveyor	21	1
CTCV 9	Flight conveyor	21	1
CTCV 10	Gravity discharge bucket conveyor	21	1
CTCV 11	Hooper loader shaftless conveyor	21	1
CTCV 12	Internal discharge elevator	21	1
CTCV 13	Mobile stripper conveyor	21	1
CTCV 14	Pivoted bucket conveyor	21	1
CTCV 15	Portable vacuum pressure system conveyor	21	1
CTCV 16	Positive discharge elevator	21	1
CTCV 17	Pressure dense phase system conveyor	21	1
CTCV 18	Rubber belt grade 1 conveyor	21	1
CTCV 19	Rubber belt grade 2 conveyor	21	1
CTCV 20	Rubber belt grade 3 conveyor	21	1
CTCV 21	Shallow pan apron chain conveyor	21	1

Tableau C.2 : Convoyeurs / transporteurs pour charge en vrac (CTCV) (suite et fin)

CTCV	**Nom**	**Numéro de l'article**	**Total**
CTCV 22	*Slat conveyor*	21	1
CTCV 23	Sliding conveyor	21	1
CTCV 24	Stationary stripper conveyor	21	1
CTCV 25	Super capacity bucket style F elevator	21	1
CTCV 26	Super capacity bucket style G elevator	21	1
CTCV 27	Super capacity bucket style H/HL elevator	21	1
CTCV 28	Troughed and shafted conveyor	21	1
CTCV 29	Troughed and shaftless conveyor	21	1
CTCV 30	Tubular and shafted conveyor	21	1
CTCV 31	Tubular and shaftless conveyor	21	1
CTCV 32	Vacuum dense phase system conveyor	21	1
CTCV 33	*Vibrating conveyor*	21	1

Tableau C.3 : Appareils de levage (AL)

AL	**Nom**	**Numéro de l'article**	**Total**
AL 1	Automated electrified monorail system	17,21	2
AL 2	Bridge crane	8,13,14,15,16,20,43,45,46,54,72	11
AL 3	**Crane**	70	1
AL 4	Electrified monorail system (EMS)	7,15	2
AL 5	Fixed crane	53	1
AL 6	Gantry crane	8,13,14,15,16,20,35,36,43,46,54,72,73	13
AL 7	Hand pushed monorail	43	1
AL 8	Heavy-duty monorail	43	1
AL 9	**Hoist**	8,15,43	3
AL 10	Inverted power and free monorail system	21	1
AL 11	Jib crane	8,13,14,15,16,35,36,43,46,54	10
AL 12	Light-duty monorail	43	1
AL 13	Mobile crane	8,13,14,72	4
AL 14	*Monorail*	16,17,30,54	4
AL 15	Monorail hoist	8	1
AL 16	Overhead monorail	21	1
AL 17	Overhead power and free monorails system	21	1
AL 18	Overhead traveling crane	13,14	2
AL 19	*Rail*	70	1
AL 20	Rail system crane	53	1
AL 21	Stacker crane	8,13,14,15,16,20,35,36,54	9
AL 22	Tower crane	35,36	2

Tableau C.4 : Chariots de manutention (CM)

CM	**Nom**	**Numéro de l'article**	**Total**
CM 1	Balance non-tilt truck	41	1
CM 2	Burden car	41	1
CM 3	Counter-balanced litf truck	13,14,15,16,43,46,54,67	8
CM 4	Counter-balanced order picker truck	41	1
CM 5	Counter-balanced rough terrain truck	41	1
CM 6	*Crane*	8	1
CM 7	Dollies	41	1
CM 8	Drive-elevating order picker	13,14	2
CM 9	Drum lifter	35,36	2
CM 10	Drum truck	35,36	2
CM 11	Fixed-platform truck	13,14	2
CM 12	*Forklift truck*	7,35,36,45,51,55,65,72	8
CM 13	Small forklift	50	1
CM 14	Medium forklift	50	1
CM 15	Large forklift	50	1
CM 16	Four-wheel hand truck	8,54	2
CM 17	Front-reach counterbalanced truck	41	1
CM 18	Front-reach outriggers truck	41	1
CM 19	*Hand lift truck/hand pallet truck*	8,13,14,35,36,41,46	7
CM 20	Hand plateforme with mechanical lift	41	1
CM 21	Hand plateforme with power lift	41	1
CM 22	*Hand truck*	13,14,15,16,20,43,46,50,51	9
CM 23	Handcart	35,36	2
CM 24	High lift rider truck	8	1
CM 25	High lift walkie truck	8	1
CM 26	High-lift order picker	13,14	2
CM 27	Industrial truck	70	1
CM 28	Lift set down truck	47	1
CM 29	*Lift truck*	20	1
CM 30	Low-lift order picker	13,14	2
CM 31	*Material lift*	35,36	2
CM 32	Narrow-aisle forklift truck	2	1
CM 33	Narrow-aisle order picker truck	16,54	2
CM 34	Narrow-aisle reach truck	13,14	2
CM 35	Narrow-aisle S/R truck	54	1
CM 36	Narrow-aisle side-loading lift truck	13,14,54	3
CM 37	Narrow-aisle straddle-reach truck	54	1
CM 38	Narrow-aisle truck	35,36,43	3
CM 39	Narrow-aisle turret truck	16,54	2
CM 40	Order picker truck	4	1
CM 41	Outrigger aisle-guided orderpicker truck	41	1
CM 42	Pallet base stacker	13,14	2
CM 43	*Pallet jack*	1,15,16,20,45,47,50,51,54	9
CM 44	Pallet set down truck	1	1
CM 45	Pallet standup truck	47	1

Tableau C.4 : Chariots de manutention (CM) (suite et fin)

CM	**Nom**	**Numéro de l'article**	**Total**
CM 46	*Pallet truck*	15,16,43,45,54	5
CM 47	Pedestrian pallet truck	13,14	2
CM 48	Personnel and burden carrier	16	1
CM 49	Picking cart	4	1
CM 50	Platform truck	16,20,43,54	4
CM 51	Power-driven handtruck	35,36	2
CM 52	Power-driven platform truck	35,36	2
CM 53	Powered hand truck	55,65	2
CM 54	Powered pallet truck	13,14	2
CM 55	Pushcart	74	1
CM 56	Reach truck	67	1
CM 57	Regular forklift truck	2	1
CM 58	Rider pallet truck	46	1
CM 59	Rider stacker truck	46	1
CM 60	Shuttle truck	67	1
CM 61	Side-loader (fork) truck	13,14,43,46	4
CM 62	Side-loading outrigger truck	41	1
CM 63	Side-reach truck	67	1
CM 64	*Skid truck*	15	1
CM 65	Stand-on pallet truck/Stand-up pallet truck	1,46	2
CM 66	Stand-on stacker truck	46	1
CM 67	Straddle base stacker	13,14	2
CM 68	Straddle carrier	8,13,14,54	4
CM 69	Tier platform truck	35,36	2
CM 70	Tow tractor with loading attachments	41	1
CM 71	Towing/Tow tractor	20,41,72	3
CM 72	Tractor trailer	8,13,14,15,16,43,51,54	8
CM 73	Tractor-trailer train	35,36	2
CM 74	Tugger train	74	1
CM 75	Turret truck	67	1
CM 76	Turret type outriggers truck	41	1
CM 77	Walkie lift	43	1
CM 78	Walkie pallet truck	46	1
CM 79	Walkie pallet truck with power lift	41,46	2
CM 80	Walkie stacker	8,16,46,54	4
CM 81	Walkie truck	20,51	2

Tableau C.5 : Systèmes de véhicules à guidage automatique (SVGA)

SVGA	**Nom**	**Numéro de l'article**	**Total**
SVGA 1	**AGVs**	7,17,41,55,65,70	6
SVGA 2	AS/R machine	54	1
SVGA 3	Automatically positioned stock selectors AGV	16	1
SVGA 4	Conveyor deck AGV	46	1
SVGA 5	Electric wire guidance	15	1
SVGA 6	Fork AGV	20,43,46,54	4
SVGA 7	Forklift AGV	50,51	2
SVGA 8	High-lift AGV	13,14,35,36	4
SVGA 9	Laser Beam Guidance	15	1
SVGA 10	Lift deck AGV	13,14,35,36	4
SVGA 11	Light-load AGV/light-Duty AGV	16,20,43,74	4
SVGA 12	Low-lift AGV	13,14,35,36	4
SVGA 13	Magnetic paint guidance	15	1
SVGA 14	Man-on-board AS/R machine	54	1
SVGA 15	Manual load/unload AGV	13,14,35,36,46	5
SVGA 16	Pallet-load AGV	16	1
SVGA 17	Roller carrier	13,14	2
SVGA 18	Roller deck AGV	13,14,35,36	4
SVGA 19	Side reach AGV	46	1
SVGA 20	Stationary deck AGV	13,14,35,36	4
SVGA 21	Tractor AGV	16,20	2
SVGA 22	Tractor train AGV	43	1
SVGA 23	Tractor-trailer AGV	51	1
SVGA 24	Tugged/Tugger AGV	7,13,14,35,36,54,74	7
SVGA 25	Unit-load AGV	16,20,43,50,51,54	6

Tableau C.6 : Robots de manutention (R)

R	**Nom**	**Numéro de l'article**	**Total**
R 1	Electric robot	13,14,35,36,54	5
R 2	Light-load robot	55,65	2
R 3	Heavy-load robot	55,65	2
R 4	Hydraulic robot	13,14,35,36,54	5
R 5	Mechanical arm	54	1
R 6	Mechanized manipulator	13,14,35,36	4
R 7	Miniload Automated Storage and Retrieval Machine	4	1
R 8	Person-Aboard Automated Storage/Retrieval Machine	4	1
R 9	Pneumatic robot	13,14,35,36,54	5
R 10	S/R machine	2	1

Tableau C.7 : Équipements de canalisation (ÉC)

ÉC	**Nom**	**Numéro de l'article**	**Total**
ÉC 1	Pipe line	54	1

Légende:

Gras: catégorie (groupe) d'équipements**.**

Italic: équipement moins précis.

Surligné: synonyme.

ANNEXE D – ÉQUIPEMENTS D'ENTREPOSAGE DANS LES ARTICLES

Tableau D.1 : Palettiers (Pa)

Pa	**Nom**	**Numéro de l'article**	**Total**
Pa 1	Deep lane	67	1
Pa 2	Double deep pallet rack with regular forklift truck;	2	1
Pa 3	Drive-in pallet rack with regular forklift truck;	2	1
Pa 4	Drive-in rack	16	1
Pa 5	Drive-in satellite rack with regular forklift truck;	2	1
Pa 6	Drive-through rack	16	1
Pa 7	Drive-thru pallet rack with regular forklift truck;	2	1
Pa 8	Drive-thru satellite rack with regular forklift truck;	2	1
Pa 9	Flow-through rack system	14,54	2
Pa 10	Gravity flow racks	4	1
Pa 11	Mini rack	15	1
Pa 12	Mobile pallet rack with forklift truck;	2	1
Pa 13	Mobile rack	15,16	2
Pa 14	Package flow-through rack	16	1
Pa 15	Pallet flow rack with regular forklift truck;	2	1
Pa 16	Pallet flow-through rack	16	1
Pa 17	*Pallet rack system*	14,15,16,35,54,67	6
Pa 18	Push-back pallet rack with regular forklift truck;	2	1
Pa 19	**Rack systems**	45	1
Pa 20	Single deep pallet rack with narrow aisle forklift truck;	2	1
Pa 21	Single deep pallet rack with regular forklift truck;	2	1

Tableau D.2 : Systèmes d'entreposage automatisés (AS/RS)

AS/RS	**Nom**	**Numéro de l'article**	**Total**
AS/RS 1	**AS/RS**	55, 65	2
AS/RS 2	Automated storage/retrieval system AS/RS—double deep	2	1
AS/RS 3	Automated storage/retrieval system AS/RS—drive-thru	2	1
AS/RS 4	Automated storage/retrieval system AS/RS—pallet flow	2	1
AS/RS 5	Automated storage/retrieval system AS/RS—single deep	2	1
AS/RS 6	Automated systems	45	1
AS/RS 7	Deep-lane AS/RS	16	1
AS/RS 8	Man-on board AS/RS	14,16,54	3
AS/RS 9	Miniload AS/RS	14,15,16,35,54	5
AS/RS 10	Unit load AS/RS	14,15,16,35,54	5

Tableau D.3 : Système d'entreposage de charge en vrac (SECV)

SECV	**Nom**	**Numéro de l'article**	**Total**
SECV 1	*Bulk storage system*	14	1
SECV 2	Normal-block bulk storage system	54	1
SECV 3	Tight-block bulk storage system	54	1

Tableau D.4 : Autres systèmes d'entreposage (ASE)

ASE	**Nom**	**Numéro de l'article**	**Total**
ASE 1	Automatic Dispenser	4	1
ASE 2	Bin rack system	14,54	2
ASE 3	Bin shelving	4	1
ASE 4	Block stacking (stocking) in rack	14,35	2
ASE 5	Block stacking (stocking) on floor	14,35,67	3
ASE 6	Block storage (stacking)	45	1
ASE 7	Cantilever rack system	14,15,16,54	4
ASE 8	*Carousels*	15,16	2
ASE 9	Floor storage (no stacking)	45	1
ASE 10	High-Density Vertical Storage	4	1
ASE 11	Horizontal carousel	4	1
ASE 12	Independent rotating rack	4	1
ASE 13	Mixed warehousing with regular forklift truck	2	1
ASE 14	Modular drawer units	16	1
ASE 15	Modular storage drawers in cabinets	4	1
ASE 16	Portable rack	16	1
ASE 17	*Shelving*	14,16,35	3
ASE 18	Vertical carousel	4	1

Légende:

Gras: catégorie (groupe) d’équipements**.**

Italic: équipement moins précis.

Surligné: synonyme.

ANNEXE E – CARACTÉRISTIQUES DANS LES ARTICLES

Tableau E.1 : Caractéristiques de l'unité de charge (UC)

UC	Nom	Numéro de l'article	Total
UC 1	Abrasive component	17	1
UC 2	Annual demand	35,36	2
UC 3	Bottom surface	13,14,15,35,36,43,46,54	8
UC 4	Complexity	33	1
UC 5	Component quality	17	1
UC 6	Corrosiveness	21	1
UC 7	Dirty components	17	1
UC 8	Expected production trend	15	1
UC 9	External envelope	17	1
UC 10	Fragile components	17	1
UC 11	Friability	21	1
UC 12	Greasy component	17	1
UC 13	Height	15,20	2
UC 14	Item range	13,14	2
UC 15	Length	15	1
UC 16	Material throughput	43	1
UC 17	Nature	8,11,12,13,14,20,35,36,43,46,54,73	12
UC 18	Number of components	17	1
UC 19	Number of material flow links	15	1
UC 20	Number of variants	17	1
UC 21	Product mix	15,33	2
UC 22	Product type	17	1
UC 23	Quantity to handle	11,15,16,54,71	5
UC 24	Shape	1,8,11,12,17,21,46,47	8
UC 25	Size	8,11,13,14,20,21,35,36,43,46,54,73	12
UC 26	Storage property	16	1
UC 27	Temperature	21,54	2
UC 28	Type	1,8,11,12,13,14,15,16,20,33,35,36,41,43,46,47,54,73	18
UC 29	Volume	1,8,11,15,16,20,33,47,73	9
UC 30	Weight	1,5,8,12,13,14,15,16,17,20,31,35,36,41,43,46,47,48,49,54,73	21
UC 31	Width	5,15,31,48,49	5

Tableau E.2 : Caractéristiques du mouvement (Mo)

Mo	**Nom**	**Numéro de l'article**	**Total**
Mo 1	Access from below	17	1
Mo 2	Aisle length	15,35,36	3
Mo 3	Aisle width	8,13,14,15,16,41,43,46	8
Mo 4	Angle of inclination	16,21,43	3
Mo 5	Antistatic ambiance	17	1
Mo 6	Automation	13,14,35,36,43,46,54	7
Mo 7	Automation level	15	1
Mo 8	Bidirectional flow	43	1
Mo 9	Control	11	1
Mo 10	Course	8,11	2
Mo 11	Coverage area	8,11,13,14,16,35,36,43,54	9
Mo 12	Cross traffic	43,46	2
Mo 13	Cycle time	17	1
Mo 14	Discharge	21	1
Mo 15	Distance station	17	1
Mo 16	Distance	12,47	2
Mo 17	End of line	17	1
Mo 18	Frequency	47	1
Mo 19	From/to storage zone	20,33	2
Mo 20	High temperatures	17	1
Mo 21	Handled load	54	1
Mo 22	Handled load/time unit	8,11,20,41,43	5
Mo 23	Height	12	1
Mo 24	Interface	16,43	2
Mo 25	Inventory turnover method	13,14,35,36	4
Mo 26	Level	8,11,12,13,14,16,17,35,36,41,47,54	12
Mo 27	Lifting height / Move height	13,14,21,35,36,41,54	7
Mo 28	Loading/unloading	21,41,43,54,73	5
Mo 29	Location	8,11,16,41	4
Mo 30	Long distances	17	1
Mo 31	Maximum budgetary provision	62	1
Mo 32	MHE type transporting into storage	15	1
Mo 33	MHE type transporting out of storage	15	1
Mo 34	Move course	43	1
Mo 35	Move direction/plane	8,13,14,15,21,35,36,43,46,54	10
Mo 36	Move distance	1,8,11,13,14,15,16,20,21,35,36,41,43,46,54,71,73	17
Mo 37	Move flow	43	1
Mo 38	Move frequency	1,8,11,13,14,16,35,36,41,43,46,73	12
Mo 39	Move level	13,14	2
Mo 40	Move loop	54	1

Tableau E.2 : Caractéristiques du mouvement (Mo) (suite et fin)

Mo	Nom	Numéro de l'article	Total
Mo 41	Move pattern	15	1
Mo 42	Move route	43,73	2
Mo 43	Move type	11,12,13,14,15,35,36,41,43,54	10
Mo 44	Nature of loading	43	1
Mo 45	Need for a pallet	17	1
Mo 46	Obstacle	8,46	2
Mo 47	Operation accuracy	15,33,43	3
Mo 48	Operator reach height	13,14	2
Mo 49	Origin/destination	8	1
Mo 50	Origin/destination level	46	1
Mo 51	Path	1,8,11,12,43,46,47,54	8
Mo 52	Path variability	8,13,14,15,16,20,35,36,46,54	10
Mo 53	Planned automation	17	1
Mo 54	Position accuracy	17	1
Mo 55	Product accumulation	17	1
Mo 56	Several products at same time	17	1
Mo 57	Speed	1,11,15,16,21,47,73	7
Mo 58	Transaction data treatment	15	1
Mo 59	Truss height	1,8,11,13,14,15,16,35,36,43,46,54	12
Mo 60	Type	47	1
Mo 61	Type of MHE to be connected	15	1
Mo 62	Up-and download at same point	17	1
Mo 63	Workstation types	15	1

Tableau E.3 : Caractéristiques de l'équipement (É)

É	Nom	Numéro de l'article	Total
É 1	Accepted pallet load construction defects	2	1
É 2	Accepted pallet load deformities	2	1
É 3	Accepted surface occupancy defects	2	1
É 4	Accepted packaging defects	2	1
É 5	Accepted pallet condition	2	1
É 6	Accessibility to each pallet	2	1
É 7	Accelaration	7	1
É 8	Accumulation	20,21,43,46,73	5
É 9	Accuracy	4,25,42,49,54,61,62	7
É 10	Acquisition cost	1,11,15,23,24,25,26,31,41,42,53,69,71	13
É 11	Adaptability	15	1
É 12	Angle of repose	21	1
É 13	Applicability	15	1
É 14	Applicability for heavy goods	45	1
É 15	Applicability for large goods	45	1
É 16	Application and use	64	1

Tableau E.3 : Caractéristiques de l'équipement (É) (suite)

É	Nom	Numéro de l'article	Total
É 17	Attainability of experts for education, etc.	25	1
É 18	Attainability of spare parts	25	1
É 19	Automation level	4	1
É 20	Battery capacity	61,62	2
É 21	Bi-directional movement	64	1
É 22	Capacity	49,64	2
É 23	Carrier length	7	1
É 24	Carrier speed	7	1
É 25	Charging time	64	1
É 26	Comfort	5	1
É 27	Control method	47	1
É 28	Controllability	1,42	2
É 29	Convenience	25,49	2
É 30	Costs	45,64	2
É 31	Customization	64	1
É 32	Cylinder capacity	5	1
É 33	Debit	4	1
É 34	Deceleration	7	1
É 35	Deck design	13,14	2
É 36	Ease and flexibility of operation	70	1
É 37	Easy and comfortable to use	49	1
É 38	Economic	15	1
É 39	Engine type	41	1
É 40	Equipment Compatibility with others	71	1
É 41	Equipment profile complexity	21	1
É 42	Equipment range	42	1
É 43	Ergonomics	45	1
É 44	Fisxed costs per hour	5,47,48	3
É 45	Variable costs per hour	5	1
É 46	Flexibility	2,5,21,23,24,25,31,42,45,48,49	11
É 47	Floor load capacity	8	1
É 48	Fuel consumption	5	1
É 49	Function	35,36,54	3
É 50	Gripping equipment	41	1
É 51	Guarantee and after service	25,49	2
É 52	Guidepath	64	1
É 53	Height	61,62	2
É 54	Host computer level	15	1
É 55	Ideally required palletised unit load flow	2	1
É 56	Installation cost	70	1
É 57	Installation difficulties	4	1
É 58	Integratability	15	1
É 59	Internal dimensions of the equipment utilisation rate	4	1
É 60	Inventory turnover method	2,4,	3

Tableau E.3 : Caractéristiques de l'équipement (É) (suite)

É	Nom	Numéro de l'article	Total
É 61	Investment cost	2,4,49	3
É 62	Item security and protection	4	1
É 63	Lead time	23,24	2
É 64	Length	61,62	2
É 65	Lift height	64	1
É 66	Lift speed	61,62	2
É 67	Lifting/ loading/unloading speed	13,14,15,25	4
É 68	Lifting power	5	1
É 69	Loading capacity	21,25,41,54,71	5
É 70	Loading time at a separate station	7	1
É 71	Loading time at a combined station	7	1
É 72	Loading time in supermarket	7	1
É 73	Loading/Unloading automation level	15,43	2
É 74	Loading/Unloading type	13,14,54	3
É 75	Maintenance	1,15,25	3
É 76	Maintenance features	64	1
É 77	Maintenability	47,49	2
É 78	Maintenance cost	25,49	2
É 79	Maintenance need	4	1
É 80	Maximum lift height	61,62	2
É 81	Maximum load capacity	61,62	2
É 82	Maximum torque	5	1
É 83	Maximum travel speed	61,62	2
É 84	Mean time to repair	24	1
É 85	MH design problems	4	1
É 86	MHE	4	1
É 87	Move automation level	15,54	2
É 88	Move speed	25,31,70	3
É 89	Noise	49	1
É 90	Number of references ideally required	2	1
É 91	Number of palletised unit loads for each reference ideally required	2	1
É 92	Number of SKU into a small area	4	1
É 93	Off-loading time in supermarket	7	1
É 94	Off-loading time at drop-off station	7	1
É 95	Off-path travel capability	64	1
É 96	On-line recharging	64	1
É 97	Operation control	11,35,36,46,54	5
É 98	Operation and maintenance cost	70	1
É 99	Operation cost	1,2,11,15,25,26,31,41,49,53,69,71	12
É 100	Operation time per day	15	1
É 101	Operation type	15	1
É 102	Operator requirement	70	1
É 103	Operator vs stock	4	1
É 104	Options	4	1

Tableau E.3 : Caractéristiques de l'équipement (É) (suite)

É	Nom	Numéro de l'article	Total
É 105	Other accepted pallet load defects	2	1
É 106	Pallet rack compartment occupation rate	2	1
É 107	Palletised unit load aggression	2	1
É 108	Performance	45	1
É 109	Planes of movement	64	1
É 110	Position of movement	64	1
É 111	Position sensors	64	1
É 112	Power	5	1
É 113	Power source	11,21	2
É 114	Price	5	1
É 115	Primary function	8,13,14,15,35,36,54	7
É 116	Product protection	23,24	2
É 117	Quantity of aisles	4	1
É 118	Ramps	41	1
É 119	Reconfigurability	4,49	2
É 120	Relationship with manufacture	25	1
É 121	Reliability	23,42	2
É 122	Repeatability	25,49	2
É 123	Revolution decrese	5	1
É 124	Rider/Walkie	41	1
É 125	Risk	25,49	2
É 126	Run-time	64	1
É 127	Safety	1,15,25,45,47,49	6
É 128	Safety features	64	1
É 129	Salvage value	25	1
É 130	Service	5,49	2
É 131	Spare parts cost	25	1
É 132	Space for worker	49	1
É 133	Space requirement	70	1
É 134	Space utilisation rate	2,4	2
É 135	Spacing between carriers	7	1
É 136	Speed loaded	64	1
É 137	Speed of the conveyor	5,48,49	3
É 138	Speed unloaded	64	1
É 139	Supervision problems	4	1
É 140	System capability	64	1
É 141	Tires type	41	1
É 142	Torque increase	5	1
É 143	Training service	49	1
É 144	Transportation method	13,14,35,36	4
É 145	Turning radius	64	1
É 146	Up-time	23,24	2
É 147	Utilization level	26,41	2
É 148	Variability	1,47	2
É 149	Variable cost	47,48	2

Tableau E.3 : Caractéristiques de l'équipement (É) (suite et fin)

É	Nom	Numéro de l'article	Total
É 150	Vendor support	64	1
É 151	Vibration	49	1
É 152	Volume and diversity of fuel	25	1
É 153	Volume capacity	70	1
É 154	Warranty	64	1
É 155	Weight control needed	15	1
É 156	Width	61,62,64	3
É 157	Workers requirement	4	1

Tableau E.4 : Caractéristiques du milieu (Mi)

M	Nom	Numéro de l'article	Total
Mi 1	Aisle	11,47	2
Mi 2	Area	47	1
Mi 3	Bay depth	2	1
Mi 4	Bay height	2,4	2
Mi 5	Exhaust	41	1
Mi 6	Floor cost	4	1
Mi 7	Floor space	13,14,35,36,54	5
Mi 8	Floor space nature	15,41	2
Mi 9	Height	47	1
Mi 10	Metal debris	41	1
Mi 11	Noise	41	1
Mi 12	Occupying aisle	46	1
Mi 13	Power availability	41	1
Mi 14	Rack deep	13,14,35,36,54	5
Mi 15	Slope	43	1
Mi 16	Space between column	8	1
Mi 17	Space requirements for picking	4	1
Mi 18	Step	46	1
Mi 19	Storage area	54	1
Mi 20	Utilization rate of cubic volume of the building	4	1

Tableau E.5 : Caractéristiques spécifiques aux équipements d'entreposage (SÉE)

SÉE	Nom	Numéro de l'article	Total
SÉE 1	Access approach	16	1
SÉE 2	Density	16	1
SÉE 3	Inventory turnover method	14; 16; 35	3

ANNEXE F – SOMMAIRE DES DONNÉES D'ENTRÉE

Tableau F.1 : Sommaire des données d'entrée

Formes de données	Auteurs (date)	Équipements de manutention							Total	Équipements d'entreposage				Total	Caractéristiques					Total
		CTCI	CTCV	AL	CM	SVGA	R	ÉC		Pa	AS/RS	SECV	ASE		UC	Mo	É	Mi	SÉE	
Données de base	Fisher, Farber, and Kay (1988)	9		3	6	4			22						6	4	1			11
	Hosni (1989)	Classification de ÉME difficile à lire.													Facteurs de l'équation de la manutention et onze sous facteurs.					
	Liang et al. (1989)	Différents groupes de ÉME[1].													Différents facteurs et critères.					
	Malmborg et al. (1989)				16	1			17[2]						2	9	9	6		26
	Reza Ziai et Sule (1989)	Les groupes CTCI et chariots élévateurs à fourche.													Coûts et indications sur d'autres caractéristiques (paramètres, facteurs, etc.)					
	Kouvelis et Lee (1990)	Différents groupes de ÉME.													Coûts et indications sur d'autres caractéristiques.					
	Matson, Swaminathan et Mellichamp (1990)	Indications de 35 ÉME.													Indications sur 28 caractéristiques.					
	Trevino et al. (1991)				5				5	2			1	3	Minimise les coûts d'opération.					
	Bookbinder and Gervais (1992)	14		7	8				29						6	14	2	1		23
	Matson, Mellichamph, and Swaminathan (1992)	12		6	8	4			30						6	19	2	1		28
	Noble et Tanchoco (1993a)	4			5	3			12						Indications sur les caractéristiques (facteurs, contraintes, etc..).					
	Chu, Egbelu, and Wu (1995)	12		5	10	5			32	5	4	1	6	16	5	11			3	19
	Park (1996)	15		5	13	5	4	11	53	2	3	2	2	9	7	12	7	3		29
	Chan, Ip, and Lau (2001)	17		6	16	8	4		51	2	3		5	10	6	13	5	2	1	27
	Sharp et al. (2001)	Analyse de quelques groupes de ÉME.													Indications sur les caractéristiques.					
	Yaman (2001)	Six groupes de ÉME.													5	5	1			11
	Chan (2002)	17		6	16	8	4		51	2	3		5	10	6	13	5	2	1	27
	De Lit, L'Eglise, Danloy, Rekiek et Delchambre (2002)	9		2		1			17						11	14				25
	Fonseca, Uppal, and Greene (2004)	20	33	4					57						5	7	6			18
	Cho and Egbelu (2005)	13		6	6	3			28	2	2		4	8	11	16	16	1		44
	Kulak et al. (2004)	14		4	11	7	4		40	1	2		3	6	6	10	3	2	1	22
	Kulak (2005)	14		4	11	7	4		40	1	2		3	6	6	10	3	2	1	22
	Chakraborty and Banik (2006)	Trois groupes de ÉME (CTCI, AL, CM) et un ÉME auxiliaire indéfini (1 à 4).													6	12	4	1		23
	Rahman et al. (2007)	Deux groupes de ÉME (VGA avec robot et CTCI avec robot).													Indications sur les caractéristiques.					
	Mirhosseyni and Webb (2009)	9		3	10	4			26						6	11	2	2		21

[1] Toutes les données de la base de données ne sont présentées. Seulement un exemple avec une partie des données est proposé à la fin.

[2] Il y a deux équipements difficiles à identifier (autodrive pallet et montrack).

Tableau F.1 : Sommaire des données d'entrée (suite)

Formes de données	Auteurs (date)	Équipements de manutention							Total	Équipements d'entreposage				Total	Caractéristiques					Total
		CTCI	CTCV	AL	CM	SVGA	R	ÉC		Pa	AS/RS	SECV	ASE		UC	Mo	É	Mi	SÉE	
Données de base	Matt et al. (2011)	1		1	3				5	1	1		2	4			7			7
	Bauters et al. (2015)	Simulation de trois scénarios de ÉME.															10			10
	Ahmed Bouh et Riopel (2016)				2		1		3	10	4		1	15			17	2		19
	Chakraborty et Prasad (2016)	Plus de 500 modèles de CM.													4	5				9
	Ahmed Bouh et Riopel (2017c)				2		2		4	1			7	8			19	4		23
	Varun et al. (2017)	1		2	1	1			5								7			7
À des fins d'exemple	Frazelle (1985)	Quatre SME sous forme d'alternatives constitués de plusieurs combinaisons (SVGA, manuel, monorail, etc.).													Cinq critères (ROI, sécurité, flexibilité, compatibilité, et maintenabilité).					
	Hassan, Hogg, and Smith (1985)	Quatre exemples indéfinies empruntés de Webster, D. B. (1969).															3			3
	Shelton et Jones (1987)	Quatre alternatives indéfinies de VGA (1 à 4).															23			23
	Gabbert et Brown (1988)	Plusieurs groupes de ÉME hiérarchisés pour le cas traité de General Electric.															6			6
	Castleberry (1990)	Alternatives indéfinies SVGA.													Seize groupes de critères contenant une centaine d'caractéristiques.					
	Velury and Kennedy (1992)	Indications sur des SME.													1	1	4			6
	Welgama and Gibson (1995)	4		3[1]	2[2]	1[3]			10						Minimise les coûts d'investissement et d'opération.					
	Noble et al. (1998)	2			5	2			9						Indications sur les caractéristiques (facteurs, contraintes, etc..).					
	Braglia et al. (2001)	Sept alternatives indéfinies de CTCI (A à G).													Critères détaillés de coût, bénéfice, et compatibilité en hiérarchie.					
	Deb, S. K., Bhattacharyya et Sorkhel (2002)	Quatre alternatives indéfinies (1 à 4).													Quatre critères non classifiés (supervision, sécurité, environnement, et coûts).					
	Paulo et al. (2002)	2			2	1	2		7		1			1	Coûts et indications sur d'autres caractéristiques (paramètres, etc.).					
	Deb, S., Bhattacharyya et Sorhkel (2003)	Quatorze ÉME sont considérés mais leurs noms n'apparaissent pas au complet.													Des indications sur les coûts sont identifiable[4].					
	Lashkari et al. (2004)	Sept alternatives of ÉME regroupant des catégories, classes and types de ÉME.													Coûts et indications sur d'autres caractéristiques (paramètres, etc.).					
	Sujono et Lashkari (2007)	2			2	1	2		7		1			1	Coûts et indications sur d'autres caractéristiques (paramètres, etc.).					
	Onut, Kara, and Mert (2009)	Trois groupes (CTCI, CM, SVGA) et deux types de AL (1 à 5).															2			2
	Hassan (2010)	Exemple d'application indéfini emprunté de Maloney, D. (2002).																		
	Tuzkaya et al. (2010)	Six alternatives indéfinies de CM (1 à 6).													23 critères pour sélectionner un modèle de ÉME.					
	Athawale et Chakraborty (2011)	Quatre alternatives indéfinies de T/C (1 à 4) avec 6 critères / 8 alternatives indéfinies de CM (1 à 8) avec 10 critères.													2		14			16
	Mahdavi et al. (2011)	Cinq groupes de ÉME (R, CM, T/C, SVGA, et AS/RS).													Indications sur les caractéristiques (opérations, paramètres, etc.).					
	Maniya and Bhatt (2011)	Huit alternatives indéfinies de ÉME (1 à 8).															6			6

[1] Ils sont présentés dans l'article concerné comme étant deux « gantry cranes », trois « bridge cranes » and et un « mobile crane ». Les trois types du tableau sont « gantry crane, bridge crane et mobile crane ».
[2] Ils sont présentés dans l'article concerné comme étant quatre « forklifts » et un « tow-tractor ». Les deux types du tableau sont « forklift et tow-tractor ».
[3] C'est la catégorie SVGA.

[4] Des indications sur des caractéristiques sont disponibles comme étant des données de la base de connaissance.

Tableau F.1 : Sommaire des données d'entrée (suite et fin)

Formes de données	**Auteurs (date)**	**Équipements de manutention**							**Total**	**Équipements d'entreposage**				**Total**	**Caractéristiques**					**Total**
		CTCI	**CTCV**	**AL**	**CM**	**SVGA**	**R**	**ÉC**		**Pa**	**AS/RS**	**SECV**	**ASE**		**UC**	**Mo**	**É**	**Mi**	**SÉE**	
	Momani et Ahmed (2011)	1			3				4						4	6	6	3		19
	Sawant et al. (2011)	Seize modèles de VGA (HK40/O, F150, etc.).															9			9
	Karande and Chakraborty (2013)	Quatre alternatives indéfinies de ÉME (1 à 4).													2		4			6
	Rossi et al. (2013)	Un modèle d'équipement manipulateur est comparé avec le travail manuel.													Une hiérarchie de critères ergonomiques et de performance est exploitée.					
	Sawant et Mohite (2013)	Seize modèles de VGA (HK40/O, F150, etc.).														1	9			10
	Ahmed and Lam (2014)	1			3				4						4	5	6			15
	Mousavi et al. (2014)	Quatre alternatives indéfinies T/C (1 à 4).													2		4			6
	Ustundag (2014)	Deux alternatives indéfinies de ÉME (1 à 2).															2			2
	Hadi-Vencheh and Mohamadghasemi (2015)	5							5								20			20
	Khandekar et Chakraborty (2015)	Exemple 1: 16 modèles VGA (HK40/O, F150, etc.). Exemple 2: 5 ÉME du domaine minier.													Exemple 1: 9 critères. Exemple 2: 28 critères pour le domaine minier.					
	Jiamruangjarus et Naenna (2016)	Quatre alternatives incluant la situation actuelle, deux T/C et un monorail.													BOCR (benefits, opportunies, costs and risks) et 32 critères.					
	Nguyen et al. (2016)	Quatre alternatives indéfinies de T/C (1 à 4).													2		20			22
	Yilmaz et al. (2017)	2			2	2			6						17 critères organisés en famille (économique, opérationnel, etc.).					
Autres	Malmborg et al. (1986)	Description du potentiel du système expert à résoudre le problème de sélection des ÉME.																		
	Gabbert and Brown (1989)	Description de la méthodologie.															6			6
	Attia, Hosny, Ramu et Chawla (1992)	Description du système expert EMHES.																		
	Noble et Tanchoco (1993b)	Description des résultats et indications sur les données.																		
	Kim and Eom (1997)	Indications sur un exemple d'application sur les SME constitués de la manutention avec l'entreposage.													4	2				6
	Raman et al. (2009)	Détermination de la quantité de ÉME nécessaire pour une SME efficient.																		
	Poon et al. (2011)	Description du modèle et indications sur les données.																		
	Telek (2013)	Une formule mathématique pour la sélection est proposée.																		
	Hassan (2014)	Les entrées et les sorties des systèmes experts pour la sélection des ÉME sont comparées.																		
	Ahmed Bouh et Riopel (2017a)	Les défis de sélection des ÉME dans un contexte 4.0 sont décrits.																		

ANNEXE G – FICHES TECHNIQUES DES SYSTÈMES D'ENTREPOSAGE DESTINÉS AUX CHARGES PALETISSÉES

Tableau G.1 : Fiche technique du système d'entreposage 1 - Entreposage de masse avec chariot élévateur standard

	Entreposage de masse avec chariot élévateur standard
Critères de la charge palettisée	
Défauts de construction de paletée tolérés	Croisement médiocre[1]
Défauts de forme de paletée tolérés	Aucun[1, 2]
Défauts d'occupation de la surface de la palette tolérés	Occupation au mieux[1]
Autres types de défauts de paletée tolérés	Débord[1]
Défauts d'emballage des colis tolérés	Aucun[1, 2]
État de palette toléré	Bon[1]
Critères de l'équipement d'entreposage	
Méthode de rotation des stocks	DEPS[2]
Agression des charges palettisées	Choc de dessus ; pression de dessus[1, 2]
Nombre de références idéalement requis	Faible[2]
Nombre de charges palettisées par référence idéalement requis	Élevé[2, 3]
Flux des charges palettisées idéalement requis	Élevé[2, 3]
Hauteur de la travée	Limitée par la stabilité de la charge palettisée ; limitée par la capacité des colis ; limitée par la capacité de la palette[1, 2, 3]
Profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées)	≤ 10[3]
Accessibilité à chaque palette	Très faible[2]
Utilisation d'espace	Moyenne[2]
Flexibilité aux changements	Très élevée[2, 3]
Coefficient d'occupation des alvéoles	Moyen [2]
Coût d'installation	Nul[2]
Critères de l'équipement de manutention	
Vitesse d'opération	Élevée[2]

[1] (Devys, 1985)
[2] (Rushton et al., 2014)
[3] (Tompkins et al., 2010)

Tableau G.2 : Fiche technique du système d'entreposage 2 - Palettier à simple profondeur avec chariot élévateur standard

	Palettier à simple profondeur avec chariot élévateur standard
Critères de la charge palettisée	
Défauts de construction de paletée tolérés	Croisement médiocre[1]
Défauts de forme de paletée tolérés	Bosse[1]
Défauts d'occupation de la surface de la palette tolérés	Occupation au mieux[1]
Autres types de défauts de paletée tolérés	Retrait ; faible débord[1]
Défauts d'emballage des colis tolérés	Aucun[1]
État de palette toléré	Bon[1]
Critères de l'équipement d'entreposage	
Méthode de rotation des stocks	PEPS[2,3]
Agression des charges palettisées	Aucune[, 3]
Nombre de références idéalement requis	Élevé[3]
Nombre de charges palettisées par référence idéalement requis	Faible[3]
Flux des charges palettisées idéalement requis	Élevé[2]
Hauteur de la travée	Limitée par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé ; limitée par la hauteur disponible du bâtiment[1]
Profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées)	1[3, 4]
Accessibilité à chaque palette	Excellente[2, 4]
Utilisation d'espace	Faible [3]
Flexibilité aux changements	Élevée[3]
Coefficient d'occupation des alvéoles	Très élevé [3]
Coût d'installation	Faible[2, 3]
Critères de l'équipement de manutention	
Vitesse d'opération	Élevée[3]

[1] (Devys, 1985)
[2] (Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) & Association sectorielle transport entreposage (ASTE), 2009)
[3] (Rushton et al., 2014)
[4] (Tompkins et al., 2010)

Tableau G.3 : Fiche technique du système d'entreposage 3 - Palettier à double profondeur avec chariot élévateur standard

	Palettier à double profondeur avec chariot élévateur standard
Critères de la charge palettisée	
Défauts de construction de paletée tolérés	Croisement médiocre[1]
Défauts de forme de paletée tolérés	Bosse[1]
Défauts d'occupation de la surface de la palette tolérés	Occupation au mieux[1]
Autres types de défauts de paletée tolérés	Retrait ; faible débord[1]
Défauts d'emballage des colis tolérés	Aucun[1]
État de palette toléré	Bon[1]
Critères de l'équipement d'entreposage	
Méthode de rotation des stocks	DEPS[2,3]
Agression des charges palettisées	Aucune[3]
Nombre de références idéalement requis	Élevé[3]
Nombre de charges palettisées par référence idéalement requis	4 à 5[3], ≥ 6[4]
Flux des charges palettisées idéalement requis	Moyen[2]
Hauteur de la travée	Limitée par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé ; limitée par la hauteur disponible du bâtiment[1]
Profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées)	2[3, 4]
Accessibilité à chaque palette	Moyenne[3, 2]
Utilisation d'espace	Moyenne [3]
Flexibilité aux changements	Élevée[3]
Coefficient d'occupation des alvéoles	Élevé [3]
Coût d'installation	Faible[2, 3]
Critères de l'équipement de manutention	
Vitesse d'opération	Moyenne[3]

[1] (Devys, 1985)
[2] (Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) & Association sectorielle transport entreposage (ASTE), 2009)
[3] (Rushton et al., 2014)
[4] (Tompkins et al., 2010)

Tableau G.4 : Fiche technique du système d'entreposage 4 - Palettier à simple profondeur avec chariot élévateur pour allées étroites

	Palettier à simple profondeur avec chariot élévateur pour allées étroites
Critères de la charge palettisée	
Défauts de construction de paletée tolérés	Croisement médiocre[1]
Défauts de forme de paletée tolérés	Bosse[1]
Défauts d'occupation de la surface de la palette tolérés	Occupation au mieux[1]
Autres types de défauts de paletée tolérés	Retrait ; faible débord[1]
Défauts d'emballage des colis tolérés	Aucun[1]
État de palette toléré	Bon[1]
Critères de l'équipement d'entreposage	
Méthode de rotation des stocks	PEPS[2]
Agression des charges palettisées	Aucune[2]
Nombre de références idéalement requis	Élevé[2]
Nombre de charges palettisées par référence idéalement requis	Faible[2]
Flux des charges palettisées idéalement requis	Élevé[3,4]
Hauteur de la travée	Limitée par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé ; limitée par la hauteur disponible du bâtiment[1]
Profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées)	1[2]
Accessibilité à chaque palette	Excellente[2, 5]
Utilisation d'espace	Moyenne [2]
Flexibilité aux changements	Élevée[2]
Coefficient d'occupation des alvéoles	Très élevé [2]
Coût d'installation	Moyen[2]
Critères de l'équipement de manutention	
Vitesse d'opération	Très élevée[2]

[1] (Devys, 1985)
[2] (Rushton et al., 2014)
[3] Adaptation de la source couplée
[4] (Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) & Association sectorielle transport entreposage (ASTE), 2009)
[5] (Tompkins et al., 2010)

Tableau G.5 : Fiche technique du système d'entreposage 5 - Palettier à accumulation statique ouvert sur une face avec chariot élévateur standard

	Palettier à accumulation statique ouvert sur une face avec chariot élévateur standard
Critères de la charge palettisée	
Défauts de construction de paletée tolérés	Croisement médiocre[1]
Défauts de forme de paletée tolérés	Bosse[1]
Défauts d'occupation de la surface de la palette tolérés	Occupation au mieux[1]
Autres types de défauts de paletée tolérés	Retrait ; faible débord[1]
Défauts d'emballage des colis tolérés	Aucun[1]
État de palette toléré	Bon[1]
Critères de l'équipement d'entreposage	
Méthode de rotation des stocks	DEPS[2, 3]
Agression des charges palettisées	Aucune[3]
Nombre de références idéalement requis	Moyen[1, 4,]
Nombre de charges palettisées par référence idéalement requis	Élevé[3, 4]
Flux des charges palettisées idéalement requis	Moyen[2, 4]
Hauteur de la travée	Limitée par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé ; limitée par la hauteur disponible du bâtiment[1, 4]
Profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées)	≥ 6[3, 4], 5 à 10[5]
Accessibilité à chaque palette	Très faible[3, 2]
Utilisation d'espace	Élevée[1, 2, 4]
Flexibilité aux changements	Élevé[3, 4]
Coefficient d'occupation des alvéoles	Moyen [3]
Coût d'installation	Moyen[2, 3]
Critères de l'équipement de manutention	
Vitesse d'opération	Moyenne[3]

[1] (Devys, 1985)
[2] (Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) & Association sectorielle transport entreposage (ASTE), 2009)
[3] (Rushton et al., 2014)
[4] (Syndicat des industries de matériels de manutention, 1983b)
[5] (Tompkins et al., 2010)

Tableau G.6 : Fiche technique du système d'entreposage 6 - Palettier à accumulation statique ouvert sur deux faces avec chariot élévateur standard

	Palettier à accumulation statique ouvert sur deux faces avec chariot élévateur standard
Critères de la charge palettisée	
Défauts de construction de paletée tolérés	Croisement médiocre[1]
Défauts de forme de paletée tolérés	Bosse[1]
Défauts d'occupation de la surface de la palette tolérés	Occupation au mieux[1]
Autres types de défauts de paletée tolérés	Retrait; faible débord[1]
Défauts d'emballage des colis tolérés	Aucun[1]
État de palette toléré	Bon[1]
Critères de l'équipement d'entreposage	
Méthode de rotation des stocks	PEPS[2,3]
Agression des charges palettisées	Aucune[3]
Nombre de références idéalement requis	Faible[4]
Nombre de charges palettisées par référence idéalement requis	Élevé[3, 4]
Flux des charges palettisées idéalement requis	Moyen[2]
Hauteur de la travée	Limitée par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé ; limitée par la hauteur disponible du bâtiment[1, 4]
Profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées)	≥ 6[3]
Accessibilité à chaque palette	Très faible[2, 3]
Utilisation d'espace	Élevée[2, 4]
Flexibilité aux changements	Élevée[3]
Coefficient d'occupation des alvéoles	Très élevé[3]
Coût d'installation	Moyen[2, 3]
Critères de l'équipement de manutention	
Vitesse d'opération	Élevée[3]

[1] (Devys, 1985)
[2] (Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) & Association sectorielle transport entreposage (ASTE), 2009)
[3] (Rushton et al., 2014)
[4] (Syndicat des industries de matériels de manutention, 1983b)

Tableau G.7 : Fiche technique du système d'entreposage 7 - Palettier à accumulation dynamique avec chariot élévateur standard

	Palettier à accumulation dynamique avec chariot élévateur standard
Critères de la charge palettisée	
Défauts de construction de paletée tolérés	Aucun[1]
Défauts de forme de paletée tolérés	Bosse[1]
Défauts d'occupation de la surface de la palette tolérés	Aucun[1]
Autres types de défauts de paletée tolérés	Retrait; faible débord[1]
Défauts d'emballage des colis tolérés	Aucun[1]
État de palette toléré	Bon[1]
Critères de l'équipement d'entreposage	
Méthode de rotation des stocks	PEPS[2, 3, 4]
Agression des charges palettisées	Choc latéral ; pression latérale[3]
Nombre de références idéalement requis	Moyen[4]
Nombre de charges palettisées par référence idéalement requis	Élevé[3, 4]
Flux des charges palettisées idéalement requis	Élevé[2, 3, 4, 5]
Hauteur de la travée	Limitée par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé ; limitée par la hauteur disponible du bâtiment[1, 3]
Profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées)	≥ 5[4]
Accessibilité à chaque palette	Très faible[2, 3]
Utilisation d'espace	Élevée[2, 3, 5]
Flexibilité aux changements	Moyenne[3]
Coefficient d'occupation des alvéoles	Élevé[4]
Coût d'installation	Élevé[2, 3]
Critères de l'équipement de manutention	
Vitesse d'opération	Très élevée[3]

[1] (Devys, 1985)
[2] (Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) & Association sectorielle transport entreposage (ASTE), 2009)
[3] (Rushton et al., 2014)
[4] (Roux, 2011)
[5] (Tompkins et al., 2010)

Tableau G.8 : Fiche technique du système d'entreposage 8 - Palettier à gravité inversée avec chariot élévateur standard

	Palettier à gravité inversée avec chariot élévateur standard
Critères de la charge palettisée	
Défauts de construction de paletée tolérés	Aucun[1]
Défauts de forme de paletée tolérés	Bosse[1]
Défauts d'occupation de la surface de la palette tolérés	Aucun[1]
Autres types de défauts de paletée tolérés	Retrait; faible débord[1]
Défauts d'emballage des colis tolérés	Aucun[1]
État de palette toléré	Bon[1]
Critères de l'équipement d'entreposage	
Méthode de rotation des stocks	DEPS[2, 3, 4, 5]
Agression des charges palettisées	Choc latéral ; pression latérale[6, 3]
Nombre de références idéalement requis	Élevé[6, 3]
Nombre de charges palettisées par référence idéalement requis	Faible[3]
Flux des charges palettisées idéalement requis	Moyen[2, 4]
Hauteur de la travée	Limitée par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé ; limitée par la hauteur disponible du bâtiment[6, 1, 3]
Profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées)	3 à 6[3, 4]
Accessibilité à chaque palette	Moyenne[2, 3]
Utilisation d'espace	Moyenne[2, 3]
Flexibilité aux changements	Moyenne[4]
Coefficient d'occupation des alvéoles	Moyen[4]
Coût d'installation	Élevé[2, 3, 4]
Critères de l'équipement de manutention	
Vitesse d'opération	Très élevée[3]

[1] Adaptation de (Devys, 1985)
[2] (Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) & Association sectorielle transport entreposage (ASTE), 2009)
[3] (Rushton et al., 2014)
[4] (Tompkins & Smith, 1998)
[5] (Tompkins et al., 2010)
[6] Adaptation de la source couplée

Tableau G.9 : Fiche technique du système d'entreposage 9 - Palettier satellite ouvert sur une face avec chariot élévateur standard

	Palettier satellite ouvert sur une face avec chariot élévateur standard
Critères de la charge palettisée	
Défauts de construction de paletée tolérés	Croisement médiocre[1]
Défauts de forme de paletée tolérés	Bosse[1]
Défauts d'occupation de la surface de la palette tolérés	Occupation au mieux[1]
Autres types de défauts de paletée tolérés	Retrait; faible débord[1]
Défauts d'emballage des colis tolérés	Aucun[1]
État de palette toléré	Bon[1]
Critères de l'équipement d'entreposage	
Méthode de rotation des stocks	DEPS[2]
Agression des charges palettisées	Aucune[2]
Nombre de références idéalement requis	Moyen[3, 2]
Nombre de charges palettisées par référence idéalement requis	Moyen[2]
Flux des charges palettisées idéalement requis	Moyen[3, 2]
Hauteur de la travée	Limitée par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé ; limitée par la hauteur disponible du bâtiment[2]
Profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées)	≥ 10[2]
Accessibilité à chaque palette	Très faible[2]
Utilisation d'espace	Moyenne[2]
Flexibilité aux changements	Élevée[2]
Coefficient d'occupation des alvéoles	Très élevé[2]
Coût d'installation	Élevé[2]
Critères de l'équipement de manutention	
Vitesse d'opération	Moyenne[2]

[1] Adaptation de (Devys, 1985)
[2] (Rushton et al., 2014)
[3] Adaptation de la source couplée

Tableau G.10 : Fiche technique du système d'entreposage 10 - Palettier satellite ouvert sur deux faces avec chariot élévateur standard

	Palettier satellite ouvert sur deux faces avec chariot élévateur standard
Critères de la charge palettisée	
Défauts de construction de paletée tolérés	Croisement médiocre[1]
Défauts de forme de paletée tolérés	Bosse[1]
Défauts d'occupation de la surface de la palette tolérés	Occupation au mieux[1]
Autres types de défauts de paletée tolérés	Retrait; faible débord[1]
Défauts d'emballage des colis tolérés	Aucun[1]
État de palette toléré	Bon[1]
Critères de l'équipement d'entreposage	
Méthode de rotation des stocks	PEPS[2]
Agression des charges palettisées	Aucune[2]
Nombre de références idéalement requis	Moyen[3, 2]
Nombre de charges palettisées par référence idéalement requis	Moyen[2]
Flux des charges palettisées idéalement requis	Élevé[3, 2]
Hauteur de la travée	Limitée par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé ; limitée par la hauteur disponible du bâtiment[3, 1, 2]
Profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées)	≥ 10[2]
Accessibilité à chaque palette	Très faible[2]
Utilisation d'espace	Moyenne[3, 2]
Flexibilité aux changements	Élevée[2]
Coefficient d'occupation des alvéoles	Très élevé[2]
Coût d'installation	Élevé[2]
Critères de l'équipement de manutention	
Vitesse d'opération	Moyenne[2]

[1] Adaptation de (Devys, 1985)
[2] (Rushton et al., 2014)
[3] Adaptation de la (es) source(s) couplée(s)

Tableau G.11 : Fiche technique du système d'entreposage 11 - Palettier mobile avec chariot élévateur standard

	Palettier mobile avec chariot élévateur standard
Critères de la charge palettisée	
Défauts de construction de paletée tolérés	Croisement médiocre[1]
Défauts de forme de paletée tolérés	Bosse[1]
Défauts d'occupation de la surface de la palette tolérés	Occupation au mieux[1]
Autres types de défauts de paletée tolérés	Retrait ; faible débord[1]
Défauts d'emballage des colis tolérés	Aucun[1]
État de palette toléré	Bon[1]
Critères de l'équipement d'entreposage	
Méthode de rotation des stocks	PEPS[2]
Agression des charges palettisées	Aucune[3]
Nombre de références idéalement requis	Élevé[3]
Nombre de charges palettisées par référence idéalement requis	1 à 2[3]
Flux des charges palettisées idéalement requis	Faible[2, 3, 4, 5]
Hauteur de la travée	Limitée par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé ; limitée par la hauteur disponible du bâtiment[3]
Profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées)	1[3, 5]
Accessibilité à chaque palette	Excellente[2, 3]
Utilisation d'espace	Élevée[2, 3]
Flexibilité aux changements	Moyenne[3, 4]
Coefficient d'occupation des alvéoles	Très élevé [3]
Coût d'installation	Très élevé[2, 3, 4]
Critères de l'équipement de manutention	
Vitesse d'opération	Faible[3, 4]

[1] Adaptation de (Devys, 1985)
[2] (Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) & Association sectorielle transport entreposage (ASTE), 2009)
[3] (Rushton et al., 2014)
[4] (Roux, 2011)
[5] (Tompkins et al., 2010)

Tableau G.12 : Fiche technique du système d'entreposage 12 - Système d'entreposage automatisé simple profondeur

	Système d'entreposage automatisé simple profondeur
Critères de la charge palettisée	
Défauts de construction de paletée tolérés	Croisement médiocre[1]
Défauts de forme de paletée tolérés	Bosse[1]
Défauts d'occupation de la surface de la palette tolérés	Occupation au mieux[1]
Autres types de défauts de paletée tolérés	Retrait ; faible débord[1]
Défauts d'emballage des colis tolérés	Aucun[1]
État de palette toléré	Bon[1]
Critères de l'équipement d'entreposage	
Méthode de rotation des stocks	PEPS[2]
Agression des charges palettisées	Aucune[2]
Nombre de références idéalement requis	Très élevé[2]
Nombre de charges palettisées par référence idéalement requis	Faible[2]
Flux des charges palettisées idéalement requis	Très élevé[2]
Hauteur de la travée	Limitée par la hauteur disponible du bâtiment; limité par la capacité portante du sol, des fondations et de la dalle [2]
Profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées)	1[2, 3]
Accessibilité à chaque palette	Excellente[2]
Utilisation d'espace	48 % [2]
Flexibilité aux changements	Très faible[2, 4]
Coefficient d'occupation des alvéoles	Très élevé [2]
Coût d'installation	Moyen[2]
Critères de l'équipement de manutention	
Vitesse d'opération	Très élevée[2]

[1] Adaptation de (Devys, 1985)
[2] (Rushton et al., 2014)
[3] (Tompkins et al., 2010)
[4] (Tompkins & Smith, 1998)

Tableau G.13 : Fiche technique du système d'entreposage 13 - Système d'entreposage automatisé double profondeur

	Système d'entreposage automatisé double profondeur
Critères de la charge palettisée	
Défauts de construction de paletée tolérés	Croisement médiocre[1]
Défauts de forme de paletée tolérés	Bosse[1]
Défauts d'occupation de la surface de la palette tolérés	Occupation au mieux[1]
Autres types de défauts de paletée tolérés	Retrait ; faible débord[1]
Défauts d'emballage des colis tolérés	Aucun[1]
État de palette toléré	Bon[1]
Critères de l'équipement d'entreposage	
Méthode de rotation des stocks	DEPS[2]
Agression des charges palettisées	Aucune[2]
Nombre de références idéalement requis	Très élevé
Nombre de charges palettisées par référence idéalement requis	4 à 5[2]
Flux des charges palettisées idéalement requis	Très élevé[2]
Hauteur de la travée	Limitée par la hauteur disponible du bâtiment; limité par la capacité portante du sol, des fondations et de la dalle [2]
Profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées)	2[2]
Accessibilité à chaque palette	Moyenne[2]
Utilisation d'espace	Moyenne[2]
Flexibilité aux changements	Très faible[2, 3]
Coefficient d'occupation des alvéoles	Élevé[3, 2]
Coût d'installation	Moyen[2]
Critères de l'équipement de manutention	
Vitesse d'opération	Très élevée[2]

[1] Adaptation de (Devys, 1985)
[2] (Rushton et al., 2014)
[3] (Tompkins & Smith, 1998)

Tableau G.14 : Fiche technique du système d'entreposage 14 - Système d'entreposage automatisé à accumulation dynamique

	Système d'entreposage automatisé à accumulation dynamique
Critères de la charge palettisée	
Défauts de construction de paletée tolérés	Aucun[1]
Défauts de forme de paletée tolérés	Bosse[1]
Défauts d'occupation de la surface de la palette tolérés	Aucun[1]
Autres types de défauts de paletée tolérés	Retrait; faible débord[1]
Défauts d'emballage des colis tolérés	Aucun[1]
État de palette toléré	Bon[1]
Critères de l'équipement d'entreposage	
Méthode de rotation des stocks	PEPS[2, 3]
Agression des charges palettisées	Choc latéral ; pression latérale[2]
Nombre de références idéalement requis	Moyen[2, 3]
Nombre de charges palettisées par référence idéalement requis	Élevé[2]
Flux des charges palettisées idéalement requis	Très élevé[2]
Hauteur de la travée	Limitée par la hauteur disponible du bâtiment; limité par la capacité portante du sol, des fondations et de la dalle[2]
Profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées)	≥ 10[2]
Accessibilité à chaque palette	Très faible[2]
Utilisation d'espace	Très élevée[2]
Flexibilité aux changements	Très faible[3]
Coefficient d'occupation des alvéoles	Très élevé[3]
Coût d'installation	Moyen[2]
Critères de l'équipement de manutention	
Vitesse d'opération	Moyenne[2]

[1] (Devys, 1985)
[2] (Rushton et al., 2014)
[3] (Tompkins & Smith, 1998)

Tableau G.15 : Fiche technique du système d'entreposage 15 - Système d'entreposage automatisé à accumulation statique

	Système d'entreposage automatisé à accumulation statique
Critères de la charge palettisée	
Défauts de construction de paletée tolérés	Croisement médiocre[1]
Défauts de forme de paletée tolérés	Bosse[1]
Défauts d'occupation de la surface de la palette tolérés	Occupation au mieux[1]
Autres types de défauts de paletée tolérés	Retrait ; faible débord[1]
Défauts d'emballage des colis tolérés	Aucun[1]
État de palette toléré	Bon[1]
Critères de l'équipement d'entreposage	
Méthode de rotation des stocks	PEPS[2, 3]
Agression des charges palettisées	Aucune[2, 3]
Nombre de références idéalement requis	Moyen[2, 3]
Nombre de charges palettisées par référence idéalement requis	Élevé[2]
Flux des charges palettisées idéalement requis	Très élevé[2]
Hauteur de la travée	Limitée par la hauteur disponible du bâtiment; limité par la capacité portante du sol, des fondations et de la dalle [2]
Profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées)	≥ 10[2]
Accessibilité à chaque palette	Très faible[2]
Utilisation d'espace	Très élevée[2]
Flexibilité aux changements	Très faible[3]
Coefficient d'occupation des alvéoles	Très élevé[3]
Coût d'installation	Moyen[2]
Critères de l'équipement de manutention	
Vitesse d'opération	Moyenne[2]

[1] Adaptation de (Devys, 1985)
[2] (Rushton et al., 2014)
[3] (Tompkins & Smith, 1998)

ANNEXE H – EXTRAIT DE LA BASE DE DONNÉES D'EXTRACTION DE RÈGLES DE SÉLECTION DES SYSTÈMES D'ENTREPOSAGE DESTINÉS AUX CHARGES PALETTISÉES

Tableau H.1 : Extrait de la base de données d'extraction de règles de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
Classe	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}	C_{19}	Test_App	C_{10}	Ordre
S_6	Aucun	Bosse	Aucun	Retrait	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 2	Faible	Élevée	Moyen	Très faible	Élevée	Élevée	Très Élevée	Élevée	Élevée	Test	6	4.81915E-05
S_5	Aucun	Bosse	Aucun	Faible débord	Aucun	Bon	DEPS	Aucune	Cas 2	Moyen	Élevé	Moyen	Très faible	Élevée	Élevée	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Apprentissage	9	0.000335213
S_{15}	Croisement médiocre	Bosse	Aucun	Faible débord	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 3	Moyen	Élevé	Très élevé	Très faible	Très Élevée	Très faible	Très Élevée	Moyenne	Moyenne	Test	10	0.000517144
S_{15}	Aucun	Bosse	Aucun	Faible débord	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 3	Moyen	Élevé	Très élevé	Très faible	Très Élevée	Très faible	Très Élevée	Moyenne	Moyenne	Test	12	0.000670867
S_{10}	Aucun	Aucun	Occupation au mieux	Retrait	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 2	Moyen	Moyenne	Élevé	Très faible	Moyenne	Élevée	Très Élevée	Élevée	Moyenne	Apprentissage	12	0.000962403
S_{15}	Croisement médiocre	Bosse	Occupation au mieux	Retrait	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 3	Moyen	Élevé	Très élevé	Très faible	Très Élevée	Très faible	Très Élevée	Moyenne	Moyenne	Apprentissage	20	0.001000626
S_1	Aucun	Aucun	Occupation au mieux	Débord	Aucun	Bon	DEPS	Pression de dessus	Cas 1	Faible	Élevé	Élevé	Très faible	Moyenne	Très Élevée	Moyenne	Nul	Élevée	Apprentissage	4	0.00102199
S_{11}	Croisement médiocre	Bosse	Aucun	Retrait	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 2	Élevé	1 à 2	Faible	Excellente	Élevée	Moyenne	Très Élevée	Très Élevée	Faible	Apprentissage	1	0.001023124
S_{15}	Aucun	Aucun	Occupation au mieux	Faible débord	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 3	Moyen	Élevé	Très élevé	Très faible	Très Élevée	Très faible	Très Élevée	Moyenne	Moyenne	Test	14	0.001082778
S_{12}	Aucun	Aucun	Occupation au mieux	Retrait	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 3	Très élevé	Faible	Très élevé	Excellente	Moyenne	Très faible	Très Élevée	Moyenne	Très Élevée	Apprentissage	1	0.001223595
S_5	Croisement médiocre	Aucun	Occupation au mieux	Faible débord	Aucun	Bon	DEPS	Aucune	Cas 2	Moyen	Élevé	Moyen	Très faible	Élevée	Élevée	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Apprentissage	8	0.001328741
S_{10}	Aucun	Aucun	Occupation au mieux	Retrait	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 2	Moyen	Moyenne	Élevé	Très faible	Moyenne	Élevée	Très Élevée	Élevée	Moyenne	Apprentissage	15	0.001389269
S_1	Aucun	Aucun	Aucun	Débord	Aucun	Bon	DEPS	Pression de dessus	Cas 1	Faible	Élevé	Élevé	Très faible	Moyenne	Très Élevée	Moyenne	Nul	Élevée	Apprentissage	8	0.001421791
S_{15}	Croisement médiocre	Aucun	Aucun	Faible débord	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 3	Moyen	Élevé	Très élevé	Très faible	Très Élevée	Très faible	Très Élevée	Moyenne	Moyenne	Test	10	0.001632157
S_{10}	Aucun	Bosse	Aucun	Retrait	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 2	Moyen	Moyenne	Élevé	Très faible	Moyenne	Élevée	Très Élevée	Élevée	Moyenne	Test	15	0.001654487
S_{15}	Aucun	Bosse	Occupation au mieux	Faible débord	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 3	Moyen	Élevé	Très élevé	Très faible	Très Élevée	Très faible	Très Élevée	Moyenne	Moyenne	Apprentissage	10	0.001775318
S_2	Croisement médiocre	Aucun	Aucun	Retrait	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 2	Élevé	Faible	Élevé	Excellente	Faible	Élevée	Très Élevée	Faible	Élevée	Apprentissage	1	0.001807405
S_6	Croisement médiocre	Aucun	Aucun	Retrait	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 2	Faible	Élevée	Moyen	Très faible	Élevée	Élevée	Très Élevée	Élevée	Élevée	Apprentissage	9	0.001920998
S_{14}	Aucun	Aucun	Aucun	Retrait	Aucun	Bon	PEPS	Choc latéral	Cas 3	Moyen	Élevé	Très élevé	Très faible	Très Élevée	Très faible	Très Élevée	Moyenne	Moyenne	Test	12	0.001942653
S_9	Croisement médiocre	Bosse	Aucun	Retrait	Aucun	Bon	DEPS	Aucune	Cas 2	Moyen	Moyenne	Moyen	Très faible	Moyenne	Élevée	Très Élevée	Élevée	Moyenne	Test	16	0.001995608
S_1	Aucun	Aucun	Occupation au mieux	Débord	Aucun	Bon	DEPS	Choc de dessus	Cas 1	Faible	Élevé	Élevé	Très faible	Moyenne	Très Élevée	Moyenne	Nul	Élevée	Apprentissage	6	0.002027554
S_{15}	Croisement médiocre	Bosse	Occupation au mieux	Retrait	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 3	Moyen	Élevé	Très élevé	Très faible	Très Élevée	Très faible	Très Élevée	Moyenne	Moyenne	Test	10	0.002105062
S_{13}	Aucun	Bosse	Occupation au mieux	Faible débord	Aucun	Bon	DEPS	Aucune	Cas 3	Très élevé	4 à 5	Très élevé	Moyenne	Moyenne	Très faible	Élevée	Moyenne	Très Élevée	Test	2	0.002109147
S_5	Croisement médiocre	Bosse	Aucun	Faible débord	Aucun	Bon	DEPS	Aucune	Cas 2	Moyen	Élevé	Moyen	Très faible	Élevée	Élevée	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Apprentissage	7	0.002267518
[illegible]	Croisement médiocre	Bosse	Occupation au mieux	Retrait	Aucun	Bon	PEPS	Aucune	Cas 2	Moyen	Moyenne	Élevé	Très faible	Moyenne	Élevée	Très Élevée	Élevée	Moyenne	Test	19	0.002421989

Test_App (2)

Nb (non vides) : 11161