

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université ABOU-BEKR BELKAID
Tlemcen, Algérie
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique et Electronique

THESE de Doctorat
Productique

Présenté par :

Mme MEGHELLI-GAOUAR Nihad

THEME

**Investigations sur le stockage par classe dans un
système automatisé de stockage/déstockage (AS/RS)
à convoyeur gravitationnel**

Soutenance Juin 2015
Devant le Jury

Président :

Chikh Mohammed Amine

Professeur à l'UABB de Tlemcen.

Examineurs :

Ahmed-Foitih Zoubir
Nouibat Wahid

Professeur à l'USTO
MCA à l'USTO

Encadreurs :

Zaki Sari

Professeur à l'UABB de Tlemcen.

Je dédie ce modeste travail
à toute ma famille



REMERCIEMENTS

Avant tout, je tiens à remercier Dieu Tous Puissant de m'avoir donné la patience et la volonté de continuer et d'arriver à réaliser ce modeste travail, الحمد لله.

A l'issue de ce travail qui a été conçu dans le Laboratoire de Productique de Tlemcen, MELT, sous la direction de Mr SARI Zaki ; à qui, il m'est agréable d'exprimer mes remerciements les plus sincères et ma profonde gratitude pour son aide si précieuse.

Que Mr SARI Zaki, Professeur à l'Université de Tlemcen, trouve en ces quelques lignes, ma profonde gratitude et mon grand respect pour son aide, son dévouement pour le travail et ses précieux conseils si éclairés, je lui dois beaucoup, il est un modèle pour moi.

Un grand merci à Mr CHIKH Mohammed Amine, Professeur à l'Université de Tlemcen, d'avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie vivement Mr AHMED-FOITIH Zoubir, Professeur à l'USTO et Mr NOUIBAT Wahid, Maître de Conférence (A) à l'USTO, pour avoir accepté d'expertiser ce travail et leurs participations au Jury. J'exprime l'assurance de ma considération distinguée à l'ensemble des membres du jury.

Je tiens à remercier Mr CASTAGNA Pierre, Mr MEBARKI Nasser et Mr CARDIN Olivier, de l'Université de Nantes, d'avoir accepté de m'aider sans aucune hésitation, malgré leur emploi du temps bien chargé. Je leur en suis reconnaissante pour tout cela et bien plus. Ainsi que je remercie tous les membres du département QLIO à Nantes pour leur gentillesse et l'accueil qui m'ont consacré au cours de mon séjour à Nantes.

Je remercie les membres du Laboratoire de Productique de Tlemcen, MELT.

Je tiens à remercier tous les membres de ma famille pour la patience, les sacrifices, les encouragements, la gentillesse et le soutien qu'ils m'ont prodigués tous au long de ce travail.

Je tiens à remercier l'ensemble de mes amis.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Résumé :

Notre travail consiste à implémenter un modèle d'AS/RS à convoyeur gravitationnel à stockage par classe dans un programme de simulation, en utilisant le logiciel de simulation des systèmes de production Arena/SIMAN, afin de traiter les points suivants :

- L'impact du stockage par classe sur les performances de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel ;
- L'impact des positions des stations de dépôt/livraison et du convoyeur de restockage sur les temps de transport d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel ;
- L'adaptation de l'Heuristique de stockage/déstockage au stockage par classe.

Le stockage par classe a permis une grande amélioration du temps de cycle de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel, ainsi ses performances globales sont devenues supérieures à celles de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel utilisant le stockage aléatoire.

Mot clés :

Système automatisé de stockage/déstockage, AS/RS à convoyeur gravitationnel, stockage par classe, simulation, Arena, heuristique, performance.

Abstract:

Our work is to implement a model of the flow rack AS/RS with class-based storage in a simulation program, by using ARENA/SIMAN, to address the following points:

- The impact of class-based storage on the performance of the flow rack AS/RS;
- The impact of the positions of deposit/delivery stations and restoring conveyor on transport time of a flow rack AS/RS;
- The adaptation of the Heuristics of storage/retrieval per class-based storage.

The class-based storage allowed a great improvement of the cycle time of the flow rack AS/RS, thus its total performances became higher than those of the flow rack AS/RS using random storage.

Keywords:

AS/RS, flow rack AS/RS, class-based storage, simulation, Arena, heuristic, performance.

ملخص:

يقتضي عملنا تصميم نموذج لنظام آلي للشحن والتفريغ ذو ناقل جاذبي للتخزين حسب الأقسام في برنامج محاكاة باستعمال برمجيات المحاكاة ARENA/SIMAN بهدف معالجة النقاط التالية:

- تأثير التخزين بالأقسام على أداء النظام الآلي للتخزين والتفريغ ذو الناقل الجاذبي.
- تأثير وضعيات محطات الإيداع والتسليم وناقل إعادة التخزين على أزمدة النقل الخاصة بالنظام الآلي للتخزين والتفريغ ذو الناقل الجاذبي.
- تكييف فوقية الاستدلال الخاصة بالتخزين والتفريغ لتتوافق مع التخزين حسب الأقسام.

التخزين حسب الأقسام سمح بتحسين زمن الدورة الواحدة للنظام الآلي للتخزين والتفريغ ذو الناقل الجاذبي، بالإضافة لهذا فإن الأداء العام صار أفضل من ذلك الذي لدى النظام الآلي للتخزين والتفريغ ذو الناقل الجاذبي حيث يكون التخزين عشوائياً.

كلمات مفتاحية:

نظام آلي للشحن والتفريغ، نظام آلي للشحن والتفريغ ذو ناقل جاذبي، التخزين حسب الأقسام، المحاكاة، Arena، فوقية الاستدلال، أداء.

Sommaire

REMERCIEMENTS

| | |
|-----------------------|---|
| Introduction Générale | 1 |
|-----------------------|---|

Partie A

Etat de la question sur la politique des systèmes AS/R

| | |
|--|---|
| Chapitre 1 Les Systèmes Automatisé de Stockage/Déstockage | 6 |
|--|---|

| | |
|--|----|
| 1.1. Introduction | 6 |
| 1.2. Système automatisé de stockage/déstockage, AS/RS | 7 |
| 1.3. AS/RS, Composants et Terminologie | 9 |
| 1.3.1. Structure de stockage | 9 |
| 1.3.2. La machine de stockage/déstockage (machine S/R) | 10 |
| 1.3.3. Stations de dépôt/livraison | 11 |
| 1.3.4. Modules de stockage | 11 |
| 1.3.5. Système de contrôle | 11 |
| 1.4. Types d'AS/RS | 11 |
| 1.4.1. L'AS/RS à charge unitaire | 12 |
| 1.4.2. L'AS/RS à mini-charge | 12 |
| 1.4.3. L'AS/RS multi-allées | 13 |
| 1.4.4. L'AS/RS à racks glissants | 13 |
| 1.4.5. L'AS/RS à carrousel | 14 |
| 1.4.6. L'AS/RS à personne embarquée | 15 |
| 1.4.7. L'AS/RS à étagères profondes | 15 |
| 1.4.8. L'AS/RS à convoyeur gravitationnel | 16 |
| 1.5. Conception d'un AS/RS | 17 |
| 1.6. Méthodes de stockage | 17 |

| | | |
|--------|-------------------------------|----|
| 1.6.1. | Stockage dédié | 18 |
| 1.6.2. | Stockage aléatoire ouvert | 18 |
| 1.6.3. | Stockage aléatoire par classe | 19 |
| 1.7. | Conclusion | 19 |
| 1.8. | Références Bibliographiques | 19 |

Chapitre 2

L'AS/RS à convoyeurs gravitationnels, Modélisation du temps moyen de déstockage

21

| | | |
|--------|---|----|
| 2.1. | Introduction | 21 |
| 2.2. | Système AS/R à Convoyeurs Gravitationnels, AS/RS à CG | 22 |
| 2.2.1. | Notations | 22 |
| 2.2.2. | Description (Sari, 2003) | 23 |
| 2.2.3. | Fonctionnement du système AS/R à Convoyeur Gravitationnel | 25 |
| 2.3. | Modélisation des temps de cycle d'un AS/RS à Convoyeur Gravitationnel | 26 |
| 2.4. | Heuristique de stockage/déstockage | 28 |
| 2.5. | Conclusion | 31 |
| 2.6. | Références Bibliographiques | 31 |

Chapitre 3

Evaluation des performances des AS/RS dans la littérature

33

| | | |
|--------|--|----|
| 3.1. | Introduction | 33 |
| 3.2. | Méthodes d'évaluation de performances du système | 34 |
| 3.2.1. | Les mesures directes | 35 |
| 3.2.2. | Les méthodes analytiques | 36 |
| 3.2.3. | La simulation | 36 |
| 3.3. | Critères d'évaluation des performances | 38 |
| 3.4. | Configuration du système | 40 |
| 3.5. | Affectation de stockage | 43 |
| 3.6. | Traitement par lots | 45 |
| 3.7. | Position du point de repos des machines S/R | 46 |
| 3.8. | Ordonnancement des demandes de stockage/déstockage | 47 |
| 3.9. | Modélisation du temps de transport | 49 |
| 3.10. | Conclusion | 52 |
| 3.11. | Références Bibliographiques | 53 |

Chapitre 4

Stockage par classe 60

| | |
|---|----|
| 4.1. Introduction | 60 |
| 4.2. Politiques de stockage | 61 |
| 4.2.1. Le stockage dédié | 61 |
| 4.2.2. Le stockage aléatoire | 62 |
| 4.2.3. Le stockage par classe | 62 |
| 4.2.4. Le stockage au plus proche voisin | 62 |
| 4.2.5. Le stockage full-turnover | 63 |
| 4.3. Etat de l'art sur le stockage par classe | 63 |
| 4.4. Conclusion | 72 |
| 4.5. Références Bibliographiques | 72 |

Partie B

Stockage par classe dans un AS/RS à convoyeur gravitationnel

Chapitre 5

Modélisation des temps de transport par classe d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel 77

| | |
|--|----|
| 5.1. Introduction | 77 |
| 5.2. Formulation du problème | 78 |
| 5.3. Modélisation analytique : | 81 |
| 5.3.1. Calcul du temps moyen de déstockage pour la classe A, $\overline{E(RC)a}$ | 83 |
| 5.3.2. Calcul du temps moyen de déstockage pour la classe B, $\overline{E(RC)b}$ | 89 |
| 5.3.3. Calcul du temps moyen de déstockage, $\overline{E(RC)}$ | 91 |
| 5.4. Modélisation par simulation | 93 |
| 5.5. Conclusion | 97 |
| 5.6. Références Bibliographiques | 97 |

Chapitre 6

Impact du stockage par classe sur les performances de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel 99

| | |
|--|-----|
| 6.1. Introduction | 99 |
| 6.2. Impact de la disposition des casiers dédiés aux classes sur le temps de stockage/déstockage | 100 |
| 6.2.1. Disposition géographique des casiers dédiés aux classes dans les AS/RS | 100 |
| 6.2.2. Configuration de l'AS/RS à Convoyeur Gravitationnel | 103 |
| 6.2.3. Validation expérimentale | 105 |
| 6.2.4. Résultats et interprétations | 107 |
| 6.3. Impact du nombre de classes sur le temps de stockage/déstockage | 115 |
| 6.3.1. Validation expérimentale | 115 |
| 6.3.2. Résultats et interprétation | 116 |
| 6.4. Conclusion | 118 |
| 6.5. Références Bibliographiques | 118 |

Chapitre 7

Impact des positions des stations de dépôt/livraison et du convoyeur de restockage sur les temps de transport d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel 120

| | |
|---|-----|
| 7.1. Introduction | 120 |
| 7.2. Impact du point de repos de la machine de déstockage (MD) sur le temps moyen de déstockage | 121 |
| 7.2.1. Validation expérimentale | 121 |
| 7.2.2. Résultats et interprétations | 122 |
| 7.3. Influence des positions des stations de dépôt/livraison et du convoyeur de restockage sur les temps de stockage/déstockage | 124 |
| 7.3.1. Validation expérimentale | 124 |
| 7.3.2. Résultats et interprétation | 125 |
| 7.4. Conclusion | 129 |
| 7.5. Références Bibliographiques | 129 |

Chapitre 8

Adaptation de l'Heuristique de stockage/déstockage au stockage par classe 131

| | |
|---|-----|
| 8.1. Introduction | 130 |
| 8.2. Heuristique de stockage/déstockage | 131 |
| 8.3. Heuristique de stockage/déstockage par classe | 134 |
| 8.4. Comparaison entre les différentes méthodes de stockage | 137 |

| | |
|---|------------|
| 8.5. Conclusion | 138 |
| 8.6. Références Bibliographiques | 139 |
| Conclusion Générale & Perspectives | 140 |
| <hr/> | |
| Table des figures & des tableaux | 146 |
| <hr/> | |

Introduction Générale

La demande croissante d'une variété élevée de produits et de temps de réponse court dans l'industrie de fabrication, d'aujourd'hui, souligne l'importance de la souplesse et de l'efficacité des systèmes de production et surtout des systèmes de manutention. Le fonctionnement du système de manutention est déterminé par les acheminements de produits, l'aménagement d'usine et les stratégies de contrôle de flux matériel.

Les systèmes de manutention sont des systèmes matériels qui transportent des matériaux vers les différentes étapes de la transformation, la fabrication, l'assemblage et la distribution avec une grande facilité (Heragu, 2006). Le mouvement de matériaux se produit partout dans une usine ou un entrepôt, avant, pendant et après le traitement. Le coût du mouvement est estimé entre 5% et 90% du coût global d'une usine avec une moyenne d'environ 25% (Tompkins *et al.*, 2003). Le mouvement du produit n'augmente généralement pas sa valeur ajoutée dans le processus de fabrication. Toutefois, cette étape est nécessaire pour fabriquer un produit. (Heragu, 2008).

Plusieurs types de dispositifs de manutention sont disponibles pour les entreprises de production. Ces entreprises ont besoin d'examiner un certain nombre de facteurs, notamment la taille, le volume des charges, la forme, le poids, le coût et la vitesse. Il existe plusieurs types de dispositifs de manutention (Heragu, 2006) : les convoyeurs, les palettiseurs, les camions, les robots, les véhicules autoguidés (AGV), les engins de levage, les grues et les bras ainsi que les systèmes automatisés de stockage/déstockage (AS/RS). (Heragu, 2008)

Différents types de systèmes de stockage ont été conçus pour stocker des charges de différentes tailles et formes. L'un des plus simples systèmes de stockage est l'empilement de bloc (stockage en masse ou rayonnage, block stacking), où les charges (qui peuvent ou non être palettisées) sont simplement empilées l'une sur l'autre sans structure d'appui distincte. Tandis que l'empilement de bloc est peu coûteux et permet un stockage dense (c.-à-d., peu ou pas d'espace perdu à cause de l'aire entre les charges), son utilisation est limitée dans la pratique parce que certains types de charges ne peuvent être empilés sans écraser ou endommager les charges à la base. L'accès aux charges individuelles (par exemple, la sélection de charge) est

très limité. En fait, les charges doivent être enlevées à partir d'une pile, en commençant par la charge du haut. Cela conduit à la rotation des stocks last-in-first-out (LIFO) qui n'est pas souhaitable pour les systèmes avec de nombreux rangements.

Les systèmes automatisés de stockage/déstockage sont une technologie importante pour l'amélioration des flux de matières et du contrôle dans les usines et les entrepôts. Ils permettent une grande précision, de la gestion des stocks en temps réel, de la tenue précise du registre de tous les comptes d'article selon l'emplacement de stockage, tout en assurant la sécurité physique quasi-absolue des matériaux. L'AS/RS dégage de grandes quantités d'espace au sol, permettant des agrandissements importants en volume de production sans avoir besoin de construire de nouveaux bâtiments. La densité élevée de l'espace de stockage de l'AS/RS permet aux stations de travail ou aux processus automatiques d'être situés plus près de leur stock de sécurité et ainsi de diminuer les distances de transport des articles en cours de production et donc de réduire le temps de cycle.

Entre 1994 et 2004, il y a eu une augmentation significative du nombre d'AS/RS utilisés dans l'environnement industriel aux Etats-Unis (Roodbergen & Vis, 2009). Pendant les dernières décennies plusieurs types d'AS/RS ont été développés pour traiter le nombre croissant de références différentes de produits à stocker. Différents types d'AS/RS existent et se différencient par leur poids, leur taille et le volume de charges stockables : l'AS/RS à charge unitaire, à mini charge, à étagère profonde, à rack glissant, à multi-allées et à convoyeurs gravitationnels en sont des exemples (Bozer & White, 1984), (Sari et al. 2005).

L'AS/RS à charge unitaire constituant le modèle générique des autres AS/RS est le système le plus étudié. Ce type de système est composé de rack où sont stockés/déstockés des produits à charge unitaire dans des casiers accessibles à chaque allée. En revanche, l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels possède un rack profond où les produits sont stockés en profondeur dans des casiers de plusieurs emplacements. Une machine de stockage introduit les produits sur une face du rack tandis qu'une machine de déstockage les récupère de l'autre face. De ce fait, les opérations de stockage et déstockage sont indépendantes. Cette différence fondamentale entre les deux AS/RS due au stockage en profondeur induit une grande difficulté d'étude et de commande.

De très nombreux travaux existent dans la littérature utilisée comme base ou référence pour la recherche. Toutefois, il n'y a pas beaucoup de littérature qui parle des systèmes AS/R à convoyeurs gravitationnels. De ce fait nous nous sommes intéressés à ce système et nous y avons consacré notre étude.

Les politiques de stockage sont des procédés qui déterminent les méthodes de stockage effectuées dans un AS/RS. En règle générale, le fonctionnement de l'AS/RS est régi par un ensemble cohérent de politiques de contrôle tels qu'elles prennent en charge un sous-ensemble spécifique des activités. Une politique de stockage sert à déterminer les endroits où sont assignés les articles. Etant donné les demandes du client ou de la production, le problème consiste à déterminer les emplacements de produits à déstocker afin de les satisfaire en un temps minimum. Ainsi, le choix de la politique de stockage des articles est très important. Il existe cinq principales politiques de stockage présentes dans la littérature : le stockage dédié, le stockage aléatoire, le stockage au plus proche voisin, le stockage full-turnover et le stockage par classe.

Le système automatisé de stockage/déstockage à convoyeurs gravitationnels est constitué d'un ensemble de casiers profonds dont les supports sont des convoyeurs gravitationnels. Deux machines S/R se trouvent aux deux extrémités, l'une sur une face assure le stockage et l'autre sur l'autre face assure le déstockage. Les deux machines sont reliées entre elles par un convoyeur de restockage incliné en sens inverse permettant à la machine de stockage d'accéder aux produits pour les restocker. Ils permettent, de par leur conception, de minimiser l'espace utilisé par la suppression des allées entre étagères. Par contre, leur temps de cycle reste moyen et est dans la plupart des cas plus long que celui d'un AS/RS à charge unitaire.

L'une des solutions pour minimiser le temps de cycle est d'utiliser une heuristique de stockage/déstockage (Sari, 2003) et (Gaouar et al, 2005, 2006). L'heuristique a permis une grande amélioration du temps de cycle de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel. Ainsi, ses performances globales sont devenues supérieures à celles de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel utilisant le stockage aléatoire.

L'autre solution est le stockage aléatoire par classe. Ce type de stockage s'attaque au temps de cycle. Il permet une réduction du temps qui peut atteindre 40% (Askin, 1993), sachant que les produits dans un AS/RS ne restent pas stockés la même durée. Les produits qui restent stockés peu de temps sont placés près de la station de livraison et les produits qui restent plus longtemps sont placés loin de la station. Ainsi, le rendement du système peut être grandement amélioré.

L'objectif de cette thèse est d'étudier l'AS/RS à convoyeur gravitationnel, plus précisément le temps moyen de déstockage. Nous avons divisé ce travail en deux parties.

La première partie (A) est un état de l'art sur les systèmes de stockage/déstockage et le stockage aléatoire par classe. Elle est constituée de quatre

chapitres. Le premier chapitre représente une introduction aux systèmes automatisés de stockage/déstockage (AS/RS), où nous présentons les différents aspects des AS/RS, de leur fonctionnalité, de leurs composants, des différents types d'AS/RS existants. Dans le deuxième chapitre, une description détaillée du système AS/RS à convoyeur gravitationnel est donnée, de ses composants à son fonctionnement, ainsi que la modélisation des temps de transport des machines de stockage et de déstockage de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel et l'analyse des taux de fonctionnement des machines S/R du système AS/R à convoyeur gravitationnel.

Avant d'entamer le sujet de notre travail, dans le troisième chapitre, nous faisons un résumé des travaux établis par différents chercheurs sur les systèmes AS/R afin d'améliorer leurs performances. En chapitre 4, nous abordons un état de l'art sur le stockage par classe.

La deuxième partie (B), représente le cœur de notre travail. Elle est constituée de quatre chapitres. Dans le chapitre 5, nous allons modéliser les temps moyens de stockage et de déstockage par classe d'un système automatisé de stockage/déstockage à convoyeur gravitationnel. Deux modèles sont développés. Le premier modèle que nous proposons est un modèle analytique basé sur la moyenne de tous les temps de transport entre les casiers et les stations de dépôt/livraison et le convoyeur de restockage. Le second est la modélisation par simulation.

Dans les chapitres qui suivent, nous allons implémenter les différentes méthodes de stockage citées dans les chapitres précédents dans un programme de simulation, en utilisant le logiciel de simulation des systèmes de production Arena/SIMAN. La structure d'Arena fournit une grande flexibilité et facilité d'utilisation pour un chercheur. Par la suite, les chapitres qui suivent traitent les points suivants :

- L'impact du stockage par classe sur les performances de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel ;
- L'impact des positions des stations de dépôt/livraison et du convoyeur de restockage sur les temps de transport d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel ;
- L'adaptation de l'heuristique de stockage/déstockage au stockage par classe.

L'interprétation des résultats obtenus de chaque simulation est donnée dans chaque chapitre. Une comparaison va être faite entre les performances d'un stockage/déstockage purement aléatoire, les performances de l'heuristique de stockage/déstockage et les performances d'un stockage/déstockage par classe pour l'AS/RS à convoyeur gravitationnel, par rapport au temps moyen de déstockage. Ainsi, une conclusion de cette étude est présentée à la fin de cette thèse.

Partie A

Etat de la question sur la politique des
systèmes AS/R

Chapitre 1

Les Systèmes Automatisé de Stockage/Déstockage

| | |
|--|----|
| <i>1.1. Introduction</i> | 6 |
| <i>1.2. Système automatisé de stockage/déstockage, AS/RS</i> | 7 |
| <i>1.3. AS/RS, Composants et Terminologie</i> | 9 |
| <i>1.4. Types d'AS/RS</i> | 11 |
| <i>1.5. Conception d'un AS/RS</i> | 17 |
| <i>1.6. Méthodes de stockage</i> | 17 |
| <i>1.7. Conclusion</i> | 19 |
| <i>1.8. Références Bibliographiques</i> | 19 |

1.1. Introduction

Les systèmes automatisés de stockage/déstockage sont une technologie importante pour l'amélioration des flux de matières et du contrôle dans les usines et les entrepôts. Ils permettent une grande précision, de la gestion des stocks en temps réel, la tenue précise du registre de tous les comptes d'article selon l'emplacement de stockage, tout en assurant la sécurité physique quasi-absolue des matériaux. L'AS/RS dégage de grandes quantités d'espace au sol, permettant des agrandissements importants en volume de production sans avoir besoin de construire de nouveaux bâtiments. La densité élevée de l'espace de stockage de l'AS/RS permet aux stations de travail ou aux processus automatiques d'être situés plus près de leur stock de sécurité et ainsi, diminuer les distances de transport en cours et le temps de cycle.

La grande précision, la sécurité et la densité de l'AS/RS permettent souvent des opérations à «juste à temps», car elles garantissent une distribution fiable et rapide

de tous les articles de l'inventaire à son point d'utilisation. Les AS/RS sont facilement liés aux postes de travail manuel, aux cellules ou aux processus automatiques par des convoyeurs, des chariots élévateurs, des véhicules autoguidés ou des navettes. Leurs systèmes de commande par ordinateur sont généralement directement liés aux systèmes informatiques des entreprises qui gèrent la production, le traitement des commandes et la distribution – l'amélioration de l'efficacité de ces systèmes en leur fournissant une connaissance précise en temps réel des stocks en main.

Dans ce chapitre, nous présentons à la section 1.2 la définition, les avantages et les inconvénients des systèmes automatisés de stockage/déstockage. À la section 1.3 nous parlerons des composants et des terminologies des AS/RS. Ensuite, à la section 1.4 nous définirons les différents types d'AS/RS. La section 1.5 sera consacrée à la conception des AS/RS et la section 1.6 aux différentes méthodes de stockage.

1.2. Système automatisé de stockage/déstockage, AS/RS

Material Handling Institute (MHI, 1977) a défini un système automatisé de stockage/déstockage (Automated Storage/Retrieval System, AS/RS) comme : *Une combinaison d'équipements et de systèmes de contrôle qui prend en charge, stocke et déstocke des produits avec précision, exactitude et célérité sous un certain degré d'automatisation.*

En effet, les systèmes automatisés de stockage/déstockage (AS/RS) ont pour fonction de recevoir, identifier, classer, mettre en stock, déstocker, emballer, emmagasiner les produits en cours de production, la matière première, les produits finis, les pièces détachées, les palettes, les supports, les outils, les produits à retravailler... Leur complexité s'étend des systèmes d'un mécanisme relativement petit qui est commandé manuellement, aux très grands systèmes commandés par ordinateur qui sont entièrement intégrés aux autres opérations d'usine et d'entrepôt.

L'utilisation des AS/RS dans un système de production a un certain nombre d'avantages telles qu'augmenter la capacité de stockage, contrôler l'inventaire en temps réel, augmenter la sécurité dans les zones industrielles, la flexibilité de l'interface avec les autres composantes du système de production (les systèmes de transport, de contrôle, ...etc.), répondre rapidement aux demandes (produit, support, palette ...etc.) au moment souhaité.

Selon Bastian Material Handling (BMH) (Bozer, 2007), les AS/RS ont les avantages suivants :

- Apporter du matériel à l'opérateur en un temps minimal, en réduisant les temps d'attente et de parcours de la machine et les temps de la recherche des produits.
- Réduire l'inventaire des en cours : Il y a une meilleure précision de l'inventaire et une meilleure réactivité, entraînant une réduction ou l'élimination des stocks de sécurité dans l'inventaire global. Cela a pour effet net la réduction des stocks.
- Augmenter considérablement la productivité des opérateurs.
- Fournir un contrôle d'inventaire en temps réel avec des rapports instantanés. Avec près de 100% d'exactitude et des informations en temps réel sur l'inventaire sur place, des engagements réalisables peuvent être faites au client.
- Améliorer la qualité des produits et la productivité. Informations en temps réel, une réponse plus rapide à un besoin, la protection physique et la traçabilité du matériel d'accès contribuent à un meilleur processus où le temps peut être consacré à l'amélioration de la qualité du processus.

Et selon le site Web ASAP Automation (ASAP Automation) et (Bozer, 2007), les avantages de l'AS/RS sont les suivants :

- Amélioration spectaculaire de l'efficacité des opérateurs et la capacité de stockage.
- Réduction de l'inventaire des en cours.
- Améliorations de la qualité et des performances en juste-à-temps.
- Aptitude à fabriquer sur commande en plus une production sur stocks.
- Contrôle des stocks en temps réel et rapports de fonctionnalité instantané.

Zollinger (Zollinger, 1999) nous rappelle que l'AS/RS a d'autres avantages subtiles tels que :

- Plus de capacité que le contrôle de l'inventaire standard.
- La machine S/R ne prend pas de pause.
- Le temps de formation (d'instruction) réduit (training time).
- La sécurité supérieure de l'inventaire
- Moins d'endommagement du produit

Malgré les intérêts qu'offrent les systèmes AS/R, ils présentent quelques inconvénients dont les plus importants sont :

- Les AS/RS, une fois installés sont très difficiles à modifier bien que la capacité de l'AS/RS puisse être modifiée en faisant varier le nombre d'heures de fonctionnement en un jour, une fois qu'un système est installé avec un nombre fixe d'allées et de nombre fixe de machines S/R, la capacité variable en faisant varier le nombre de conducteurs de camion dans le système (comme on le ferait

avec un système manuel) n'est plus une option. Bien sûr, on peut varier le nombre d'allées actives et inactives dans un AS/RS. Mais une allée inactive est une capacité inutilisée qui vient à un coût élevé.

- L'investissement initial est très élevé. Par exemple, pour un AS/RS de 10000 casiers, 5 machines S/R et un convoyeur de 60 m, l'investissement varie entre 2 et 3 millions de Dollars US (Harnischfeger, 1981)

1.3. AS/RS, Composants et Terminologie

Tous les systèmes automatisés de stockage/déstockage se composent de certains blocs fonctionnels de base utilisés pour presque toutes les catégories AS/RS décrites par la suite. Ces composants sont :

1. Structure de stockage ;
2. Machine de stockage/déstockage (machine S/R) ;
3. Stations de dépôt/livraison ;
4. Modules de stockage (par exemple, charges unitaires de palettes) ;
5. Système de contrôle.

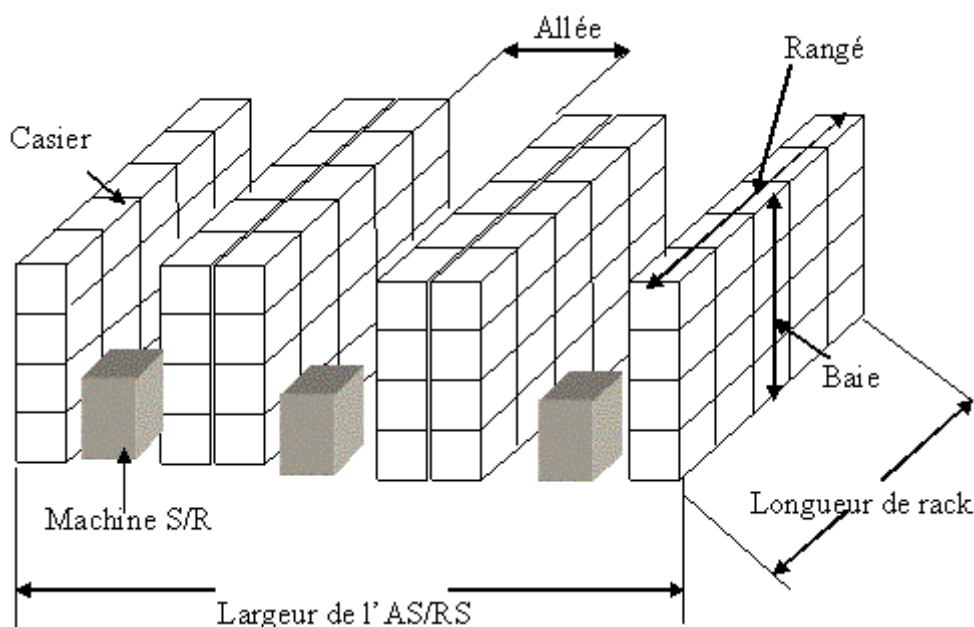


Figure 1.1 : Structure d'un système AS/R (AS/RS à charge unitaire).

1.3.1. Structure de stockage

La structure de stockage est le cadre fabriqué en acier qui soutient les charges contenues dans l'AS/RS. La structure doit posséder la force et la rigidité suffisantes pour qu'elle ne fléchisse pas aux poids des charges ou aux autres forces appliquées

sur le cadre. Les différents compartiments de stockage dans la structure doivent être conçus pour accepter et pour tenir les modules de stockage utilisés pour contenir les matériaux stockés. Les terminologies utilisées sont les suivantes :

Casier : Le casier est l'unité de stockage de base. C'est l'espace tridimensionnel nécessaire au stockage d'une charge unique ou d'un ensemble de charges.

Baie : C'est la colonne formée de l'ensemble de casiers allant du sol au plafond.

Rangée : C'est l'ensemble de casiers formés par des baies placées les unes à la suite des autres.

Etagère : C'est la structure formant une rangée.

Allée : L'allée est l'espace entre deux rangées où circule la machine de stockage/déstockage.

1.3.2. La machine de stockage/déstockage (machine S/R)

La machine de stockage/déstockage (*Storage/Retrieval machine, S/R machine*) est une structure mobile servant à stocker/déstocker les produits. C'est en général un portique en forme de rectangle creux, les côtés horizontaux glissent sur des rails fixées le long des allées (l'un au sol, l'autre au plafond). Tandis que sur les côtés verticaux coulissent un plateau glissant à deux degrés de liberté (linéaires, vertical et horizontal perpendiculaire à l'allée) permettant de charger et décharger les palettes.

Pour accomplir les mouvements désirés de la machine S/R, trois commandes sont exigées : horizontale, verticale, et navette. Sa vitesse horizontale est d'environ 152m/mn (500pieds/mn) le long de l'allée et sa vitesse verticale ou d'ascenseur est d'environ 30m/mn (100pieds/mn) (Groover, 1987). Ces vitesses déterminent le temps requis par le plateau pour transporter de la station de (P/D) à un endroit particulier dans le rack de stockage.

Les machines S/R peuvent avoir des hauteurs de 6m à 40m et supporter des charges de 50kg à 5tonnes (Singh, 1996).

1.3.3. Stations de dépôt/livraison

La station de dépôt/livraison (Pickup/Deposit station, P/D), est aussi appelée station d'entrée/sortie. C'est le point par où transitent tous les produits entrants ou sortants du système. C'est l'interface entre la machine S/R et le système de transport externe à l'AS/RS. Les stations de P/D doivent être conçues de sorte qu'elles soient compatibles avec la navette de la machine S/R et le système de transfert externe. Le transfert des produits du système AS/R aux autres systèmes de production est fait soit manuellement (chargement/déchargement manuel) soit en utilisant les systèmes de transport tels que les AGV et les convoyeurs (convoyeurs à accumulation).

1.3.4. Modules de stockage

Les modules de stockage sont des palettes ou des containers de formes standardisées pouvant être placés dans les casiers, chargés par les machines S/R et déchargés dans les stations de dépôt/livraison. Les containers peuvent être des paniers en fil de fer, des moules d'emballage, des plateaux, des bacs, des boîtes de carton ou plastique, des tiroirs spéciaux... (Kulwiec, 1985)

1.3.5. Système de contrôle

Une hiérarchie de contrôle, semblable à celle des FMS, est employée, avec plus d'un ordinateur en utilisant le contrôle distribué (Nadjid, 1994). Les divers niveaux du contrôle utilisent différents hardware tel que des mini- et des micro-ordinateurs et des contrôleurs programmables. Le logiciel du système de contrôle peut être développé pour intégrer des fonctions telles que la réception, le stockage et le remplissage, l'emballage, et l'expédition.

1.4. Types d'AS/RS

Il existe différents types d'AS/RS. Leur classification est basée sur leurs structures et leurs applications. Nous distinguons :

1. L'AS/RS à charge unitaire ;
2. L'AS/RS à mini charge ;
3. L'AS/RS multi allées ;
4. L'AS/RS à racks glissants (ou racks mobiles) ;
5. L'AS/RS à carrousel ;
6. L'AS/RS à personne embarquée ;
7. L'AS/RS à étagères profondes ;
8. L'AS/RS à convoyeur gravitationnel.

1.4.1. L'AS/RS à charge unitaire

Les premiers systèmes AS/RS à charge unitaire ont été construits à la fin des années 1960 (Bozer, 2007). L'AS/RS à charge unitaire gère généralement une palette ou un container qui pèse normalement 1000livres (453.6kg) ou plus, avec un système de hauteurs allant de 15pieds (4.572m) à plus de 140pieds (42.67m). Tandis que des charges plus légères peuvent être stockées dans ce type de système, l'utilisation du système à charge unitaire est d'abord conduite par la taille de la charge. La plupart des produits manipulés sont de 1000 livres au minimum. (Allerd & Parsley)

Les machines S/R à charge unitaire sont normalement équipées d'une navette qui arrive sous la charge, la prend et la transporte à un casier de stockage ou pour la déposer dans une station de livraison. Alors que la navette peut généralement être considérée comme une table sur laquelle la charge sera transportée, dans certains cas, la navette sera spécialement conçue pour l'interface avec le fond de la charge.

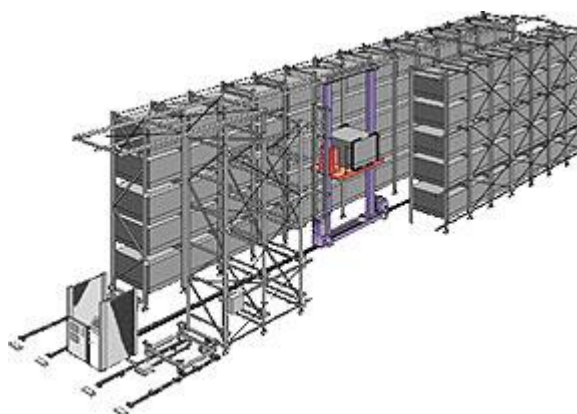


Figure 1.2 : AS/RS à charge unitaire.

1.4.2. L'AS/RS à mini-charge

Les systèmes à mini-charge manipulent des caisses en métal ou en plastique ou des cartons individuels et sont généralement installés dans les bâtiments existants où les systèmes sont de hauteurs allant de 30 pieds (9.144m) à plus de 50 pieds (15.24m). Les capacités en poids pour des charges individuelles sont généralement de 500 livres (226.8kg) ou moins. (Allerd & Parsley, 2004)

Les machines S/R à mini charge peuvent avoir un mécanisme d'extraction qui engage la manipulation de la caisse de stockage, en tirant la caisse de la structure du rack sur la machine S/R. Comme les machines à charge unitaire, elles ont aussi fréquemment des mécanismes de navette qui étendent une plate-forme de levage dans le rack en dessous de la charge et relèvent et ramassent la charge.

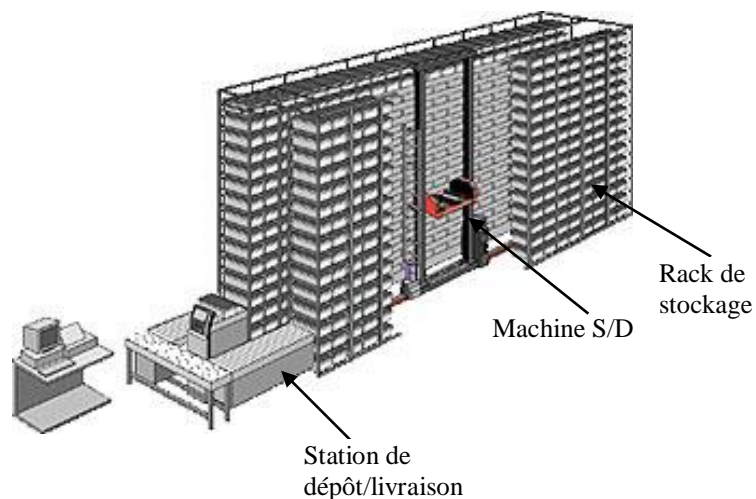


Figure 1.3 : AS/RS à mini charge.

1.4.3. L'AS/RS multi-allées

Les AS/RS multi-allées sont une variation des AS/RS à charge unitaire. Leurs machines S/R capables de circuler sur deux axes horizontaux, peuvent servir plusieurs allées à la fois. Leur topologie est identique à celle des AS/RS à charge unitaire. Toutefois, une allée commune reliant toutes les allées de service est aménagée pour permettre à la machine S/R de circuler.

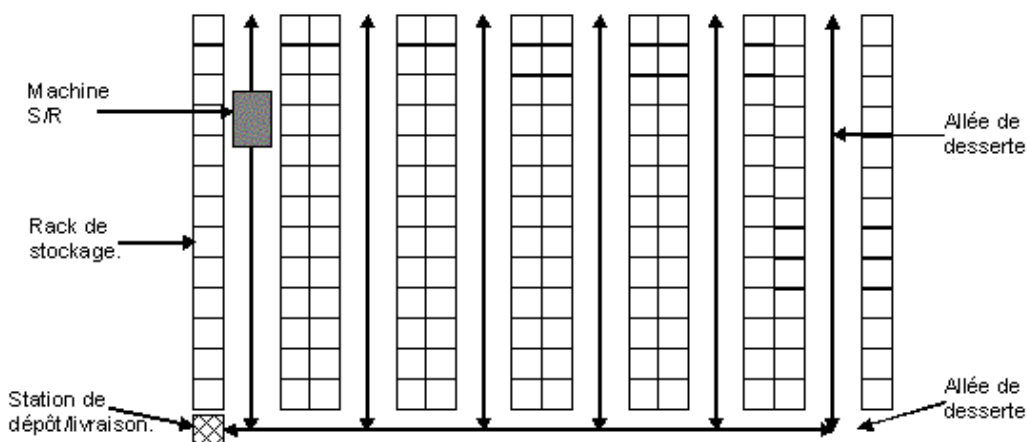


Figure 1.4 : AS/RS multi allées.

1.4.4. L'AS/RS à racks glissants

Les AS/RS à racks glissants (ou racks mobiles (Kulwiec, 1985)) sont une variation des AS/RS multi-allées. La particularité de ces systèmes est que les allées de service n'apparaissent que lorsqu'une opération de stockage ou de déstockage est prévue

dans les racks correspondants. Les racks formant le système glissent latéralement sur des rails de telle sorte que l'on puisse ouvrir une allée entre deux racks mitoyens. Au repos, il existe une seule allée de service, celle-ci pouvant se déplacer entre n'importe quels deux racks mitoyens. Ce n'est pas l'allée qui se déplace mais les racks (Sari, 2003c).

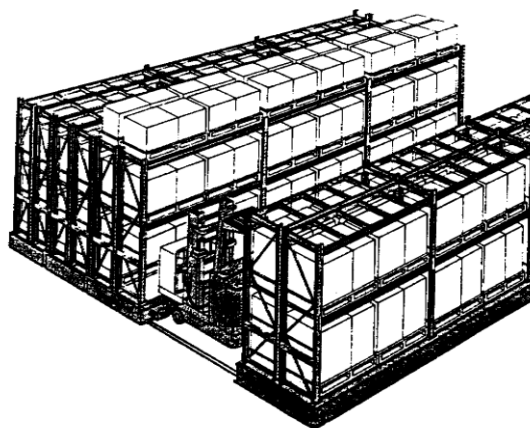


Figure 1.5 : AS/RS à racks glissants.

1.4.5. L'AS/RS à carrousel

Les carrousels sont une bonne alternative aux systèmes à mini charge (Tompkins & White, 1984). Dans ces systèmes, ce sont les casiers qui se déplacent vers l'extrémité du rack ou un opérateur (personne ou robot) stocke/déstocke les produits. Le système consiste en un ensemble de casiers montés en carrousel et se déplaçant horizontalement vers une extrémité du rack où l'opération de stockage/déstockage sera réalisée. (Sari, 2003c)

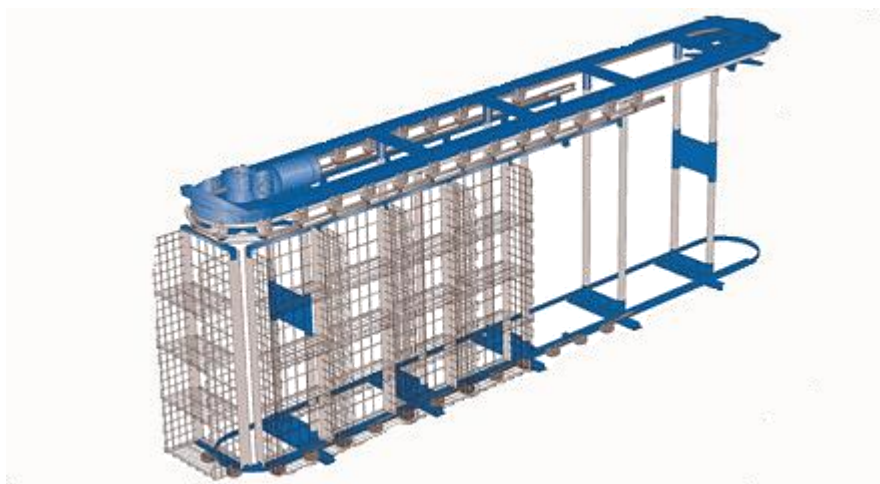


Figure 1.6 : AS/RS à carrousel.

1.4.6. L'AS/RS à personne embarquée

Les AS/RS à personne embarquée sont des systèmes permettant de stocker plusieurs petits produits dans chaque casier. Une personne montée sur une plate-forme mobile, choisit dans chaque casier les produits à déstocker, ainsi qu'elle emmagasine, dans le casier adéquat, les produits à stocker. Ce système permet de stocker/déstocker plusieurs produits en une seule opération. Ce qui permet de réduire les temps de stockage/déstockage. L'opérateur, après les avoir déstocké, charge les produits sur la machine S/R qui les transporte vers la station de dépôt/livraison. La plate-forme, sur laquelle se trouve l'opérateur, peut contenir des systèmes automatiques de levage, pour charger/décharger les produits lourds.

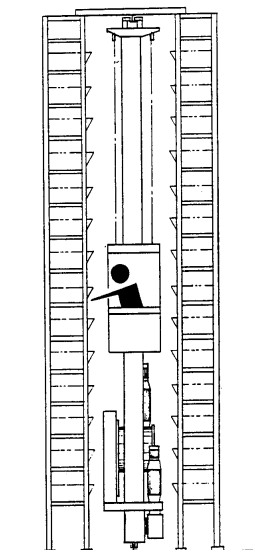


Figure 1.7 : AS/RS à personne embarquée.

1.4.7. L'AS/RS à étagères profondes

Les AS/RS à étagères profondes est une variation de l'AS/RS à charge unitaire. La différence est que, dans les AS/RS à étagère profonde, plusieurs charges unitaires peuvent être stockées dans le même casier l'une derrière l'autre. Jusqu'à 10 charges peuvent être ainsi stockées dans le même casier, et donc, possédant la même adresse. Ceci permet une grande densité de stockage et une utilisation de l'espace maximum. Au niveau de chaque casier, les produits peuvent se déplacer horizontalement. Ils sont stockés d'un côté du casier et déstockés de l'autre côté. Ce déplacement est possible grâce à un plateau mobile qui se déplace de la machine S/R à l'entrée du casier. La machine S/R est identique à celle d'un AS/RS à charge unitaire avec en plus des fonctions spécifiques pour lui permettre le contrôle des plateaux mobiles.

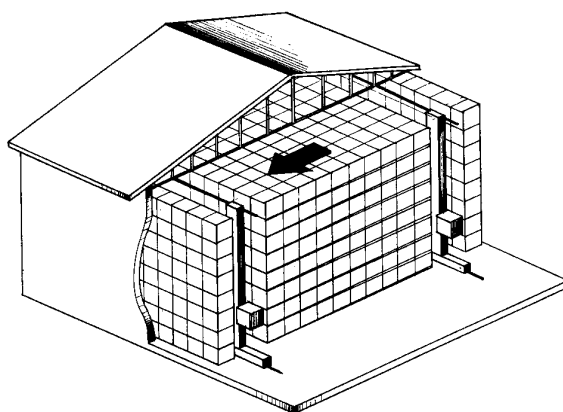


Figure 1.8 : AS/RS à étagères profondes.

1.4.8. L'AS/RS à convoyeur gravitationnel

Ce système est une variation des AS/RS à étagères profondes. Il est constitué d'un ensemble de casiers profonds dont les supports sont des convoyeurs gravitationnels. Deux machines S/R se trouvent aux deux extrémités : l'une sur une face assure le stockage et l'autre sur l'autre face assure le déstockage. Les deux machines sont reliées entre elles par un convoyeur de restockage incliné en sens inverse permettant à la machine de stockage d'accéder aux produits pour les restocker. Une description plus détaillée de ce système sera présentée au chapitre 2.

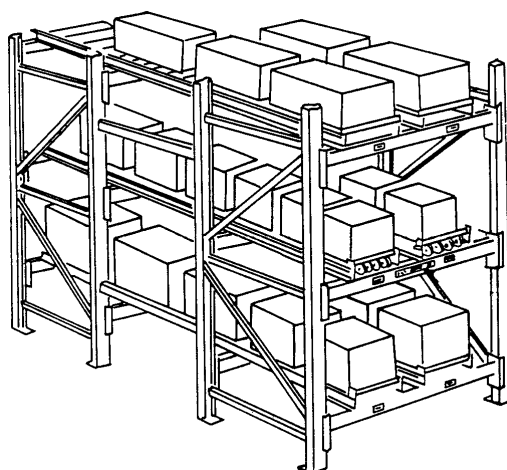


Figure 1.9 : AS/RS à convoyeur gravitationnel.

1.5. Conception d'un AS/RS

Pour la conception d'un AS/RS, un certain nombre de paramètres doivent être pris en compte. Ces paramètres dépendent de l'utilisation de l'AS/RS. Le Material Handling System Institute (MHI, 1977) ainsi que Bozer & White (1980) dressent une liste de ces paramètres. Nous présentons, ici, les plus importants :

- Dimensions de la charge : largeur, hauteur, profondeur, poids,
- Dimensions du casier : largeur, hauteur, profondeur,
- Nombre total de casiers
- Structure de l'étagère : charge utile, charge admissible,...
- Rendement : le nombre de stockage/déstockage par unité de temps
- Nombre de machines S/R, d'allées, d'étagères,...
- Durée de cycle : cycle simple, cycle double, cycle multi-adresses,...
- Taux d'utilisation des machines.

En concevant un AS/RS, deux principes fondamentaux doivent être considérés (White & Kinney, 1982). Le premier est l'utilisation d'un facteur de sécurité de 85%. C'est-à-dire que l'AS/RS doit fonctionner, au maximum, à 85% de ses capacités maximales. Le second est qu'il n'existe pas de règles générales pour la conception d'un AS/RS. Il faut considérer chaque cas comme un problème unique.

1.6. Méthodes de stockage

Dans cette section nous considérons le problème d'assigner les charges entrantes aux endroits appropriés de stockage, afin de réduire leurs rotations, de l'entrée de la charge au système à sa sortie.

Trois méthodes de stockage sont considérées : Le stockage dédié où chaque type de produit a son propre secteur de stockage, le stockage aléatoire ouvert où chaque produit est assigné à un casier de manière aléatoire et le stockage aléatoire par classe où les produits sont divisés généralement en trois classes suivant leur temps et fréquence de stockage.

1.6.1. Stockage dédié

Dans le stockage dédié, l'espace de stockage est partagé en blocs où chacun est utilisé pour stocker un produit déterminé. Cette méthode de stockage présente des avantages et des inconvénients. Les principaux avantages sont :

- Chaque produit ayant une aire de stockage prédéterminée, le contrôle du système est grandement simplifié.

- La gestion des stocks est simplifiée : la quantité de chaque produit peut être contrôlée visuellement.
- Chaque aire de stockage peut être conçue pour le stockage du produit correspondant (casiers de taille variables, allées plus ou moins larges,...).

Les principaux inconvénients sont :

- L'espace de stockage est augmenté parce qu'il faut donner suffisamment d'espace pour les stocks maximum de chaque produit. La somme des stocks maximum de chaque produit étant supérieure au stock maximum de tous les produits. Puisque les stocks maxima pour chaque produit sont de l'ordre du double des stocks moyens, le taux de remplissage du système de stockage sera relativement bas.
- Le système est difficilement modifiable : l'ajout de nouveaux produits non prévus à l'origine est très complexe.

1.6.2. Stockage aléatoire ouvert

Contrairement au stockage dédié, dans le stockage aléatoire, n'importe quel produit peut être stocké dans n'importe quel casier. Un système de contrôle élaboré garde en mémoire les adresses de chaque type de produit. Le stockage aléatoire a pour principal avantage d'utiliser beaucoup moins d'espace que le stockage dédié. L'espace total de stockage devant être équivalent au stock maximum de tous les produits. Ceci permet une réduction importante d'espace. Askin & Standridge (1993) présentent un exemple de stockage aléatoire où le gain d'espace par rapport au stockage dédié est de l'ordre de 40%. Cependant, les systèmes de stockages aléatoires nécessitent un contrôle très élaboré.

1.6.3. Stockage aléatoire par classe

Ce type de stockage s'attaque au temps de cycle. Il permet une réduction du temps qui peut atteindre 40% (Askin & Standridge, 1993). Les produits dans un AS/RS ne restent pas stocker la même durée. Les produits qui restent stockés peu de temps sont placés près de la station de livraison et les produits qui restent plus longtemps sont placés loin de la station. Le rendement du système peut être grandement amélioré. Le stockage par classe subdivise les casiers en classes par rapport à leurs distances du point de livraison, les casiers les plus proches formant la première classe, les plus éloignés formant la dernière. Les produits à stocker sont aussi classés suivant le temps qu'ils vont passer dans le système. Ceux qui restent le moins longtemps seront stockés dans la première classe et ceux qui restent le plus longtemps dans la dernière. Une description plus détaillée de cette méthode sera présentée au chapitre 4.

1.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés au système automatisé de stockage/déstockage, nous avons traité les différents aspects de ce système, de la composition à l'utilisation. Nous avons parlé des différents types d'AS/RS ainsi que du fonctionnement à la conception.

Les AS/RS ont sollicité beaucoup d'intérêt grâce à leurs avantages. Ces systèmes ont permis une meilleure gestion des stocks en minimisant les temps d'accès, en augmentant la sécurité et en permettant une gestion d'inventaire en temps réel.

De très nombreux travaux subsistent et chaque chercheur ou auteur les utilise comme base ou référence pour leur recherche. Néanmoins, il y a des AS/RS qui ne sont pas beaucoup étudiés dans la littérature tels que les AS/RS à convoyeur gravitationnel. C'est pour cela que nous nous sommes intéressés à ce système et que nous y avons consacré notre étude.

1.8. Références Bibliographiques

ASAP Automation; récupéré sur

<http://www.asapauto.com/solutions/automationtechnologies/AS-RS/default.asp>

BMH, *Bastian Material Handling*; récupéré sur <http://www.bastiansolutions.com/>

Allred, J. K., & Parsley, S. L., (2004). Automated Storage/Retrieval Systems. *In The Supply Chain Handbook*, James A. Tompkins, Dale Harmelink, *Tompkins Press*, pp. 279-293,

Askin, R. G. & Standridge, C. R., (1993). Modelling and Analysis of Manufacturing Systems, *John Wiley & Sons*, Ed.

Bozer, Y. A. & White, J. A., (1980). Optimum designs of automated storage/retrieval systems. TIMS/ORSA Joint National Meeting, Washington, DC.

Bozer, Y. A. (2007). Performance Analysis of Unit-Load Automated Storage/Retrieval Systems. *In Facility Logistics*, M. Lahmar, *Taylor & Francis* (Eds.), (pp. 173-197). Auerbach Publications.

Groover, M.P., (1987). Automation production systems and computer integrated manufacturing. Prentice hall, Englewood Cliffs, pp 404-416.

Harnischfeger, (1981). 9 Simple Steps to Determine the layout, Design and Estimated Cost of an Automated Storage/Retrieval System. Milwaukee: Harnischfeger Corp., pub. 5M-181.

Heragu, S. S., (2006). Facilities Design, 2nd Edition, iUniverse, Lincoln, NE.

- Heragu, S. S., (2008). Material Handling System. *In Introduction to LOGISTICS ENGINEERING*, G. Don Taylor, *Taylor & Francis Group* (Eds.), New York
- Kulwiec, R. A., (1985). Material Handling Handbook, *John Wiley & Sons*, Second Edition.
- MHI, (1977). Considerations for planning and installing an automated storage/retrieval systems, *Material Handling Institute, Inc.*, AS/RS Document-100 7M.
- Nadjid, N. M. (1994). *Contribution au Pilotage Dynamique et en Ligne d'une Cellule Flexible d'Usinage*. Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes.
- Sari, Z., (2003). *Modélisation, Analyse et Evaluation des Performances d'un AS/RS à Convoyeur Gravitationnel*, Thèse de Doctorat d'état, LAT, Université de Tlemcen.
- Singh, N., (1996). Systems Approach to Computer-Integrated Design and Manufacturing, *John Wiley & Sons, Inc.*
- Tompkins, J. A., & White, J. A., (1984). Facilities Planing. *John Wiley & Sons, Inc.*, New York.
- Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., and Frazeller, E. H., (2003). Facilities Planning, 3rd Edition, Wiley, New York.
- White, J. A. & Kinney, H. D., (1982). Storage and warehousing. *In Handbook of Industrial Engineering*, G. Salvendy ed., *John Wiley & Sons*, New York.
- Zollinger, H, (1999). AS/RS application, benefits and justification in comparison to other storage methods: A white paper, *Zollinger Associates, Inc.*,.

Chapitre 2

L'AS/RS à convoyeurs gravitationnels, Modélisation du temps moyen de déstockage

| | |
|--|----|
| <i>2.1.Introduction</i> | 21 |
| <i>2.2.Système AS/R à Convoyeurs Gravitationnels, AS/RS à CG</i> | 22 |
| <i>2.3.Modélisation des temps de cycle d'un AS/RS à Convoyeur Gravitationnel</i> | 26 |
| <i>2.4.Heuristique de stockage/déstockage</i> | 28 |
| <i>2.5.Conclusion</i> | 31 |
| <i>2.6.Références Bibliographiques</i> | 31 |

2.1. Introduction

Les AS/RS ont sollicité beaucoup d'intérêt et d'attention de la communauté scientifique et des industriels à cause de leurs importances dans le domaine de l'industrie et dans les systèmes de production. Ils ont permis une meilleure gestion des stocks en minimisant les temps d'accès, en augmentant la sécurité et en permettant une gestion d'inventaire en temps réel.

L'AS/RS à charge unitaire constituant le modèle générique des autres AS/RS est le système le plus étudié. Ce type de système est composé de rack où sont stockés/déstockés des produits à charge unitaire dans des casiers accessibles à chaque allée. En revanche, l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels possède un rack profond où les produits sont stockés en profondeur dans des casiers de plusieurs emplacements. Une machine de stockage introduit les produits sur une face du rack, tandis qu'une machine de déstockage les récupère de l'autre face. De ce fait les opérations de stockage et déstockage sont indépendantes. Cette différence

fondamentale entre les deux AS/RS due au stockage en profondeur induit une grande difficulté d'étude et de commande.

De très nombreux travaux existent dans la littérature utilisée comme base ou référence pour la recherche. Toutefois, il n'y a pas beaucoup de littérature qui parle de systèmes AS/R à convoyeurs gravitationnels. De ce fait, nous nous sommes intéressés à ce système et nous y avons consacré notre étude.

Dans ce chapitre, nous commencerons par présenter une description du système AS/R à convoyeurs gravitationnels, de ses composants à son fonctionnement, à la section 2.2. Ensuite, dans la section 2.3 nous passons à la modélisation du temps de transport des machines S/R en utilisant le stockage aléatoire (Sari, 2003) (Sari *et al.* 2005), (Sari *et al.* 2007). Et finalement, dans la section 2.4, nous parlerons de l'heuristique de stockage/déstockage, développée par (Sari, 2003), implémentée et modélisée par (Gaouar, 2004) (Gaouar *et al.*, 2005, 2006) pour minimiser le temps moyen de déstockage pour le système AS/R à convoyeurs gravitationnels.

2.2. Système AS/R à Convoyeurs Gravitationnels, AS/RS à CG

2.2.1. Notations

Avant d'entamer notre étude, nous allons définir les différents termes que nous utiliserons :

| | |
|--------------------|--|
| $\overline{E(SC)}$ | temps moyen de stockage ; |
| $\overline{E(RC)}$ | temps moyen de déstockage ; |
| $\overline{E(V)}$ | temps moyen de transport en deux points de la face du rack ; |
| L, H, D | longueur, hauteur et profondeur du rack AS/RS à CG ; |
| l, h, d | longueur, hauteur et profondeur d'un emplacement de stockage ; |
| M | nombre d'emplacement dans un casier, nombre de couches dans un rack ; |
| m | numéro de couche ; |
| N_l | nombre de casier pour chaque ligne ; |
| N_h | nombre de casier pour chaque colonne ; |
| t_h | temps de transport horizontal de la station de dépôt/livraison à la colonne la plus éloignée ; |
| t'_h | temps de transport horizontal entre deux casiers mitoyen ; |
| t_v | temps de transport vertical de la station de dépôt/livraison à la ligne la plus éloignée ; |
| t'_v | temps de transport vertical entre deux casiers mitoyen ; |

| | |
|--------|----------------------------|
| b | facteur de forme ; |
| T | facteur de normalisation ; |
| ρ | taux de charge. |

2.2.2. Description (Sari, 2003)

L'AS/RS à convoyeurs gravitationnels est composé essentiellement de :

- Un rack profond ;
- Deux machines : une machine de stockage (MS) et une machine de déstockage (MD) ;
- Deux stations : une station de dépôt et une station de livraison ;
- Un convoyeur de restockage.

Le rack profond (de hauteur H , largeur L et profondeur D) regroupe un ensemble de casiers et chaque casier contient M emplacements pouvant contenir plusieurs produits placés les uns à la suite des autres. Les emplacements sont disposés en matrice multicouche composée de N_l casiers horizontaux, N_h casiers verticaux et M couches numérotées de 0 (face de déstockage) à $M-1$ (face de stockage). Chaque casier est muni d'un convoyeur gravitationnel incliné de façon à permettre le glissement des produits d'un bout à l'autre du casier, donc d'une face à l'autre du rack. Les produits sont stockés d'un côté du rack (face de stockage) par la machine de stockage (MS). Ils glissent sur les convoyeurs gravitationnels et ils sont déstockés de l'autre côté du rack (face de déstockage) par la machine de déstockage (MD).

Les machines de stockage et de déstockage peuvent se déplacer simultanément sur deux axes. Ces deux axes forment le plan x-y parallèle aux deux faces du rack. Les machines de stockage/déstockage possèdent la même vitesse horizontale V_h , et la même vitesse verticale V_v . Par conséquent, les temps de transport peuvent être calculés comme suit :

- t_h , le temps de déplacement horizontal de la station de dépôt/livraison à la colonne la plus éloignée : $t_h = L/V_h$;
- t_v , le temps de déplacement vertical de la station de dépôt/livraison à la ligne la plus éloignée : $t_v = H/V_v$;
- t'_h , le temps de déplacement horizontal d'un casier au suivant : $t'_h = l/V_h = t_h/N_l$ avec $l = L/N_l$;
- t'_v , le temps de déplacement vertical d'un casier au suivant : $t'_v = h/V_v = t_v/N_h$ avec $h = H/N_h$.

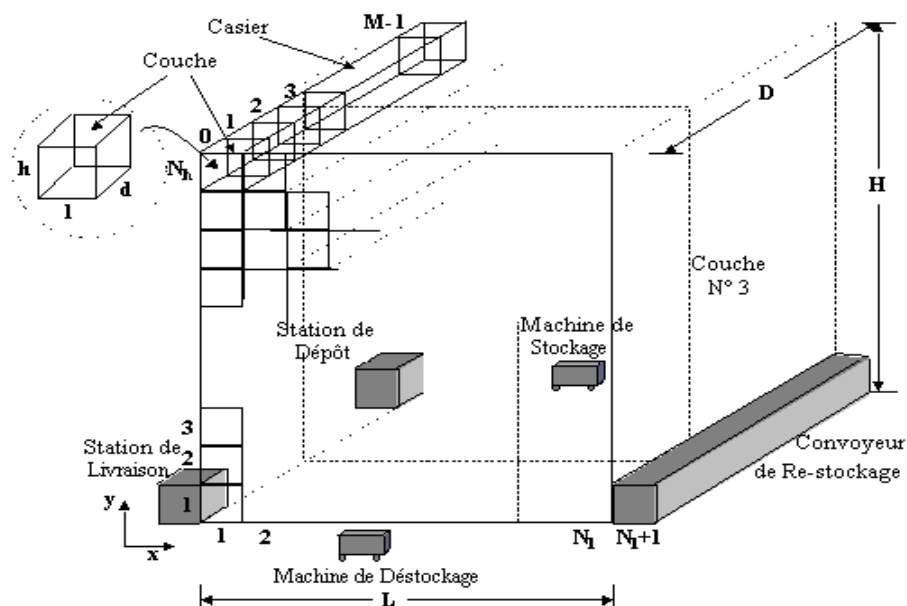


Figure 2.1 : Configuration de l'AS/RS à Convoyeurs Gravitationnels (Sari, 2003)

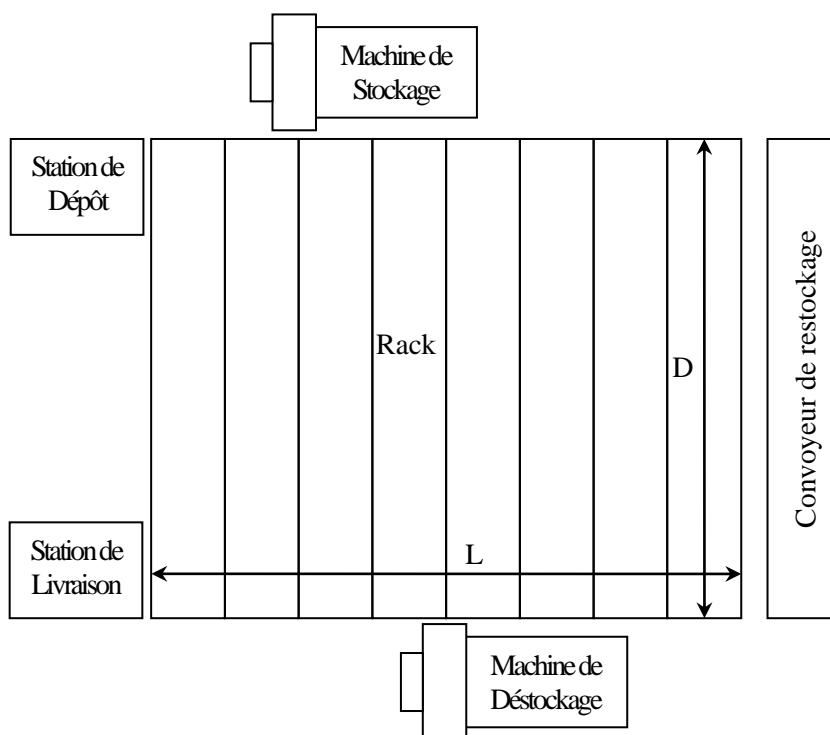


Figure 2.2 : Vue de dessus d'un AS/RS à Convoyeurs Gravitationnels.

La station de dépôt est située sur la face de stockage où la machine de stockage récupère les produits à stocker. La station de livraison est située sur la face de déstockage où la machine de déstockage dépose les produits pour la livraison.

Le convoyeur de re-stockage incliné en sens inverse relie la machine de déstockage à la machine de stockage. Il permet de transférer les produits à restocker vers la station de dépôt.

Les figures 2.1 et 2.2 donnent la structure et la constitution détaillée de l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels.

Ce type d'AS/RS présente plusieurs avantages par rapport aux autres AS/RS (Hachemi, 2008), nous pouvons citer :

- Gestion FIFO (First In First Out) : les produits se déplacent via le convoyeur gravitationnel du côté de chargement vers le côté de déchargement du système. Cette rotation constante du stock est particulièrement bénéfique pour les produits périssables tels que les aliments et les produits pharmaceutiques.
- Réduction des coûts de manutention : du fait de la rotation automatique, exploitant juste la gravitation, il n'y a pas de besoin d'énergie électrique ou d'autres utilités.
- Réduction de l'espace au sol du fait de la suppression des espaces réservés aux allées. Ainsi la capacité de stockage se trouve améliorée pour la même zone de stockage.
- Réduction du temps et du travail : avec uniquement deux allées, l'un pour le chargement et l'autre pour le déchargement, le trafic des deux machines est plus ordonné et efficace améliorant ainsi la productivité.

2.2.3. Fonctionnement du système AS/R à Convoyeur Gravitationnel

Pour stocker un produit, la machine (MS) le récupère au point de dépôt et le dépose dans un casier de la face avant du rack (face de stockage), le produit glisse sur le convoyeur gravitationnel et se positionne dans l'emplacement libre le plus proche de la face arrière du rack (face de déstockage). Chaque emplacement peut stocker un seul produit à la fois placé l'un après l'autre.

Pour le déstockage d'un produit (P) positionné dans l'emplacement m ($m < M$) d'un casier, la machine (MD) déstocke successivement tous les produits qui le précèdent et les dépose au convoyeur de re-stockage où ils seront pris en charge

par la machine (MS) pour le stockage. Enfin la machine (MD) récupère le produit (P) et le dépose au point de livraison.

2.3. Modélisation des temps de cycle d'un AS/RS à Convoyeur Gravitationnel

La modélisation du temps de cycle de la machine de stockage/déstockage (S/R) est devenue l'un des plus importants domaines de la recherche dans l'étude des AS/RS. Bozer et White (Bozer & White, 1984) ont développé des expressions analytiques pour les temps moyens des simples et doubles cycles des AS/RS à charge unitaire. Ces travaux sont devenus une source d'inspiration pour le développement d'autres expressions pour différents types d'AS/RS. Sari *et al.* (Sari Z. , 2003), (Sari *et al.* 2005) ont établi l'expression du temps de cycle moyen d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel.

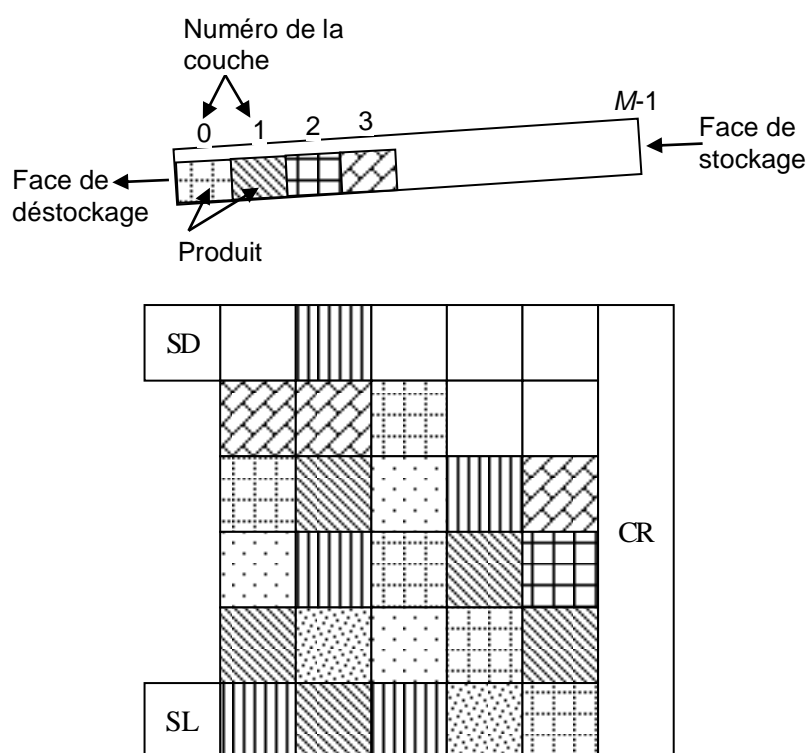


Figure 2.3 : Disposition des produits à l'intérieur des casiers.

Selon la méthode de stockage aléatoire, n'importe quel produit peut être stocké dans n'importe quel casier. De ce fait chaque casier peut contenir plusieurs types de produits stockés. Suivant la disposition des produits à l'intérieur d'un casier (figure 2.3), un produit peut être stocké dans n'importe quel emplacement du rack.

De ce fait, la détermination du temps de cycle pour l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels n'est pas aussi simple que celui de l'AS/RS à charge unitaire.

Afin de déterminer l'expression du temps de cycle moyen d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel, (Sari, 2003) et (Sari *et al.* 2005) ont considéré que la face de stockage ou de déstockage du rack à convoyeurs gravitationnels est similaire à celle d'un rack à charge unitaire. Le comportement de la machine de stockage dans le système AS/RS à convoyeurs gravitationnels est le même que dans le système à charge unitaire. Donc, le temps moyen de stockage reste inchangé.

$$\overline{E(SC)} = T \left(\frac{b^2}{3} + 1 \right) \quad (1)$$

Cependant, l'opération de déstockage pour un AS/RS à convoyeurs gravitationnels se compose de plusieurs séquences afin d'arriver au produit désiré. En effet, la machine de déstockage doit en premier lieu déstocker tous les produits qui le précèdent et les renvoyer vers la machine de stockage à travers le convoyeur de restockage. Le temps moyen de déstockage pour un produit se trouvant dans une couche m peut alors être déterminé comme suit :

$$\overline{E(RC)_m} = \overline{E(V_1)} + \overline{E(V_2)} + m(\overline{E(V_3)} + \overline{E(V_4)}) \quad (2)$$

où

- m : le numéro de la couche où se trouve le produit désiré (avec $0 \leq m \leq M-1$)
- $\overline{E(V_1)}$: le temps moyen de transport entre le point de repos de la machine S/R et le point de déstockage ;
- $\overline{E(V_2)}$: le temps moyen de transport entre le point de déstockage et la station de livraison ;
- $\overline{E(V_3)}$: le temps moyen de transport entre le point de déstockage et le convoyeur de restockage ;
- $\overline{E(V_4)}$: le temps moyen de transport entre le convoyeur de restockage et le point de déstockage.

En se basant sur les travaux de Bozer et White (Bozer & White, 1984) concernant le temps de cycle des AS/RS à charge unitaire, et les travaux de Peters *et al.* (1996) concernant la position du point de repos des machines de stockage/déstockage, Sari *et al.* (2005, 2007) ont développé l'expression du temps moyen de déstockage pour l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels pour un stockage/déstockage purement aléatoire :

$$\overline{E(RC)} = T \left(\frac{b^2}{3} + 1 \right) \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{2} \rho M \right) \quad (3)$$

avec $T = \max(t_h, t_v)$; $b = \min(t_h/T, t_v/T)$.

Le développement de l'expression du temps moyen de déstockage a permis d'évaluer les performances du système et de déterminer son comportement. Les résultats obtenus dans les travaux de Sari (Sari, 2003) (Sari *et al.* 2005, 2007) ont montré qu'en terme d'espace utilisé par rapport à la capacité de stockage, l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels est beaucoup plus performant que l'AS/RS à charge unitaire. Par contre en terme de temps de cycle l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels présente des temps de cycle plus longs. Il est donc nécessaire d'améliorer ces temps pour pouvoir utiliser ce système dans les mêmes applications que l'AS/RS à charge unitaire. De plus, ce type d'AS/RS est utilisé dans l'industrie agroalimentaire où un seul type de produits, ou très peu de produits différents, sont stockés. Les mêmes produits sont stockés dans les casiers et le déstockage se fait suivant la règle FIFO. Cette façon de l'utiliser limite considérablement son champ d'application.

2.4. Heuristique de stockage/déstockage

Dans un stockage purement aléatoire, chaque casier peut contenir plusieurs types de produits (figure 2.3). Pour déstocker un produit demandé qui se trouve dans une couche d'un casier, il faut d'abord déstocker, un à un, les produits qui le précèdent et les déposer au convoyeur de restockage pour être réstockés dans le rack. De ce fait, plus le numéro de la couche est grand plus la machine de déstockage mettra du temps pour déstocker le produit demandé. Ainsi, le temps de déstockage augmente et la satisfaction de la demande sera retardée.

Le temps de déstockage peut être minimisé :

- En réduisant le nombre de produits différents dans le même casier.
- En plaçant les produits identiques dans les mêmes casiers et en sélectionnant les casiers les plus proches de la station de livraison et/ou du point de repos de la machine de déstockage.

Sari (2003) a développé l'heuristique de stockage/déstockage de manière intuitive en se basant sur ces deux idées. Elle est constituée sur un ensemble de règles simples, ayant pour objectif commun de réduire le temps de déstockage. Elle comporte deux procédures, appelées procédure de stockage et procédure de déstockage (Gaouar, 2004) (Gaouar *et al.*, 2005, 2006). Le développement de cette heuristique est basé sur les idées suivantes:

- **Procédure de stockage**

La procédure de stockage comporte trois priorités hiérarchiques et consiste à :

1. Stocker le produit en cours derrière *un produit identique*.

Si un seul casier, Stocker

Si plusieurs casiers,

- a. Stocker dans le casier où il n'y a qu'*un seul type de produits* (identique au produit en cours de stockage).

Si un seul casier, Stocker

Si plusieurs casiers, Stocker dans le casier où il y a *le plus de produit de ce type*.

Si un seul casier, Stocker

Sinon, Stocker dans le casier *le plus proche de la station de livraison*.

Si un seul casier, Stocker

Sinon, Stocker dans le casier *le plus proche du point de repos de la machine de déstockage*.

Sinon,

- b. Stocker dans le casier où il y a *le plus de produits de même type* (identique au produit en cours de stockage).

Si un seul casier, Stocker

Sinon, Stocker dans le casier où il y a *le moins de produits en général*.

Si un seul casier, Stocker

Sinon, Stocker dans le casier *le plus proche de la station de livraison*.

Si un seul casier, Stocker

Sinon, Stocker dans le casier *le plus proche du point de repos de la machine de déstockage*.

Sinon,

2. Stocker dans *un casier vide*.

Si un seul casier, Stocker

Si plusieurs casiers, Stocker dans le casier *le plus proche de la station de livraison*.

Si un seul casier, Stocker

Sinon, Stocker dans le casier *le plus proche du point de repos de la machine de déstockage.*

Sinon,

3. Stocker dans le casier où il y a *le moins de produits.*

Si un seul casier, Stocker

Sinon, Stocker dans le casier où il y a *le moins de types de produits différents.*

Si un seul casier, Stocker

Sinon, Stocker dans le casier *le plus proche de la station de livraison.*

Si un seul casier, Stocker

Sinon, Stocker dans le casier *le plus proche du point de repos de la machine de déstockage.*

▪ **Procédure de déstockage**

Chercher le produit désiré se trouvant dans *la couche la plus proche de l'allée où se trouve la machine de déstockage.*

Si un seul casier, Déstocker

Sinon, Déstocker à partir du casier *le plus proche de la station de déstockage.*

Si un seul casier, Déstocker

Sinon, Déstocker à partir du casier *le plus proche du point de repos de la machine de déstockage.*

L'analyse des résultats des travaux précédents (Gaouar *et al.*, 2005, 2006) ont permis de montrer l'intérêt d'utiliser cette heuristique pour le contrôle de l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels, le temps moyen de déstockage pour un système utilisant l'heuristique est inférieur au temps moyen obtenu pour un stockage aléatoire. Ainsi, si l'on considère par exemple un système ayant 1000 emplacements (10x10x10) et utilisant le stockage aléatoire et ce même système utilisant l'heuristique de stockage/déstockage pour 200 références différentes, le gain de temps de déstockage est en moyenne de 40%.

Toutefois, cette amélioration tend à diminuer au fur et à mesure de l'augmentation du rapport entre le nombre de références présentes dans le rack et le nombre d'emplacements de stockage de ce même rack.

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le système automatisé de stockage/déstockage à convoyeurs gravitationnels avec ses différentes caractéristiques, ainsi que la modélisation du temps de cycle.

Les AS/RS à convoyeurs gravitationnels permettent, de par leur conception, de minimiser l'espace utilisé par la suppression des allées entre étagères. Par contre leur temps moyen de déstockage reste moyen et est dans la plupart des cas plus long que celui d'un AS/RS à charge unitaire. Le temps moyen de déstockage représente l'un des critères de performances le plus important pour les AS/RS, et le plus étudié dans la plupart des recherches.

L'une des solutions qui a été étudiée par (Gaouar *et al.*, 2005, 2006) pour minimiser ce temps est d'utiliser une heuristique de stockage/déstockage. Les résultats obtenus ont montré l'intérêt d'utiliser cette heuristique pour le contrôle de l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels, le temps moyen de déstockage pour un système utilisant l'heuristique est inférieur au temps moyen obtenu pour un stockage aléatoire. Cependant, plus le nombre de références présentes dans le rack augmente par rapport au nombre d'emplacements de stockage de ce même rack, plus le temps moyen de déstockage diminue.

Nous allons étudier dans le chapitre suivant une autre méthode de stockage tel que le stockage par classe afin d'améliorer ce temps. Le stockage par classe est une très bonne alternative entre le stockage dédié et le stockage aléatoire. Il permet d'avoir les avantages de l'un et de l'autre. Ce type de stockage est très étudié dans la littérature. Une adaptation de l'heuristique pour le stockage par classe est envisagée par la suite.

2.6. Références Bibliographiques

- Bozer, Y. A., & White, J. A. (1984). Travel time models for automated storage/retrieval systems. *IIE Transactions*, 16 (4), 329-338.
- Gaouar, N., (2004). *Implementation & Simulation d'une Heuristique de Stockage/Déstockage en vue de réduire le temps de cycle d'un AS/RS à Convoyeur Gravitationnel*. Magister Signaux et Systèmes, LAT, Université de Tlemcen.

- Gaouar, N., Sari, Z., & Ghouali, N. (2005). Développement d'une Heuristique de Stockage/Déstockage pour un Système AS/R à Convoyeur Gravitationnel. *6e Congrès International de Génie Industriel, (GI'2005)*. Besançon Micropolis, France.
- Gaouar, N., Sari, Z., & Ghouali, N. (2006). Modélisation et implémentation d'une Heuristique de Stockage/Déstockage pour un Système AS/R à Convoyeur Gravitationnel. *6ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'06)*. Rabat, Maroc.
- Hachemi, K. (2008, Mai 04). Pilotage dynamique d'un système automatisé de stockage/déstockage à convoyeur gravitationnel. Université de Tlemcen, Algérie: Thèse de Doctorat en Automatique-Productique.
- Peters, B. A., Smith, J. S., & Hale, T. S. (1996). Closed form models for determining the optimal dwell point location in automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research* , 34 (6), 1757-1771.
- Sari, Z. (2003, Décembre 14). Modélisation, Analyse et Evaluation des Performances d'un AS/RS à Convoyeur Gravitationnel. Université de Tlemcen, Algérie: Thèse de Doctorat d'état.
- Sari, Z., Grassman, S., & Ghouali, N. (2007). Impact of Pickup/Dropoff Stations and Restoring Conveyor Locations on Retrieval Time Models of Flow-Rack Automated Storage and Retrieval Systems. *Production Planning and Control* , 18 (2), 105-116.
- Sari, Z., Saygin, C., & Ghouali, N. (2005). Travel-Time Models for Flow-Rack Automated Storage and Retrieval Systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25, 979-987.

Chapitre 3

Evaluation des performances des AS/RS dans la littérature

| | |
|--|----|
| <i>3.1. Introduction</i> | 33 |
| <i>3.2. Méthodes d'évaluation de performances du système</i> | 34 |
| <i>3.3. Critères d'évaluation des performances</i> | 38 |
| <i>3.4. Configuration du système</i> | 40 |
| <i>3.5. Affectation de stockage</i> | 43 |
| <i>3.6. Traitement par lots</i> | 45 |
| <i>3.7. Position du point de repos des machines S/R</i> | 46 |
| <i>3.8. Ordonnancement des demandes de stockage/déstockage</i> | 47 |
| <i>3.9. Modélisation du temps de transport</i> | 49 |
| <i>3.10. Conclusion</i> | 52 |
| <i>3.11. Références Bibliographiques</i> | 53 |

3.1. Introduction

La complexité de mise en place des systèmes automatisés de stockage/déstockage exige le recours à une aide informatisée que ce soit pendant la phase de la conception et de la mise en place d'installations ou pendant le fonctionnement du système. Les méthodes analytiques, trop restrictives, peuvent apporter une aide lors d'une évaluation approchée des performances du système envisagé. Par contre, les outils de simulation peuvent apporter une connaissance sur le comportement du système étudié. Si la simulation est une aide à la conception, c'est également une aide à l'exploitation.

Un système automatisé de stockage/déstockage représente un investissement significatif pour une société. Les performances de l'AS/RS doivent être suffisantes

pour justifier les dépenses impliquées. Il y a un certain nombre de critères de performances par lesquels les systèmes automatisés de stockage peuvent être mesurés. Ces critères incluent : (Gaouar, 2004)

1. La capacité de stockage,
2. La production du système,
3. Le taux d'utilisation,
4. La fiabilité en temps de bon fonctionnement.

Nous parlerons dans ce chapitre des différents critères d'évaluation des performances des AS/RS, de l'amélioration du comportement et le bon fonctionnement du système. Nous justifierons aussi que les AS/RS ont une importance capitale dans les systèmes de production et de distribution.

3.2. Méthodes d'évaluation de performances du système

Avant toute prise de décision, il est nécessaire de recourir à l'évaluation des performances d'un système automatisé de stockage/déstockage, l'objectif étant l'optimisation de sa performance. Cette évaluation représente la mesure de l'impact d'une décision sur le système ou l'influence de perturbations modifiant son état.

D'après (Caux, 1993), évaluer signifie «*déterminer une quantité par le calcul sans avoir recours à la mesure directe*». Ceci suppose que l'évaluation soit effectuée à l'aide d'un modèle qui peut être expérimental, mathématique, de simulation... Evaluer implique également le recours à un objectif et un indicateur de performance qui fournit une donnée quantifiée mesurant l'efficacité du système, donc son aptitude à générer une performance (Berrah, 1997).

Les trois approches classiques d'évaluation des performances d'un système sont : (Habchi, 2001)

- Les mesures directes,
- Les méthodes analytiques,
- La simulation informatique.

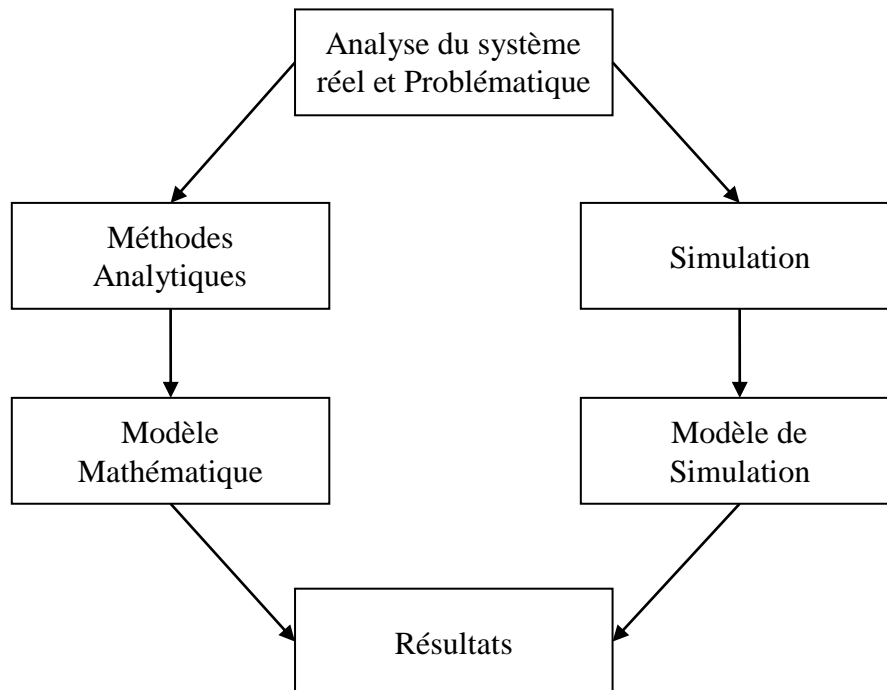


Figure 3.1 : Analyse des systèmes de production (Draghici et al., 1998)

3.2.1. Les mesures directes

Les mesures directes sont pratiquées directement sur le système réel ou sur une maquette ou un prototype physique représentant ce système. Par exemple, des expériences réelles sont réalisées pour mesurer la réaction au choc d'un véhicule contre un obstacle rigide. Ces simulations en grandeur réelle sont réalisées quand elles ne peuvent être remplacées par des simulations informatiques, le système étant très complexe pour être remplacé par un modèle fiable. Cependant, ces expériences sont excessivement coûteuses et nécessitent des budgets très importants pour leur mise en place.

La réalisation de mesures directes sur des systèmes ne peut être acceptée que dans le cas d'une démarche de progrès, d'amélioration continue ou de pilotage par indicateurs de processus. Les mesures directes ne peuvent être pratiquées dans le cas de systèmes non-existants et si la réalisation de prototypes physiques coûte trop chère. Dans plusieurs cas, les autres méthodes permettent avec des hypothèses suffisantes d'évaluer la performance de ces systèmes avant que la réalisation soit engagée. (Habchi, 2001)

3.2.2. Les méthodes analytiques

Les méthodes analytiques sont fréquemment utilisées pour l'évaluation des performances des systèmes de production en général. Ces méthodes exigent qu'un modèle mathématique représente le système étudié et que l'on dispose des outils mathématiques qui permettent d'étudier ce modèle. Une démarche analytique se décompose en trois étapes : (Habchi, 2001)

- Recherche d'une approche analytique adéquate (modèle mathématique qui s'adapte au cas étudié),
- Développement du modèle (émission des hypothèses adaptatives du système réel à la théorie adoptée et déduction du modèle),
- Implémentation, utilisation et exploitation du modèle.

Les techniques permettant d'étudier de manière analytique un système de production sont nombreuses (Proth & Cavaille, 1987) :

- La programmation linéaire consiste à optimiser une fonction objective sous certaines contraintes linéaires conduisant à une solution statique.
- La programmation dynamique consiste à trouver une solution optimale à partir de solutions optimales partielles comme dans le cas d'un programme PERT.
- Les chaînes de Markov sont utilisées dans la modélisation des systèmes stochastiques et dans lesquelles on définit l'état d'un système par un comportement entièrement probabiliste.
- Les graphes potentiels tâches et l'algèbre des dioïdes (Cohen & Dubois, 1983) nécessitent de connaître les séquences d'activités pour tous les objets considérés au sein du système.
- La théorie des files d'attente consiste à représenter le système sous forme d'un réseau de serveurs, de zones d'attente et de clients,
- Les réseaux de Pétri (David & Alla, 1988) constituent un outil graphique basé sur deux sortes de nœuds, les places et les transitions. A partir de ce graphe, on déduit des équations qui décrivent les caractéristiques du système (vivacité, synchronisation,...).

3.2.3. La simulation

La simulation est l'expérimentation sur un modèle. C'est une procédure de recherche scientifique qui consiste à réaliser une reproduction artificielle c.-à-d. un modèle du phénomène que l'on désire étudier, à observer le comportement de cette reproduction lorsque l'on fait varier expérimentalement les actions que l'on

peut exercer sur celle-ci et à en induire ce qui se passerait dans la réalité sous l'influence d'actions analogues.

La simulation, selon Robert E. Shannon (Shannon, 1975), est «*le processus de concevoir un modèle d'un vrai système et d'entreprendre des expériences avec ce modèle dans le but de comprendre le comportement du système ou d'évaluer diverses stratégies (dans les limites imposées par un critère ou par un ensemble de critères) pour le fonctionnement du système*».

En l'absence de modèles analytiques puissants, la simulation reste l'approche la plus utilisée pour la modélisation et l'évaluation des performances des systèmes complexes. Les travaux de recherche nationaux et internationaux abordés dans ce domaine ne cessent de croître et d'évoluer, pour répondre aux lacunes et limites de la simulation.

L'utilisation de la simulation se fait principalement lorsque l'expérimentation directe serait impossible à réaliser pour des raisons, des contraintes budgétaires, temporels, d'obstacles naturels..., ou lorsque les méthodes analytiques sont incapables de modéliser la réalité. La simulation peut servir de repère pour d'éventuels modèles théoriques et déterminer lequel fournit la meilleure approximation. La simulation cherche à atteindre des objectifs préétablis, alors que les méthodes analytiques cherchent à optimiser.

Les premiers langages de simulation développés ont été principalement utilisés pour des projets financiers afin de déterminer des coûts dans le cadre d'une unité de production mais rarement en ingénierie (Serin & Villefranche, 1996). Elle a trouvé, ensuite, une utilisation dans de nombreux domaines : la conception, l'optimisation, la logistique, la fabrication, les stratégies, la manutention, l'évaluation des performances...

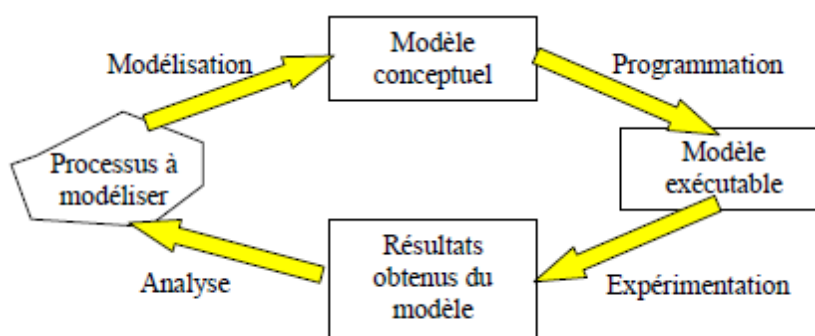


Figure 3.2 : Processus simplifié de simulation (Revel et al., 2004)

Le processus de simulation peut être présenté de manière simplifiée suivant la figure 3.2. par :

- La modélisation fournit un modèle conceptuel (modèle de connaissance),
- La programmation fournit un modèle exécutable (modèle d'action),
- La simulation ou l'expérimentation fournit les résultats obtenus du modèle,
- L'analyse des résultats permet d'évaluer le processus à modéliser.

3.3. Critères d'évaluation des performances

Il est crucial de concevoir un AS/RS de telle manière qu'il puisse gérer efficacement la demande future et les exigences actuelles tout en évitant les goulots d'étranglement et la surcharge du système. En raison de l'inflexibilité de l'aménagement et l'équipement, il est essentiel de le concevoir de manière exacte. La figure. 3.3 présente une vue schématique des problèmes de conception et de leur interdépendance.

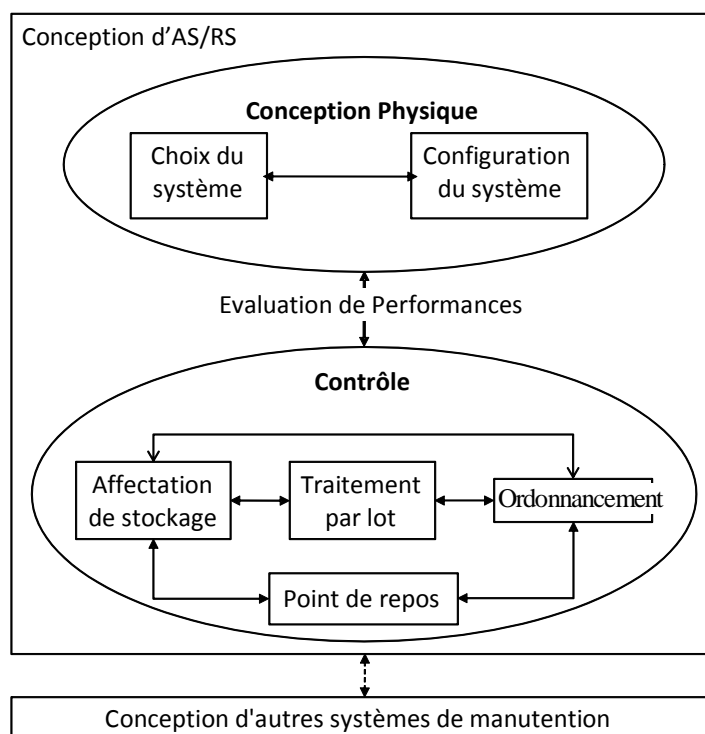


Figure 3.3 : Conception d'un système AS/RS (Roodbergen & Vis, 2009).

Le premier point dans la conception d'un AS/RS consiste évidemment à déterminer son apparence physique. Ensuite, c'est le contrôle du système. Le

contrôle de l'AS/RS est tout aussi important que la conception physique pour que l'AS/RS soit opérationnel.

La conception physique se compose de deux aspects qui déterminent ensemble la configuration physique du système.

1. Le choix du système c'est-à-dire le type d'AS/RS à utiliser, à implémenter dans le système de production.
2. La configuration du système, après le choix du type d'AS/RS, le système choisi doit être configuré, par exemple, en se prononçant sur le nombre d'allées et les dimensions du rack.

Ces choix peuvent être liés entre eux sur la base des données historiques et prévisionnelles, les caractéristiques du produit, le budget disponible, la production nécessaire, l'espace de stockage requis et les terrains disponibles. Une liste des décisions de conception pour un type d'AS/RS est citée dans le tableau 1.

Tableau 1 : Les décisions de conception d'un AS/RS (Roodbergen & Vis, 2009).

| Catégorie du problème | Décisions à prendre |
|--------------------------|---|
| Configuration de système | <ul style="list-style-type: none"> • Dimension de la charge • Dimension et nombre de casiers • Nombre et longueur des allées • Hauteur des étagères de stockage • Nombre et emplacement des points d'E/S • Capacité tampon des points d'E/S • Nombre de machines S/R |
| Affectation de stockage | <ul style="list-style-type: none"> • Méthode de stockage • Nombre de classes de stockage • Positionnement des classes de stockage |
| Traitement par lot | <ul style="list-style-type: none"> • Type de traitement par lots (statiques ou dynamiques) • La taille des lots • Règle de sélection pour l'attribution des ordres de lots |
| Ordonnancement | <ul style="list-style-type: none"> • Contraintes de l'ordonnancement (par exp., les dates d'échéance) • Type de fonctionnement (simple ou double cycle) • Approche d'ordonnancement • Méthode d'ordonnancement |
| Point de repos | <ul style="list-style-type: none"> • Type de positionnement (statique ou dynamique) • Position des machines S/R libres. |

La production du système peut être définie comme le nombre de charges par heure que le système de stockage peut recevoir, placer dans le rack et déstocker et livrer à la station de livraison. Ces deux activités peuvent être faites séparément ou combinées dans un cycle. Les cycles sont désignés sous le nom des transactions de stockage.

Le système de stockage doit être conçu pour la production exigée. Le régime des transactions varie selon les opérations d'usine et d'entrepôt, le taux d'entrée/sortie des charges au système de stockage et selon les périodes du jour. Le système devrait être conçu pour traiter le régime maximal.

La capacité de production sera également limitée par la capacité du système de manutention et de transport lié au système de stockage. Si le système de manutention et de transport est incapable de fournir des charges ou d'enlever des charges du système de stockage à un régime qui est compatible avec le temps de cycle de transaction, la production du système de stockage sera compromise.

Afin de faire face aux problèmes de conception d'un AS/RS, des méthodes allant de la simulation, des modèles analytiques, des approches artificiels intelligents, à des approches expérimentales ont été proposés dans la littérature.

En plus de ces différents critères d'évaluation, certains auteurs ont considéré l'aspect coût des AS/RS, tels que (Murthy, 1968), (Zollinger, 1975), (Bozer & White 1980), (Karaswa et al., 1980), (Kanet & Ramirez, 1986), (Malmborg & Bhaskaran, 1990) (Ho & Lee, 2004), (Hwang & Cho, 2006), (Muppani & Adil, 2008).

3.4. Configuration du système

Pour un problème de configurations typiques, la capacité totale est donnée à l'avance. Cela signifie essentiellement que le nombre d'allées, la longueur et la hauteur du rack sont constants. Augmenter le nombre d'allées implique donc de réduire la longueur et/ou la hauteur du rack pour maintenir la capacité de stockage désirée. En raison de cette relation, ayant plus d'allées implique des temps de réponse plus courts, en raison de la diminution de la longueur et la hauteur du rack. En outre, les modifications de conception ont souvent un impact sur les performances du système. Un système standard à plusieurs allées ayant une machine S/R par allée entraîne à son tour un débit plus élevé et des coûts d'investissement plus élevés.

La capacité de stockage est le nombre total maximal des différentes charges qui sont attendues pour être stockées. Ceci est déterminé par la taille du système de stockage relative aux tailles physiques des articles et des matériaux dans le stockage.

Dans un AS/RS, les matériaux sont généralement stockés dans des charges unitaires qui sont tenues dans un container de taille standard (palettes, containers en plastique ou en métal...etc.). Le container peut aisément être manipulé, transporté et stocké par le système de stockage et par le système automatisé de manutention et de transport qui peut être relié au système de stockage.

La capacité physique du système de stockage devrait être plus grande que le nombre des charges qui seront tenues afin d'avoir des espaces vides disponibles pour les matériaux ou les charges entrant dans le système et pour tenir compte des variations des besoins maximaux de stockage.

L'utilisation du système de stockage est définie comme le pourcentage du temps que le système est en service au temps où il est disponible. L'utilisation change tout au long de la journée car les conditions changent d'heure en heure. Il est souhaitable de concevoir le système pour une utilisation relativement maximale, à 85% (White & Kinney, 1982), entre les gammes 80 à 90% (Groover, 1987). Si l'utilisation moyenne est trop haute, le système risque de se bloquer.

Souvent les AS/RS ont des emplacements de stockage de taille égale. Toutefois, pour répondre à la demande de clients qui est très variables, il est également intéressant de permettre le stockage de différentes formes de charges dans un seul rack. En outre, un AS/RS peut avoir plusieurs points d'E/S par allée. Au lieu d'avoir le point d'E/S seulement à l'avant d'une allée, un autre pourrait être situé au milieu ou à l'arrière de l'allée. De cette façon, par exemple, les flux de charges entrantes et sortantes peuvent être aisément séparés. Quelques recherches dans le domaine de la conception physique seront citées par la suite, ainsi que dans le tableau 2.

Koenig (1980) rechercha les configurations optimales d'AS/RS sachant que certaines grandeurs de conception sont connues. Park & Webster (1989) ont proposé une approche qui permet de sélectionner simultanément l'équipement utilisé pour le stockage ainsi que la taille et la forme de la zone de stockage.

Rosenblatt *et al.* (1993) ont considéré deux aspects des AS/RS jusque là étudiés séparément ; l'optimisation du coût et le comportement dynamique du système. A l'aide d'une heuristique d'optimisation/simulation, ils ont déterminé les paramètres de conception nécessaire à un certain niveau de performance. Sung

& Han (1993) ont déterminé la taille des buffers nécessaire à l'alimentation d'un système de production à partir d'un AS/RS, tout en minimisant les coûts de manutention et de pertes de production. Fohn *et al* (1994) ont utilisé la conception d'un AS/RS pour illustrer l'utilisation d'une puissante approche de modélisation basée sur l'engineering concurrent. Randhawa & Shroff (1995) ont simulé, en utilisant SIMAN, six différentes configurations d'AS/RS à charge unitaire combinées à trois règles d'ordonnancement. Les résultats ont été comparés selon différents critères, le taux de charge de l'AS/RS étant le principal. Trevino *et al* (1995) ont développé une procédure de conception des AS/RS à carrousel. Cette procédure est basée sur trois étapes : la satisfaction de la capacité de stockage, les contraintes d'espace et le rendement tout en minimisant le coût. Hwang *et al.* (1996) ont considéré le problème d'optimisation de la taille d'un AGV transportant des produits d'un AS/RS à mini charge vers une chaîne d'assemblage d'électronique. Lee *et al.* (1996) ont utilisé ARENA 1.1 pour simuler un AS/RS à allées étroites. Le modèle de simulation développé, est utilisé pour examiner la logique de fonctionnement du système. Ce qui permet de déterminer le nombre optimal de machines de stockage/déstockage pour un rendement maximal.

Lee & Lee (2000) ont proposé un AS/RS à cellule modulable. Ils ont démontré l'intérêt du système à travers des exemples numériques. Ils ont remarqué qu'un tel système est plus flexible par rapport à la taille des produits tout en ayant une meilleure utilisation de l'espace. Malmborg (2001) étudia un AS/RS à véhicules autonomes. Il présenta des outils de conception analytiques basés sur les caractéristiques du système pour la modélisation des performances liées aux attributs clés du système tels que la capacité de stockage, la configuration du rack et le nombre de véhicules. Hwang *et al.* (2002) ont considéré la conception d'un AS/RS à mini charge en association avec des AGV. Un modèle non-linéaire et des heuristiques ont été proposés pour déterminer le nombre optimal de charges pouvant être transportées par chaque AGV aux machines en combinaison avec une conception optimale de l'AS/RS. De Koster *et al.* (2008) considèrent une nouvelle configuration optimale pour un AS/RS 3-D. Leur objectif est d'analyser les performances et la dimension optimale du système afin d'améliorer le temps de cycle pour un stockage aléatoire. Ekren & Heragu (2010) ont présenté une analyse de régression fondée sur la simulation pour la configuration d'un système de stockage/déstockage à véhicule autonome (AVS/RS). Le but de cette étude est de développer des fonctions mathématiques pour la configuration du rack de l'AVS/RS qui reflète la relation entre les sorties (réponses) et les variables d'entrée (facteurs) du système selon divers scénarios.

Tableau 2 : Un aperçu de quelque recherche traitant les problèmes de conception physique (Roodbergen & Vis, 2009).

| Méthode d'approche | Auteurs | Type d'AS/RS | Configuration du système | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------|-----------------|
| | | | Rack de stockage | Emplacement de stockage | Nombre de machine S/R | Nombre et longueur de l'allée | Nombre et position des points d'E/S | Nombre de commande | Capacité tampon |
| Simulation | Houshyar & Chung (1991) | Charge unitaire | | | | X | | | |
| | Taboun & Bhole (1993) | Charge unitaire | | | | X | | | |
| | Randhawa & Shroff (1995) | Charge unitaire | X | | | | X | | |
| | Lee et al. (1996) | Charge unitaire | | | X | | | | |
| | Potrc et al. (2004) | Charge unitaire et multi-navette | X | | | | | | |
| Simulation et analytique | Rosenblatt et al. (1993) | Charge unitaire | X | | X | X | X | | |
| Analytique | Karasawa et al. (1980) | Charge unitaire | X | | | X | | | |
| | Zollinger (1982) | Charge unitaire | X | | | X | | | |
| | Ashayeri et al. (1985) | Charge unitaire | | | | X | | | |
| | Azadivar (1987) | Charge unitaire | X | | | | | | |
| | Bozer and White (1990) | Mini-charge | | | | X | | | |
| | Bozer and White (1996) | Mini-charge | | | | X | | X | |
| | Chang and Wen (1997) | Charge unitaire | X | | | | | | |
| | Hwang and Ko (1988) | Charge unitaire | | | X | X | | | X |
| | Park et al. (1999) | Mini-charge | | | | | | | X |
| | Koh et al. (2005) | Mini-charge | | | | | | | X |
| | Lee et al. (2005) | Charge unitaire | | X | | | | | |

3.5. Affectation de stockage

D'autres recherches ont considéré que le problème vient de l'attribution d'emplacement de stockage et le choix d'ordre de stockage et de déstockage. De ce fait, différentes stratégies d'attribution de stockage ont été développées et comparées en utilisant la simulation et les méthodes d'analyse. Les méthodes d'attribution d'emplacements de stockage des produits existantes sont :

- Stockage dédié : chaque type de produit est affecté à un emplacement fixe.
- Stockage aléatoire : tous les emplacements vides ont une probabilité égale d'avoir un chargement qui leur est assigné.
- Stockage au plus proche voisin (closest open location) : le premier emplacement vide que l'on rencontre sera utilisé pour stocker les produits.
- Stockage à pleine rotation du stock (full-turnover) : il détermine les emplacements de stockage pour les charges en fonction de leur fréquence de la demande. Les produits les plus fréquemment demandés sont stockés dans des casiers accessibles, près des points d'E/S.
- Stockage par classe : il divise l'espace de stockage disponible en un certain nombre de zones. Chaque article est affecté à l'une des zones, basée sur la fréquence de la demande de l'article. Le stockage aléatoire est appliqué dans chaque zone.

Mansuri (1991) développa un modèle par simulation capable d'analyser et d'évaluer un type de stockage. Le stockage aléatoire, dédié et une combinaison

des deux furent explorés. Leurs avantages et inconvénients ont été mis en valeur. Lee (1992) considéra le problème d'attribution d'espace de stockage dédié de sorte que le temps total de cycle est minimisé dans un AS/RS à personne embarquée. Il a développé une heuristique pour la disposition des espaces de stockage, basée sur la technologie de groupe. Muralidharan *et al.* (1995) proposèrent une heuristique combinant le stockage aléatoire et à classes. Ils ont montré que cette approche réduit considérablement le temps d'attente et de service. Lee & Schaefer (1996) ont considéré le problème d'ordonnancement des demandes de déstockage dans un AS/RS à charge unitaire. Ils ont développé un algorithme permettant de séquencer les demandes en double cycle afin de minimiser les temps de transport.

Van Den Berg & Gademann (2000) ont présenté une étude en simulation d'un AS/RS. Cette étude considère une grande variété de règles de contrôle et de règles d'attribution des emplacements de stockage. Pour le stockage par classes, un nouvel algorithme, permettant de jouer entre l'espace de stockage nécessaire et le temps de transport, a été utilisé. Ashayeri *et al.* (2002) ont utilisé une approche géométrique pour calculer le temps de cycle pour un stockage aléatoire.

Le stockage par classes a trouvé un certain intérêt. Hausman *et al.* (1976) sont parmi les premiers à avoir considéré le problème du stockage par classes dans un AS/RS à simple cycle, en utilisant la courbe ABC. Graves *et al.* (1977) démontrent, en utilisant la simulation, que la forme en L des différentes régions, pour un stockage par classes, n'est pas nécessairement optimale pour un rack carré. Rosenblatt et Eynan (1989) ont déterminé les limites optimales des régions de stockage basées sur les classes. La procédure de résolution du problème est basée sur une recherche à une seule dimension. Les auteurs montrent que le maximum de réduction dans les temps de transport est obtenu lorsque l'AS/RS contient relativement peu de régions de stockage. Ces mêmes auteurs (Eynan & Rosenblatt, 1994) ont présenté une procédure de partition d'une aire de stockage en classes. Trois types de classes sont considérés et leurs temps de cycle correspondants sont modélisés. Ils ont montré que les meilleures performances sont obtenues avec un petit nombre de classes. Kouvelis et Papanicolaou (1995) ont considéré un AS/RS rectangulaire en temps à deux classes. Ils ont développé des relations explicites pour les limites optimales des régions ainsi que pour le temps de transport du simple cycle pour des racks optimisés. Jarvis & McDowell (1991), Tang & Chew (1997) et Chew & Tang (1999) ont estimé le cycle moyen dans un entrepôt utilisant un stockage par classes. Van den Berg (1996) propose un algorithme d'un programme dynamique qui assigne à chaque référence de produits sa classe. Caron *et al.* (1998), (2000) proposent un modèle de temps de

cycle pour un entrepôt à 2-block avec un stockage COI-par classes (cube-order-index, COI). Park et al. (2003), (2006) ont étudié et analysé les performances d'un AS/RS à mini-charge à 2-classes.

L'ensemble de ces études montrent l'importance de l'étude des performances des méthodes de stockage dans les systèmes de stockage, avec plus particulièrement un critère de performance relatif au temps moyen de déstockage. Plusieurs travaux ont également démontré que le stockage par classes permet une réduction considérable en temps de déstockage par rapport aux autres méthodes de stockage telles que le stockage dédié et le stockage aléatoire. Sachant que la majorité des travaux ont porté sur l'AS/RS à charge unitaire et vu la particularité de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel où les produits désirés peuvent se trouver en profondeur à l'intérieur du rack, nous traiterons dans le chapitre 4, le problème du stockage par classe pour réduire le temps moyen de déstockage ainsi qu'améliorer les performances de AS/RS à convoyeurs gravitationnels.

3.6. Traitement par lots

Supposons que nous ayons un certain nombre de commandes qui doivent être récupérées, déstockées dans un AS/RS. Nous pourrions déstocker les commandes une à la fois ou nous pourrions essayer de regrouper plusieurs commandes en un seul tour de la machine S/R. Cette approche est appelée *traitement par lots*.

L'avantage du traitement par lots est que le temps de déstockage des commandes par lots est plus court que la somme des temps de récupération des commandes individuelles. Toutefois, des efforts supplémentaires sont nécessaires pour garder une trace de l'article auquel il appartient et à quel ordre et comment trier les articles par la suite. Une limite de la taille d'un lot est généralement déterminée par la capacité de la machine S/R ou par le temps de récupération. Par conséquent, la décision importante dans le traitement par lot est la détermination de la taille de chaque lot en combinaison avec l'affectation de l'ordre de ces lots de tel sorte que les temps de déstockage sont minimisés. L'un des premiers articles se référant à des commandes par lots pour un AS/RS à personne embarquée est Barrett (1977). Elsayed (1981) conclut que ce problème qui peut être formulé par un modèle de programmation mixte en nombres entiers (Armstrong *et al.*, 1979) est NP-difficile.

Elsayed *et al.* (1993) et Elsayed & Lee (1996) considèrent le problème d'ordre du traitement par lot dans un système à personne à bord en minimisant les pénalités et les retards. Ils proposent une heuristique qui établit, en premier, les lots et détermine alors les temps de libération des lots. Pan & Liu (1995)

effectuent une analyse comparative des heuristiques du traitement par lot basées sur le temps moyen de transport. Dans les expériences, la forme et la capacité des machines S/R ainsi que les stratégies d'attribution de stockage ont été variées. Les auteurs concluent que seule la capacité de stockage d'une machine S/R a un fort impact sur le choix d'une certaine règle.

Roodbergen (2001), ainsi que Le-Duc & De Koster (2004), (2005), (2007) ont estimé le temps de cycle d'un déstockage par lots, c'est-à-dire regroupant plusieurs demandes de déstockage en une livraison afin de réduire le temps de réponse moyen. Won & Olafsson (2005) se concentrent sur les temps de réponse des clients en examinant conjointement le lot et l'opération de récupération.

3.7. Position du point de repos des machines S/R

Plusieurs chercheurs ont étudié le problème de la position du point de repos de la machine S/R et son impact sur le temps de cycle. Bozer et White (1984) ont ainsi suggéré plusieurs règles statiques de positionnement du point de repos. Egbelu (1991) a développé des formulations pour minimiser le temps de cycle et les temps de réponse maximum. Egbelu et Wu (1993) ont utilisé la simulation pour comparer les règles de positionnement du point de repos. Hwang et Lim (1993) utilisèrent les règles développées par (Egbelu, 1991) et les transformèrent en un problème de positionnement unique en utilisant les distances de Tchebyshev pour la première règle et le minimax de Tchebyshev pour la seconde. Peters *et al.* (1996) ont développé une expression analytique de la position du point de repos sous une variété de configurations d'AS/RS concluant que le meilleur point de repos de la machine de déstockage se trouve au milieu du rack et celui de la machine de stockage est au point de dépôt/livraison. Chang et Egbelu (1997) ont développé deux algorithmes pour la détermination du point de repos optimal d'une machine S/R desservant un AS/RS multi allées.

Park (2001) proposa une stratégie de détermination du point de repos optimal pour des racks à distribution non uniforme. Il présenta des relations analytiques basées sur la probabilité que la prochaine opération soit un stockage ou un déstockage. Différents chemins pour revenir au point de repos après une opération ont été étudiés pour un fonctionnement efficace de la machine S/R. Van den Berg (2002) présente des expressions analytiques pour la détermination du point de repos pour un stockage aléatoire et par classe. Contrairement à Peters *et al.* (1996), ces méthodes peuvent être utilisées pour différentes configurations de l'AS/RS en variant la position du point d'E/S.

3.8. Ordonnancement des demandes de stockage/déstockage

Un autre axe de recherche dans les AS/RS concerne l'ordonnancement des opérations de stockage/déstockage dans le but d'améliorer le temps de réponse du système. Une pratique commune dans l'ordonnancement des demandes de stockage et déstockage consiste à considérer un traitement selon la règle du "premier arrivé premier servi" (*First-Come-First-Served*, FCFS). Le choix de la règle FCFS est raisonnable pour le stockage, du fait que la disposition des produits destinés au stockage présente un flux physique dont il est difficile de modifier l'ordre. Cependant, le choix de la règle FCFS pour le déstockage est moins justifié du fait que les demandes de déstockage sont juste des messages électroniques (flux d'information) et peuvent être facilement re-séquencées.

Différents algorithmes et heuristiques peuvent être utilisés pour planifier les demandes de stockage et de déstockage. Les principaux objectifs de ces approches sont de minimiser le temps de cycle. La plupart des ouvrages se concentre sur l'ordonnancement du simple et double cycle de l'AS/RS à charge unitaire avec une station d'entrée/sortie et une machine S/R par allée.

Han *et al.* (1987) ont étudié des méthodes d'ordonnancement pour les opérations de déstockage. Ils ont trouvé que, quand il y a un seul emplacement vide, le problème est formulé comme le problème de voyageur de commerce. Lorsque il y a plusieurs emplacements vides, ils considèrent le problème plus difficile et proposent deux heuristiques.

Linn & Wysk (1990a, 1990b) ont développé un système expert qui est capable d'adapter les règles d'ordonnancement pour atteindre des buts spécifiques. Ils concluent sur le besoin de développer des techniques appropriées d'ordonnancement de déstockage en tant qu'élément de la commande stratégique et tactique globale pour améliorer les performances du système. (Lee & Kim, 1995) ont considéré l'ordonnancement des ordres de stockage/déstockage dans un AS/RS à charge unitaire sous un environnement juste à temps (JIT). Le but était de minimiser les pénalités d'avance ou de retard. Quatre heuristiques ont été proposées, basées sur deux étapes : la constitution des doubles cycles puis leur ordonnancement optimisé. Une solution optimale du problème fut proposée en utilisant la programmation en nombres entiers. Dans (Lee & Schaefer 1996), les auteurs ont étudié un problème d'ordonnancement des demandes de déstockage dans un AS/RS à charge unitaire. Ils ont développé un algorithme permettant de séquencer les demandes en double cycle afin de minimiser les temps de transport. Cet algorithme utilise une combinaison de la méthode hongroise et de l'algorithme de classement. Il permet d'obtenir des solutions optimales ou quasi-optimales.

(Eben-Chaïme & Pliskin, 1996) ont développé un modèle de simulation intégrant l'AS/RS dans son environnement global. Ils ont considéré trois types de fonctionnement : simple cycle, double cycle et fonctionnement hybride. Les résultats ont montré que sous le fonctionnement en double cycle, le système peut devenir instable. Le fonctionnement hybride étant donc la meilleure alternative. (Elsayed & Lee, 1996) ont investigué le fonctionnement d'un AS/RS où les ordres de déstockage sont à dates spécifiées. Ils ont développé des règles permettant l'association des ordres de stockage et déstockage en double cycle ainsi que l'ordonnement de ces ordres de tel sorte que le retard global des ordres de déstockage est minimisé. (Van den Berg & Gademann, 1999) se sont intéressés à l'ordonnement des opérations de stockage/déstockage en utilisant l'approche d'ordonnement par bloc avec un stockage dédié. L'objectif était de trouver un chemin avec un temps total de transport minimum. Le problème est équivalent au problème du voyageur de commerce et ils ont montré que dans le cas particulier avec une politique de stockage dédié, le problème peut être résolu en un temps polynomial.

Hur et al. (2004) ont effectué une approche stochastique pour estimer les mesures de performances d'un AS/RS à charge unitaire à l'aide d'un modèle de files d'attente M/G/1 avec un seul serveur et deux files d'attente. Plus précisément, ils ont obtenu la distribution de probabilité de l'état d'équilibre du nombre de commandes de stockage et de déstockage en attente dans les files d'attente. Même si aucune des distributions spécifiques que le temps de transport des machines S/R ont pris en charge, les temps de transport en simple cycle et double cycle sont supposés avoir la même distribution. Hur & Nam (2006) ont proposé une approche stochastique pour le calcul des mesures de performance d'un AS/RS à charge unitaire. Ils ont supposé que le processus d'arrivée des commandes de stockage et de déstockage sont des processus de Poisson avec des taux différents et que le temps de service lorsque AS/RS effectuant un simple cycle a été distribué différemment de celle du fonctionnement en double cycle.

D'autres approches ont été utilisées pour résoudre le problème d'ordonnement tels que les réseaux de neurones (Wang & Yih, 1997), les systèmes experts (Linn & Wysk, 1990a, b), l'intelligence artificielle (Seidmann, 1988), les algorithmes génétiques (Krishnaiah Chetty & Sarveswar Reddy, 2003) et la méthode Taguchi (Lim *et al.*, 1996). Ces méthodes peuvent être appliquées dans des situations d'incertitude élevée à peu d'informations. En outre, ces méthodes sont capables d'apprendre et de s'adapter aux changements de l'environnement tels que les fluctuations de la demande.

3.9. Modélisation du temps de transport

Dans l'environnement de fabrication et de distribution, les AS/RS sont utilisés pour stocker et déstocker des produits comme des palettes, supports, ou outils en réponse à des ordres de production ou d'articles pour les commandes des clients. L'absence de l'un de ces éléments provoque la rupture de production ou l'insatisfaction d'un client. De ce fait il est nécessaire de satisfaire les requêtes en minimisant le temps de déstockage. Ainsi, plusieurs chercheurs ont établi l'expression analytique du temps de cycle des machines S/R, pour évaluer les performances de l'AS/RS. Le temps de cycle des machines S/R est l'un des plus importants critères de performance.

(Hausman *et al.*, 1976) ont été les premiers à présenter des modèles du temps de cycle pour un AS/RS à charge unitaire à une seule navette. Les auteurs ont proposé des estimations pour un simple cycle pour des racks carrés-en-temps. Le stockage aléatoire, full-turnover, par deux et trois classes ont été pris en considération. (Graves *et al.*, 1977) ont étendu ces résultats en considérant également les temps pour un double cycle. (Bozer & White, 1984) ont développé des expressions analytiques du temps de simple et double cycle dans les AS/RS à charge unitaire. Pour ce faire, ils ont utilisé une approche statistique basée principalement sur l'approximation des distances des casiers du rack en fonction continue.

D'autres auteurs poursuivent les recherches de (Hausman *et al.*, 1976), (Graves *et al.*, 1977) et (Bozer & White 1984) en étudiant différentes méthodes de stockage, de configurations de l'AS/RS et/ou des caractéristiques opérationnelles. Des procédures récursives (Rosenblatt & Eynan, 1989), (Eynan & Rosenblatt, 1994) et des expressions de forme proche (closed-form) (Kim & Seidmann, 1990) et (Kouvelis & Papanicolaou, 1995) ont été proposées pour le stockage par n-classes et le stockage full turnover. (Mansouri, 1997) et (Eldemir *et al.*, 2004) ont développé des expressions analytiques du temps de cycle pour le stockage dédié.

(Hwang & Ha, 1991) présentent des modèles de temps cycle pour les systèmes à carrousel simples et doubles. Les auteurs examinent les effets sur les performances des renseignements sur la disponibilité des commandes à venir. De toute évidence, une augmentation du débit peut être obtenue avec cette information supplémentaire. Cependant, l'augmentation du débit est plus faible que celle à laquelle on pourrait s'attendre.

En se basant sur le travail de (Bozer & White 1984), (Sari *et al.*, 2005) ont développé deux modèles, approché et exact, du temps de transport pour l'AS/RS à

convoyeur gravitationnel. Le modèle approché est basé sur une approche continue où le rack est supposé continu. Le modèle exact est basé sur une approche discrète. Les expressions des deux approches sont comparées via la simulation. Les auteurs concluent qu'il n'y a pas de différence significative entre les résultats obtenus par les deux approches mais l'approche continue est plus pratique, à cause de sa simplicité de calcul par rapport à l'approche discrète qui est extrêmement complexe.

Wen *et al.* (2001) ont développé des modèles du temps de transport pour le stockage par classe et le stockage full-turnover en tenant compte de différentes vitesses avec une accélération connue et des taux de décélération. De Koster *et al.* (2008) considèrent une nouvelle configuration optimale pour un AS/RS 3-D. Leur objectif est d'analyser les performances et la dimension optimale du système afin d'améliorer le temps de cycle pour un stockage aléatoire. Fukunari & Malmborg (2008) ont proposé une heuristique pour estimer les temps de transport dans les systèmes à charge unitaire à stockage aléatoire où les charges sont stockées aux positions de stockage les plus disponibles. Une représentation du modèle de files d'attente est utilisée. Les résultats des calculs indiquent que l'heuristique rapporte de plus petites erreurs dans les estimations du temps de transport à stockage aléatoire que les modèles alternatifs. Lerher *et al.* (2010) ont présenté des modèles analytiques du temps de transport pour les AS/RS à multi-allées. Ces modèles tiennent compte des caractéristiques de fonctionnement de la machine de stockage et de déstockage tels que l'accélération et la décélération et la vitesse maximale. Les modèles de calcul permettent le calcul du temps moyen de transport pour le simple cycle et le double cycle. En plus, Lerher *et al.* (2010) ont développé un modèle de simulation pour l'AS/RS à multi-allées pour comparer les performances des modèles analytiques du temps de transport.

Gu *et al.* (2010) ont résumé quelques recherches sur les modèles de temps de transport pour les systèmes à base d'allée dans le tableau 3. La recherche portant sur trois stratégies de stockage différentes: le stockage dédié, le stockage aléatoire et le stockage par classe.

Tableau 3 : Résumé de quelques recherches sur les modèles du temps de transport
 (Gu et al., 2010)

| | | Stockage aléatoire | Stockage dédié | Stockage par classe |
|----------------------------|---------------|--|--|--|
| AS/RS à charge unitaire | Simple cycle | (Hausman et al., 1976) (Bozer & White, 1984) (Thonemann & Brandeau, 1998) (Kim & Seidmann, 1990) (Hwang & Ko, 1988) (Lee, 1997) (Hwang & Lee, 1990) (Chang et al., 1995) (Chang & Wen, 1997) (Koh et al., 2002) (Lee et al., 1999) | (Hausman et al., 1976) (Thonemann & Brandeau, 1998) (Kim & Seidmann, 1990) | (Hausman et al., 1976) (Thonemann & Brandeau, 1998) (Rosenblatt & Eynan, 1989) (Eynan & Rosenblatt, 1994) (Kouvelis & Papanicolaou, 1995) (Kim & Seidmann, 1990) (Pan & Wang, 1996) (Ashayeri et al., 2002) |
| | Double cycle | (Graves et al., 1977) (Bozer & White, 1984) (Kim & Seidmann, 1990) (Hwang & Ko, 1988) (Lee, 1997) (Han et al., 1987) (Hwang & Lee, 1990) (Chang et al., 1995) (Chang & Wen, 1997) (Koh et al., 2002) (Lee et al., 1999) | (Graves et al., 1977) (Kim & Seidmann, 1990) | (Graves et al., 1977) (Kouvelis & Papanicolaou, 1995) (Kim & Seidmann, 1990) (Pan & Wang, 1996) (Ashayeri et al., 2002) |
| | Multi-shuttle | (Meller & Mungwattana, 1997) (Potrc et al., 2004) | | |
| AS/RS à personne embarquée | | (Hwang & Song, 1993) | | |

| | | | | |
|--------------------------------|--|--|---|---|
| AS/RS fin d'allée | | (Bozer & White, 1990) (Bozer & White, 1996) (Foley & Frazelle, 1991) (Park et al., 1999) | (Park et al., 2003a) | |
| Carrousel et racks en rotation | | (Han & McGinnis, 1986) (Han et al., 1988) (Su, 1998) (Hwang & Ha, 1991) (Hwang et al., 1999) | | (Ha & Hwang, 1994) |
| Système à multi-allée | | (Hall, 1993) (Jarvis & McDowell, 1991) (Chew & Tang, 1999) (Hwang et al., 2004a) | (Caron et al., 1998) (Caron et al., 2000) (Jarvis & McDowell, 1991) (Chew & Tang, 1999) (Hwang et al., 2004a) | (Jarvis & McDowell, 1991) (Chew & Tang, 1999) (Hwang et al., 2004a) |

3.10. Conclusion

Nous avons présenté, dans ce chapitre, un état de l'art détaillé des différentes recherches sur les systèmes automatisés de stockage/déstockage. Nous avons schématisé quelques problèmes que l'on peut rencontrer lors de la conception d'un AS/RS.

Plusieurs travaux ont montré l'importance et l'intérêt d'étudier les performances des systèmes de stockage. Cet intérêt est justifié par le fait que les AS/RS ont une importance capitale dans les systèmes de production ou de distribution. L'ensemble de ces recherches ont porté sur l'AS/RS à charge unitaire et peu de travaux ont étudié l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels, vu la complexité de la configuration de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel où les produits désirés peuvent se trouver en profondeur à l'intérieur du rack.

Par la suite de notre travail, nous allons traiter l'un des critères pour évaluer les performances de l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels et ainsi, réduire le temps moyen de déstockage qui est le problème de l'affectation des emplacements de stockage et en particulier le stockage par classe.

3.11. Références Bibliographiques

- Armstrong, R.D., Cook, W.D., & Saïpe, A.L., (1979). Optimal batching in a semi-automated order picking system. *Journal of the Operational Research Society* 30 (8), 711–720.
- Ashayeri, J., R. M. Heuts, M. W. T. Valkenburg, H. C. Veraarts, & M. R. Wilhelm, 2002. A geometrical approach to computing expected cycle times for zone-based storage layouts in AS/RS. *International Journal of Production Research*, 40(17), p. 4467-4483.
- Berrah, L., (Septembre 1997). Une approche d'évaluation de la performance industrielle – Modèle d'indicateur et techniques floues pour un pilotage réactif, Thèse de doctorat en Génie Industriel, INP de Grenoble.
- Barrett, B.G., (1977). A further digression on the over-automated warehouse: Some evidence. *Interfaces*, 8 (1), p. 46–49.
- Bozer, Y. A., & White, J. A. (1984). Travel time models for automated storage/retrieval systems. *IIE Transactions* , 16 (4), 329-338.
- Bozer, Y. A. & White, J. A., (1980). Optimum designs of automated storage/retrieval systems. *TIMS/ORSA Joint National Meeting*, Washington, DC.
- Caron, F., Marchet, G., & Perego, A., (1998). Routing policies and COI-based storage policies in picker-to-part systems. *International Journal of Production Research*, 36(3), p. 713-732.
- Caron, F., Marchet, G., & Perego, A., (2000). Optimal layout in low-level picker-to-part systems. *International Journal of Production Research*, 38(1), p. 101-117.
- Caux, C., (1993). Analyse et spécification de systèmes de production pour l'évaluation des performances et la recherche d'ordonnancement, Thèse de doctorat de l'université de Clermont Ferrand.
- Chang, S. H. & Egbelu, P. J., (1997). Relative pre-positioning of storage/retrieval machines in automated/retrieval systems to minimize maximum system response time. *IIE Transactions*, 29(4), p. 303-312.
- Chew, E.P. & Tang, L. C., (1999). Travel time analysis for general item location assignment in a rectangular warehouse. *European Journal of Operational Research*, 112, p. 582-597.
- Chincholkar, A.K., Krishnaiah Chetty, O.V., & Kuppaswamy, G., (1994). Analysis of an automated storage and retrieval system using stochastic coloured Petri Nets. *Advances in Modelling & Analysis, C: System Analyses, Control & Design* 44 (3), 19–30.
- Cohen, G., & Dubois, D., (1983). *Analyse du comportement périodique de systèmes de production par la théorie des dioïdes*, Rapport de recherche INRIA, No. 191.
- David, R., & Alla, H., (1988). Du Grafcet aux réseaux de Petri, *Éditions Hermès*.
- De Koster, R., T. Le-Duc, & Y. Yugang, (2008). Optimal storage rack design for a 3-dimensional compact AS/RS. *International Journal of Production Research*, 46(6), p. 1495-1514.

- Draghici G., Brinzei N., & Filipas I., (1998). La modélisation et la simulation en vue de la conduite des systèmes de production, in *Les Cahiers des Enseignements Francophones en Roumanie*, Bucarest.
- Eben-Chaïme, M., & Pliskin, N., (1996). An integrative model for automatic warehousing systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 9 (4), p. 286–292.
- Egbelu P. J., (1991). Framework for dynamic positioning of storage/retrieval machines in an automated storage/retrieval system. *International Journal of Production Research*, 29(1), p. 17-37.
- Egbelu, P. J. & C. T. Wu, (1993). A comparison of dwell point rules in storage/retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 31(11), p. 2515-2530.
- Ekren, B. Y., & Heragu, S. S., (2010). Simulation-based regression analysis for the rack configuration of an autonomous vehicle storage and retrieval system. *International Journal of Production Research* 48(21), p. 6257–6274.
- Eldemir, F., Graves, R. J., & Malmborg, C. J., (2004). New cycle time and space estimation models for automated storage and retrieval system conceptualization. *International Journal of Production Research* 42 (22), p. 4767–4783.
- Elsayed, E.A., (1981). Algorithms for optimal material handling in automatic warehousing systems. *International Journal of Production Research*, 19 (5), p. 525–535.
- Elsayed, E.A., Lee, M.K., Kim, S., & Scherer, E., (1993). Sequencing and batching procedures for minimizing earliness and tardiness penalty of order retrievals. *International Journal of Production Research*, 31 (3), p. 727–738.
- Elsayed, E.A., & Lee, M.K., (1996). Order processing in automated storage/retrieval systems with due dates. *IIE Transactions*, 28, p. 567–577.
- Eynan, A., & Rosenblatt, M. J., (1994). Establishing zones in single-command class-based rectangular AS/RS. *IIE Transactions*, 26(1), p. 38–46.
- Fohn, S. M., Greef, A. R., Young, R. E., & O'Grady, P. J., (1994). A constraint-system shell to support concurrent engineering approaches to design. *Artificial Intelligence in Engineering*, 9 (1), p. 1-17.
- Fukunari, M., & Malmborg, C. J., (2008). A heuristic travel time model for random storage systems using closest open location load dispatching. *International Journal of Production Research*, 46(8), p. 2215–2228.
- Gaouar, N, (24 Novembre 2004). Implémentation & simulation d'une heuristique de stockage/déstockage en vue de réduire le temps de cycle d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel, Mémoire de magister en Signaux et Systèmes, Université A. B. de Tlemcen.
- Graves, S. C., Hausman, W. H., & Schwarz, L. B., (1977). Storage-retrieval interleaving in automatic warehousing systems. *Management Science*, 23 (9), p. 935–945.
- Groover, M. P., (1987). Automation production systems and computer integrated manufacturing. Prentice Hall, Englewood Cliffs, p. 404-416.
- Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. F., (2010) Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research* 203, p. 539–549.

- Habchi, G., (5 décembre 2001). *Conceptualisation & Modélisation pour la Simulation des Systèmes de Production*, Document de Synthèse pour l'habilitation à diriger des recherches, Université de Savoie.
- Han, M.H., McGinnis, L.F., Shieh, J.S., & White, J.A., (1987). On sequencing retrievals in an automated storage/retrieval system. *IIE Transactions* 19 (1), 56–66.
- Hausman, W. H., Schwarz, L. B., & Graves, S. C., (1976). Optimal storage assignment in automatic warehousing systems. *Management Science*, 22 (6), p. 629–638.
- Ho, Y.-C., & Lee, C.-S., (2004). A NO-COST ZONE AND ISO-COST LINE BASED CONTROL METHOD FOR AN AS/RS WITH A MULTIPLE-LOAD S/R MACHINE. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 21(1), p. 1-17.
- Hsieh, S., Hwang, J.S., & Chou, H.C., (1998). A Petri-net-based structure for AS/RS operation modelling. *International Journal of Production Research*, 36 (12), p. 3323–3346.
- Hur, S., Lee, Y.H., Lim, S.Y. & Lee, M.H., (2004). A performance estimation model for AS/RS by M/G/1 queuing system. *Computers & Industrial Engineering*, 46, p. 233–241.
- Hur, S., & Nam, J., (2006). Performance analysis of automatic storage/retrieval systems by stochastic modeling. *International Journal of Production Research*, 44(8), p. 1613–1626
- Hwang, H., & Ha, J.W., (1991). Cycle time models for single/double carousel system. *International Journal of Production Economics* 25, p. 129–140.
- Hwang H. & Lim J. M., (1993). Deriving an optimal dwell point of the storage/retrieval machine in an automated storage/retrieval system. *International Journal of Production Research*, 31(11), p. 2591-2602.
- Hwang, H., Kim, S.Y., & Moon, S.W., (1996). Determination of optimum unit load size of the AGV in an electronics assembly production system, *Int Jnl Production Research*, 34 (5), p. 1293-1306.
- Hwang, H., Moon, S., & Gen, M., (2002). An integrated model for the design of end-of-aisle order picking system and the determination of unit load sizes of AGVs. *Computers & Industrial Engineering* 42, p. 249–258.
- Hwang, H. S., & Cho, G. S., (2006). A performance evaluation model for order picking warehouse design. *Computers & Industrial Engineering*, 51 p. 335–342.
- Jarvis, J.M. & McDowell, E. D., (1991). Optimal product layout in an order picking warehouse. *IIE Transactions*, 23(1), p. 93-102.
- Kanet, J.J., & Ramirez, R.G., (1986). Optimal stock picking decisions in automatic storage and retrieval systems. *Omega International Journal of Management Science*, 14 (3), p. 239–244.
- Karaswa, Y., Nakayama, H. & Dohi, S., (1980). Trade-off analysis for optimal design automated warehouses. *International Journal of Systems Sciences*, 11 (5), p. 567-576.
- Kim, J., & Seidmann, A., (1990). A framework for the exact evaluation of expected cycle times in automated storage systems with full-turnover item allocation and random service requests. *Computers & Industrial Engineering* 18 (4), p. 601–612.

- Knapp, G.M., Wang, H.P., (1992). Modeling of automated storage/retrieval systems using Petri nets. *Journal of Manufacturing Systems*, 11 (1), 20–29.
- Koenig, J., (1980). Design and model the total system. *Industrial Engineering*, 12(10), 22-27.
- Kouvelis, P., & Papanicolaou, V., (1995). Expected travel time and optimal boundary formulas for a two-class-based automated storage/retrieval system. *International Journal of Production Research*, 33 (10), p. 2889-2905.
- Krishnaiah Chetty, O.V., & Sarveswar Reddy, M., (2003). Genetic algorithms for studies on AS/RS integrated with machines. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 22, p. 932–940.
- Le-Duc, T. & R. De Koster, (2004). Travel distance estimation in a single-block ABC storage strategy warehouse, In: Fleischmann and Klose (eds.) *Distribution Logistics: advanced solutions to Practical Problems*, p. 185-202 (Berlin: Springer Verlag).
- Le-Duc, T. and R. De Koster, (2005). Travel distance estimation and storage zone optimization in a 2-block ABC-storage strategy warehouse. *International Journal of Production research*, 43(17), p.3561-3581.
- Le-Duc, T. and R. De Koster, (2007). Travel time estimation and order batching in a 2-block warehouse. *Report, European Journal of Operational Research*, 176(1), p. 374-388.
- Lee, M.-K., (1992). A storage assignment policy in a man-on-board automated storage/retrieval system. *International Journal of Production Research*, 30 (10), p. 2281-2292.
- Lee, M.K., & Kim, S.Y., (1995). Scheduling of storage/retrieval orders under a just-in-time environment. *International Journal of Production Research* 33 (12), p. 3331–3348.
- Lee, H.F., & Schaefer, S.K., (1996). Retrieval sequencing for unit-load automated storage and retrieval systems with multiple openings. *International Journal of Production Research*, 34 (10), p. 2943-2962.
- Lee, S.G., de Souza, R., & Ong, E.K., (1996). Simulation modeling of a narrow aisle automated storage and retrieval system (AS/RS) serviced by rail-guided vehicles. *Computers in Industry*, 3, 30 (3), p. 241-253.
- Lee, Y., & Lee, M.H., (2000). An automated storage/retrieval system with modularised cells. *Annals DAAAM*, 11 (6), p. 269-270.
- Lerher, T., Potrc, I., Šraml, M., & Tollazzi, T., (2010). Travel time models for automated warehouses with aisle transferring storage and retrieval machine. *European Journal of Operational Research* 205, p. 571–583
- Lim, J.M., Kim, K.S., Yum, B.J., & Hwang, H., (1996). Determination of an optimal configuration of operating policies for direct-input–output manufacturing systems using the Taguchi method. *Computers & Industrial Engineering*, 31 (3/4), 555–560.
- Linn, R.J., & Wysk, R.A., (1990a). An expert system framework for automated storage and retrieval system control. *Computers & Industrial Engineering* 18 (1), p. 37–48.
- Linn, R.J., & Wysk, R.A., (1990b). An expert system based controller for an automated storage/retrieval system. *International Journal of Production Research* 28 (4), p. 735–756.

- Malmborg, C.J., Bhaskaran, K., 1990. A revised proof of optimality for the cube-per-order index rule for stored item location. *Applied Mathematical Modelling*, 14 (2), 87–95.
- Malmborg, C.J., (2001). Rule of thumb heuristics for configuring storage racks in automated storage and retrieval systems design. *International Journal of Production Research*, 39 (3), p. 511-527.
- Mansuri, M., (1991). Simulation model development to analyze, evaluate and design storage allocation and AS/RS operation. *Simulation*, 57 (4), p. 231-239.
- Mansuri, M., (1997). Cycle-time computation, and dedicated storage assignment, for AS/R systems. *Computers & Industrial Engineering* 33 (1–2), p. 307–310.
- Muppani, V. R., & Adil, G. K., (2008). A branch and bound algorithm for class based storage location assignment. *European Journal of Operational Research*, 189, p. 492–507.
- Muralidharan, B., Linn, R.J., & Pandit, R., (1995). Shuffling heuristics for the storage location assignment in an AS/RS. *International Journal of Production Research*, 33 (6), p. 1661-1672.
- Murthy, K.G., (1968). An algorithm for ranking all the assignments in order of increasing costs. *Operations Research*, 16 (3), 682–687.
- Pan, C.H., & Liu, S.Y., (1995). A comparative study of order batching algorithms. *Omega International Journal of Management Science*, 23 (6), p. 691–700.
- Park, Y.H., & Webster, D.B., (1989). Modelling of three-dimensional warehouse systems. *International Journal of Production Research*, 27 (6), p. 985–1003.
- Park, B.C., (2001). An optimal dwell point for automated storage/retrieval systems with uniformly distributed, rectangular racks. *International Journal of Production Research*, 39 (7), 1469-1480
- Park, B. C., Foley, R. D., White, J. A., & Frazelle, E. H., (2003). Dual command travel times and miniload system throughput with turnover-based storage. *IIE Transactions*, 35, p. 343–355.
- Park, B. C., Foley, R. D., & Frazelle, E. H., (2006). Performance of miniload systems with two-class storage. *European Journal of Operational Research*, 170, p. 144–155.
- Peters B. A., Smith J. S., & Hale, T. S., (1996). Closed form models for determining the optimal dwell point location in automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 34(6), p. 1757-1771.
- Proth, J., & Cavaille, J. B., (1987). *Pratique de la simulation de production discontinue*, Éditions Siprodis.
- Randhawa, S.U., & Shroff, R., (1995). Simulation-based design evaluation of unit load automated storage/retrieval systems. *Computers & Industrial Engineering*, 28 (1), p. 71-79.
- Revel, L., Habchi, G., & Maire, J. L., (2004). Analyse du processus d'élaboration d'un projet de simulation. *5ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'04)*, Nantes, France.
- Roodbergen, K.J., (2001). *Layout and routing methods for warehouses*. Ph.D. Series, Erasmus Research Institute of Management (ERIM).

- Roodbergen, K. J., & Vis, F. A. I., (2009). A survey of literature on automated storage and retrieval systems. *European Journal of Operational Research*, 194 (2009), p. 343–362.
- Rosenblatt, M.J., & Eynan, A., (1989). Deriving the optimal boundaries for class-based automatic storage/retrieval systems. *Management Science*, 35(12), p. 1519–1524.
- Rosenblatt, M.J., Roll, Y., & Zyser, V., (1993). A combined optimization and simulation approach for designing automated storage/retrieval systems, *IIE Transactions*, 25 (1), p. 40-50.
- Sari, Z., Saygin, C., & Ghouali, N. (2005). Travel-Time Models for Flow-Rack Automated Storage and Retrieval Systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25, 979-987.
- Seidmann, A., (1988). Intelligent control schemes for automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research* 26 (5), p. 931–952.
- Serin, F., & Villefranche, L., (Janvier 1996). Simulateur de gestion d'un terminal à conteneurs – simulation discrète par macro-processus et processus complémentaires, Thèses de doctorat en Informatique, Université de Rouen.
- Shannon, R. E., (1998). Introduction to the art and science of simulation. Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, pp 7-14.
- Sung, C.S., & Han, Y.H., (1993), Optimal buffer space for a periodic review production/inventory system with inventory-dependent production rate, *International Journal of Production Economics*, 29 (1), p. 11-25.
- Tang, L. C. & Chew, E. P., (1997). Order picking systems: batching and storage assignment strategies. *Computer & Industrial Engineering*, 33(3), p. 817-820.
- Trevino, J., Liao, F., & Chopra, S., (1994). Cardes -- carousel design. *International Journal of Production Research*, 32 (5), p. 1013-1026.
- Van den Berg, J.P., (1996). Class-based storage allocation in a single command warehouse with space requirement constraints. *International Journal of Industrial Engineering*, 3(1), p. 21–28.
- Van Den Berg, J. P., & Gademann, A. J. R. M., (1999), Optimal routing in an automated storage/retrieval system with dedicated storage, *IIE Transactions*, 31 (5), p. 407-415
- Van den Berg, J.P., & Gademann, A.J.R.M., (2000). Simulation study of an automated storage/retrieval system. *International Journal of Production Research*, 38 (6), p. 1339–1356.
- Van den Berg, J.P., (2002). Analytic expressions for the optimal dwell point in an automated storage/retrieval system. *International Journal of Production Economics*, 76, p. 13–25.
- Wang, J.-Y., & Yih, Y., (1997). Using neural networks to select a control strategy for automated storage and retrieval systems (AS/RS), *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 10 (6), p. 487-495
- Wen, U.P., Chang, D.T., & Chen, S.P., (2001). The impact of acceleration/deceleration on travel-time models in class-based automated S/R systems. *IIE Trans* 33(7), p. 599–608

- White, J. A. & Kinney, H. D., (1982). Storage and warehousing. *In Handbook of Industrial Engineering*, G. Salvendy ed., John Wiley & Sons, New York.
- Won, J., & Olafsson, S., (2005). Joint order batching and order picking in warehouse operations. *International Journal of Production Research*, 43(7), 1427-1442.
- Zollinger, H. A. (1975). Planning, evaluating and estimating storage systems. Proceedings 1975, *Advanced Material Handling Technology Seminar*, Purdue University, IN.

Chapitre 4

Stockage par classe

| | |
|--|----|
| <i>4.1. Introduction</i> | 60 |
| <i>4.2. Politiques de stockage</i> | 61 |
| <i>4.3. Etat de l'art sur le stockage par classe</i> | 63 |
| <i>4.4. Conclusion</i> | 72 |
| <i>4.5. Références Bibliographiques</i> | 72 |

4.1. Introduction

Les politiques de stockage sont des procédés qui déterminent les méthodes de stockage effectuées dans un AS/RS. En règle générale, le fonctionnement de l'AS/RS est régi par un ensemble cohérent de politiques de contrôle tels qu'ils prennent chacun en charge un sous-ensemble spécifique des activités. Une politique de stockage sert à déterminer les endroits où sont assignés les articles. Etant donné les demandes du clients ou de la production, le problème consiste à déterminer les emplacements de produits à déstocker afin de les satisfaire en un temps minimum. Ainsi, le choix de la politique de stockage des articles est très important. Il existe cinq principales politiques de stockage présentes dans la littérature : le stockage dédié, le stockage aléatoire, le stockage au plus proche voisin, le stockage full-turnover et le stockage par classe.

Le système automatisé de stockage/déstockage à convoyeurs gravitationnels est constitué d'un ensemble de casiers profonds dont les supports sont des convoyeurs gravitationnels. Deux machines S/R se trouvent aux deux extrémités : l'une sur une face assure le stockage et l'autre sur l'autre face assure le déstockage, les deux machines sont reliées entre-elles par un convoyeur de restockage incliné en sens inverse permettant à la machine de stockage d'accéder aux produits pour les re-stocker. Ils permettent, de par leur conception, de

minimiser l'espace utilisé par la suppression des allées entre étagères. Par contre leur temps de cycle reste moyen et est, dans la plupart des cas, plus long que celui d'un AS/RS à charge unitaire.

L'une des solutions pour minimiser le temps de cycle est d'utiliser une heuristique de stockage/déstockage (Sari, 2003) et (Gaouar et al, 2005, 2006). L'heuristique a permis une grande amélioration du temps de cycle de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel. Ainsi, ses performances globales sont devenues supérieures à celles de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel utilisant le stockage aléatoire.

L'autre solution est le stockage aléatoire par classe. Ce type de stockage s'attaque au temps de cycle. Il permet une réduction du temps qui peut atteindre 40% (Askin, 1993) sachant que les produits dans un AS/RS ne restent pas stockés la même durée. Les produits qui restent stockés peu de temps sont placés près de la station de livraison et les produits qui restent plus longtemps sont placés loin de la station, ainsi le rendement du système peut être grandement amélioré.

Ce quatrième chapitre tente de regrouper les différents comportements des auteurs face à la problématique qui est le stockage par classe. Leur avis permettra un meilleur raisonnement envers le sujet. Nous définirons les différentes politiques de stockage dans la section 4.2. Par la suite, nous parlerons plus en détail du stockage par classe.

4.2. Politiques de stockage

4.2.1. Le stockage dédié

Cette politique consiste à stocker chaque référence à un emplacement de stockage fixe. L'inconvénient principal de cette politique est la faible occupation des emplacements de stockage car chaque référence doit disposer de suffisamment de place pour recevoir le niveau de stock maximal qu'elle peut atteindre. Cette politique est la politique la plus consommatrice en nombre d'emplacement car il faut donner suffisamment d'espace pour les stocks maximum de chaque référence. Néanmoins, cette politique a pour avantage de permettre une familiarisation avec l'emplacement des références. Ainsi, la gestion des stocks est simplifiée et la quantité de chaque référence peut être contrôlée visuellement.

4.2.2. Le stockage aléatoire

Dans le stockage aléatoire, n'importe quel produit est stocké dans n'importe quel casier. Un système de contrôle élaboré garde en mémoire les adresses de chaque type de produit. Le principal avantage est que ce type de stockage utilise moins d'espace que le stockage précédent, il permet d'optimiser l'occupation des emplacements. L'espace total de stockage est équivalent au stock maximum de tous les produits (Askin, 1993). Ceci permet une réduction importante d'espace. Cependant, ce système nécessite un contrôle très élaboré.

4.2.3. Le stockage par classe

Le stockage par classe divise l'espace de stockage disponible dans un certain nombre de zones. Chaque article est ensuite affecté à l'une des zones, basée sur la fréquence de la demande de l'article. Ainsi, suivant le taux de rotation des articles et dans chaque zone, le stockage aléatoire est appliqué. Souvent, l'espace de stockage est divisé en trois classes nommées "stockage ABC". Cela reflète la pratique courante d'appeler les articles les plus demandés par la classe A, les articles moyennement demandés par la classe B, et ainsi, les articles les moins demandés par la classe C.

Le stockage aléatoire permet de réduire l'espace de stockage par rapport au stockage dédié. Ainsi, le stockage dédié permet l'accès facilement aux articles par rapport au stockage aléatoire puisque chaque référence a son emplacement fixe. Le stockage par classe est un compromis entre ces deux politiques de stockage. Il s'attache au temps de cycle. Des réductions du temps de cycle peuvent atteindre 40% (Askin, 1993). Dans ce type de stockage, les produits sont stockés dans un AS/RS suivant leur durée de stockage. Si les articles qui restent stockés peu de temps sont placés près de la station de livraison et les articles qui restent plus longtemps sont placés loin de la station de livraison, le rendement du système peut être grandement amélioré. Le stockage par classe subdivise les casiers en classes par rapport à leurs distances de la station de livraison, les casiers les plus proches formant la première classe, les plus éloignés formant la dernière

4.2.4. Le stockage au plus proche voisin

Il consiste à affecter à chaque article entrant dans la zone de stockage l'emplacement libre le plus proche du point de livraison. Cette politique permet à la fois d'optimiser l'occupation des emplacements de stockage et de réduire le temps de déstockage.

4.2.5. Le stockage full-turnover

Cette politique de stockage est une politique de stockage dédié où l'on affecte l'emplacement des références en fonction de leur fréquence de la demande. Les références les plus demandées sont placées près du point de livraison de manière à réduire les déplacements lors du déstockage. Heskett (1963) propose d'utiliser comme indice le COI (cube-per-order index) défini comme le rapport entre la place occupée et la fréquence de commande d'une référence.

4.3. Etat de l'art sur le stockage par classe

Le stockage par classe consiste à définir plusieurs classes de références en fonction de leur fréquence de demande puis à affecter à chaque article entrant dans la zone de stockage n'importe quel emplacement parmi les emplacements libres de sa classe de références. Cette politique est donc intermédiaire entre la politique de stockage aléatoire (cas limite avec une seule classe) et la politique de stockage dédié (cas limite avec autant de classes que de références).

Lors de la mise en œuvre du stockage par classe dans un AS/RS, un concepteur est confronté à trois décisions majeures :

- Déterminer le nombre de classes.
- Déterminer le nombre d'articles à affecter à chaque classe.
- Déterminer l'emplacement, la position dans le rack de chacune des classes.

Tableau 1 : Procédures définies pour déterminer les limites des classes

| Nombres classes | Simple cycle Racks carré-en-temps | Simple cycle Rack rectangulaire | Double cycle Rack rectangulaire |
|-----------------|---|--|--|
| 2 classes | (Hausman et al., 1976) | (Kouvelis & Papanicolaou, 1995) | (Kouvelis & Papanicolaou, 1995) |
| 3 classes | (Hausman et al., 1976) | Pas de papier Le problème peut être résolu en utilisant $n = 3$ | Pas de papier Le problème peut être résolu en utilisant $n = 3$ |
| n classes | Pas de papier Le problème peut être résolu en utilisant des approches de solutions pour les racks rectangulaires | (Rosenblatt & Eynan, 1989) (Van den Berg, 1996) | (Kouvelis & Papanicolaou, 1995) |

Le tableau 1 montre les différentes recherches considérées pour déterminer le nombre de classes, allant de 2-classes à n-classes. Plusieurs procédures ont été élaborées pour définir les limites des classes.

Plusieurs stratégies existent, allant des solutions optimales pour le simple cycle aux règles de base pour le double cycle. Afin de résoudre le problème de la configuration des classes et de la détermination de leurs positions que ce soit dans un rack carré-en-temps ou non. Parmi les auteurs qui ont travaillé sur ce point : (Hausman et al., 1976), (Graves et al., 1977), (Guenov & Raeside, 1992), (Eynan et Rosenblatt, 1994).

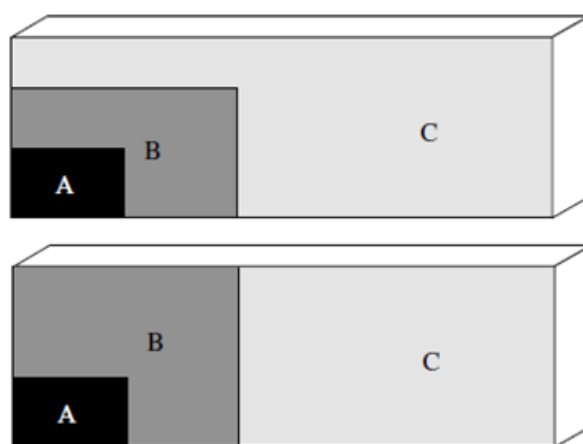


Figure 4.1 : Exemples de configurations de rack non-carré-en-temps à 3-classes

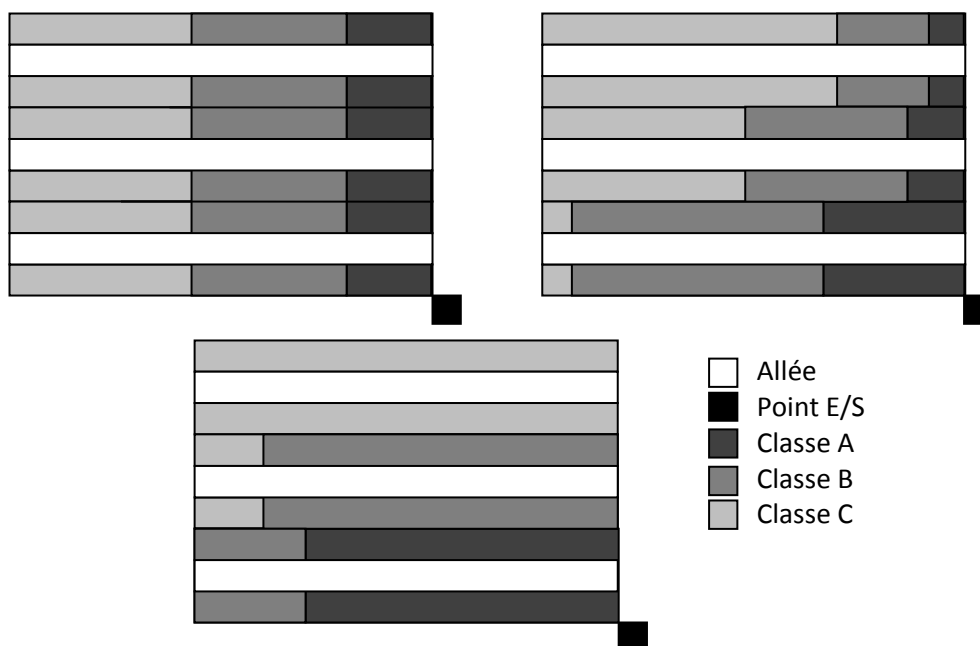


Figure 4.2 : Exemples de localisation des classes des articles dans un entrepôt

Le stockage par classes a trouvé un certain intérêt. Hausman *et al.* (1976) sont parmi les premiers à avoir considéré le problème du stockage par classes dans un AS/RS à simple cycle. En utilisant la courbe ABC, ils ont prouvé que la configuration en forme L avec des limites carrées-en-temps pour les classes A, B et C est optimale lors de la planification de simple cycle appliqué dans des racks carrés-en-temps.

Graves *et al.* (Graves *et al.*, 1977) démontrent, en utilisant la simulation, que la forme en L des différentes régions, pour un stockage par classes, n'est pas nécessairement optimale pour un rack carré-en-temps utilisant des machines S/R en double cycle.

Schwarz *et al.* (1978) ont vérifié les résultats analytiques dans (Hausman *et al.*, 1976) et dans (Graves *et al.*, 1977) en utilisant la simulation. Les simulations suggèrent que la plupart des résultats des modèles analytiques tiennent dans des conditions stochastiques. Les auteurs appliquent la règle du plus proche voisin ouvert pour la sélection d'un emplacement de stockage en vertu de la politique de stockage aléatoire. Il est apparu que pour une utilisation de l'espace à 90% ou plus, le temps moyen de transport avec la politique de stockage COI est comparable aux résultats d'analyse pour le temps moyen de transport basé sur la politique de stockage aléatoire. En outre, ils ont comparé la politique de stockage COI à la politique de stockage par classe avec deux ou trois classes. Et, ils considèrent l'information imparfaite sur le taux de rotation des produits.

Rosenblatt & Eynan (1989) ont élargi la méthode de (Hausman *et al.*, 1976) pour établir les limites optimales des classes pour un nombre donné de classes dans un rack carré-en-temps. La procédure de résolution du problème est basée sur une recherche à une seule dimension. Les auteurs montrent que le maximum de réduction dans les temps de transport est obtenu lorsque l'AS/RS contient relativement peu de régions de stockage. Eynan et Rosenblatt (1994) ont utilisé cette méthode à la suite pour n'importe quel rack rectangulaire. Ces auteurs (Rosenblatt & Eynan, 1989) et (Eynan & Rosenblatt, 1994) ont montré qu'il est préférable d'utiliser des racks avec un facteur de forme $b \geq 0.6$ et moins de 7 classes. En plus, ils ont conclu qu'un nombre relativement restreint de classes, généralement inférieur à 10, est préférable pour obtenir des économies potentielles en temps de transport par rapport au stockage full-turnover. Dans la pratique, souvent le nombre de classes est limité à trois.

Park & Webster (1989a) ont présenté une nouvelle méthode de conception de structure de stockage appelée "carré-en-temps", pour minimiser le temps de transport dans un système à trois dimensions de stockage de palettes. Les

algorithmes de conception du système de stockage pour minimiser les temps de transport sont décrits selon la politique du stockage par classe. Ils se réfèrent à des classes en forme de L. Park & Webster (1989b) ont proposé une approche qui permet de sélectionner simultanément l'équipement utilisé pour le stockage ainsi que la taille et la forme de la zone de stockage.

Jarvis & McDowell (1991), Tang & Chew (1997) & Chew et Tang (1999) ont estimé le cycle moyen dans un entrepôt utilisant un stockage par classes.

Guenov et Raeside (1992) comparent trois configurations de la forme des classes dans un AS/RS (fig.4.3). Ils concluent que la configuration des classes pour le stockage par classes dépend de la position du point d'entrée/sortie du rack pour un AS/RS à charge unitaire.

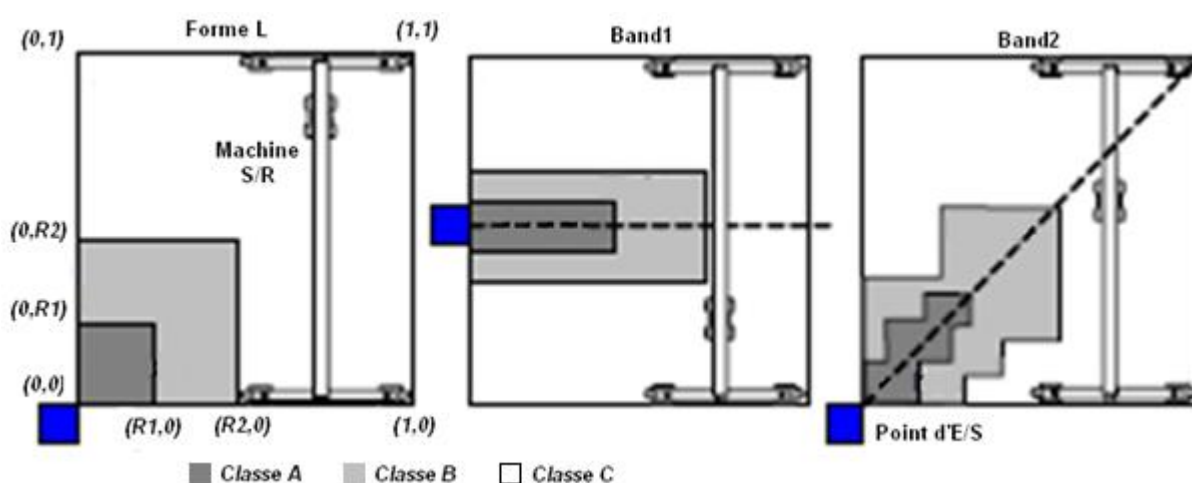


Figure 4.3 : Une vue sur les 3 configurations de classe dans un rack avec trois classes de stockage de produits

Ha et Hwang (1994) ont montré que le stockage à 2 classes réduit le temps de stockage et le temps de déstockage par rapport à un stockage aléatoire pour un simple et double cycle pour système de stockage à carrousel.

Sarker et al. (1994) ont présenté les avantages d'une meilleure technique d'ordonnancement pour l'AS/RS à double navette, cette technique étant basée sur le modèle de stockage par classes. Le modèle considéré présente une grande réduction dans les temps de transport par rapport au modèle du plus proche voisin.

Kouvelis et Papanicolaou (1995) ont considéré un AS/RS rectangulaire en temps à deux classes. Ils ont développé des relations explicites pour les limites optimales des régions ainsi que pour le temps de transport du simple cycle pour des racks optimisés.

Van den Berg (1996) a proposé un algorithme d'un programme dynamique qui assigne à chaque référence de produits sa classe. Il a considéré la réduction des superficies de stockage dans son algorithme de programmation dynamique de façon à optimiser les partitions des produits et les lieux dans un certain nombre de classes pour réduire au minimum le temps en simple cycle dans des conditions généralisées de la demande, de mesure de la distance et de la configuration.

Larson et al. (1997) ont développé une approche heuristique pour la disposition d'un entrepôt à charge unitaire à stockage par classe. Cette heuristique se compose de trois phases: Phase 1 : détermination de la disposition des allées et des dimensions ; Phase 2 : attribution d'article à un support de stockage medium ; Phase 3 : attribution de l'espace aux configurations de stockage. L'espace est alloué en fonction du support de stockage. L'utilisation du stockage par classe fournit une flexibilité pour faire face aux fluctuations de la demande et permet une diminution du temps de transport et des coûts de manutention.

Caron et al. (Caron et al., 1998), (Caron et al., 2000) proposent un modèle de temps de cycle pour un entrepôt à 2-blocs avec un stockage COI-par classes (cube-order-index, COI).

Thonemann & Brandeau (1998) ont modifié les algorithmes de Hausman et al. (1976) de telle sorte qu'ils peuvent être utilisés dans un environnement à la demande stochastique. Ils concluent que pour un environnement stochastique le stockage basé sur le volume et le stockage par classe réduisent le temps moyen du simple cycle par rapport au stockage aléatoire.

Kulturel et al. (1999) ont simulé un AS/RS sous des règles de stockage partagé. Le temps de cycle est utilisé comme principale mesure de performance. La sensibilité du système à la variété de produits, au temps de réapprovisionnement, au taux de demande est examinée.

Van Den Berg & Gademann (2000) ont présenté une étude en simulation d'un AS/RS. Cette étude considère une grande variété de règles de contrôle et de règles d'attribution des emplacements de stockage. Pour le stockage par classes, un nouvel algorithme, permettant de jouer entre l'espace de stockage nécessaire et le temps de transport, a été utilisé.

Hsieh & Tsai (2001) ont présenté une méthode d'attribution des emplacements de stockage dans un AS/RS à classe basée sur le BOM (coût des produits). Cette méthode permet, en plus des avantages du stockage par classe, l'intégration de l'AS/RS dans un environnement CIM.

Wen et al. (2001) ont développé des modèles du temps de transport pour le stockage par classe et le stockage full-turnover en tenant compte de différentes vitesses avec une accélération connue et les taux de décélération.

Dans (Ashayeri et al., 2002), les auteurs proposent une approche géométrique pour calculer le temps de cycle de la machine de stockage/déstockage (S/R) fonctionnant en simple et double cycle. Le rack traité peut être carré-en-temps ou non-carré-en-temps. Ashayeri et al. (2002) ont considéré trois différentes configurations de rack non-carrés-en-temps (fig.4.4). Les résultats de la comparaison ont montré que la 3ème configuration est plus performante que les autres pour un rack non-carré-en-temps.

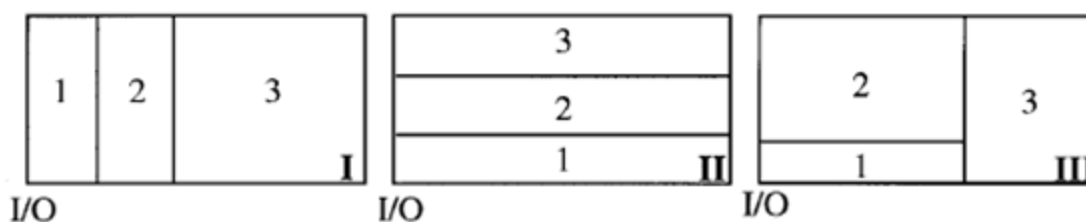


Figure 4.4 : Trois différentes configurations du rack non-carré-en-temps

Van den Berg (2002) présente des expressions analytiques pour la détermination du point de repos pour un stockage aléatoire et par classe. Contrairement à Peters et al. (1996), ces méthodes peuvent être utilisées pour différentes configurations de l'AS/RS en variant la position du point d'E/S.

Ashayeri et al. (2003) ont développé une approche heuristique pour l'utiliser dans l'allocation d'emplacement de stockage pour les AS/RS à stockage par classes. L'algorithme détermine la taille, le nombre de zones ainsi que leur disposition relative dans les étagères de l'AS/RS. L'utilisation de cette approche pour un AS/RS à deux points d'E/S à stockage par classes a permis une réduction de 25% du temps moyen de cycle par rapport au stockage aléatoire.

Park et al. (2003, 2006) ont étudié et analysé les performances d'un AS/RS à mini-charge à 2-classes. Cela a permis de minimiser le temps moyen en simple et double cycle.

Eldemir et al. (2004) ont proposé un nouveau modèle analytique pour les AS/RS afin de déterminer le temps de cycle et l'espace requis pour le stockage utilisant les différentes méthodes de stockage : dédié, aléatoire et par classes. A partir de ce modèle, ils ont déduit que l'utilisation du stockage par classes nécessite moins d'espace de stockage que l'utilisation du stockage aléatoire ou du

stockage dédié et que de plus, les temps de stockage et de déstockage sont inférieurs.

Le-Duc et De Koster (2004, 2005a, b) considèrent un entrepôt avec une allée diagonale (entrepôt à 2-blocs). Les auteurs développent pour le stockage de classe un modèle de distance de transport pour estimer la moyenne de la longueur du tour dans l'entrepôt à 2-blocs lorsque la forme en S ou la méthode de retour est utilisée. Les résultats montrent que la méthode de retour est plus performante que la forme en S pour une taille relativement petite de la liste de prélèvement. Le stockage par classes conduit à une réduction de la distance de transport par rapport au stockage aléatoire.

Petersen and Aase (2004) ont évalué l'effet du prélèvement, la gamme et les politiques de stockage sur des opérations manuels d'ordre de prélèvement sur étagère. La simulation a montré clairement que le stockage par classe nécessite moins de déplacement que le stockage aléatoire.

Petersen et al. (2004) présentent une étude très intéressante qui permet de comparer le stockage aléatoire par classes par rapport au stockage aléatoire. Utilisant la méthode de Pareto pour classer les différentes références de produits, leur modèle permet de choisir la meilleure configuration possible (nombre de classes et découpage des zones) en fonction de la répartition full-turnover et de la taille des lots de ramassage (tableau 2). Ils montrent, entre autres, que l'utilisation de 2 classes permet déjà d'atteindre 80% des gains qu'offre le stockage dédié en fonction du volume de vente par rapport au stockage aléatoire.

Tableau 2 : Schéma d'attribution de stockage (emplacement de stockage%/fréquence de la demande%)

| Attribution | Classe A | Classe B | Classe C |
|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Skewed | 20/80 | 30/15 | 50/5 |
| Medium | 30/50 | 30/30 | 40/20 |
| random | 33.33/33.33 | 33.33/33.33 | 33.33/33.33 |

Manzini et al. (2005, 2007) présentent une approche intégrée pour le développement d'un système expert basé sur des techniques d'intelligence artificielle pour appuyer la conception et la gestion d'un système de prélèvement de commandes. L'approche combine la simulation, les méta-heuristiques et les analyses statistiques pour étudier l'impact de la disposition de l'entrepôt, le profil des commandes de produits, de routage et les politiques de stockage sur la performance du système de préparation de commandes en insistant sur le total distance de transport à l'intérieur d'une période donnée.

Dans son travail, Park (2006) a déterminé la moyenne et la variance du temps de transport en simple et double cycles pour des racks non-carré-en-temps avec un stockage à deux classes. Il a ensuite montré comment la moyenne et la variance du temps de transport peuvent être utilisées pour approximer ou donner la limite au système du taux de rotation des mini-charges pour les racks non-carré-en-temps avec le stockage à deux classes.

Rau & Yin (2007) ont étudié le fonctionnement des machines S/R en double cycle pour un AS/RS à charge unitaire en stockage par classe en utilisant la simulation multi-pass avec l'algorithme générique. Le rack de stockage a été divisé en quatre classes selon leur taux de la demande, en se basant sur le travail de (Pan & Wang, 1996) qui ont montré que trois à cinq classes pourraient manipuler différents types d'articles d'une distribution des stocks.

Muppani & Adil (2008a) ont développé un modèle non-linéaire de programmation en nombre entier et un algorithme de type Branch & Bound pour comparer le stockage par classes au stockage dédié, en considérant l'espace de stockage et son coût, le coût de manutention et de préparation de commande pour un stockage par classes. L'approche présentée a permis de démontrer qu'il existe des économies importantes en utilisant le stockage par classes, bien que le stockage dédié et le stockage aléatoire soient couramment utilisés dans la planification de stockage en entrepôt.

Muppani & Adil (2008b) ont élaboré un algorithme de recuit simulé pour former le stockage par classes en tenant compte des coûts de l'espace de stockage, le coût de prélèvement de commandes, et de regroupement des produits sans restriction d'ordre COI. L'expérience a montré que l'algorithme de recuit simulé a en moyenne de meilleurs résultats que l'algorithme de programmation dynamique pour la formation des classes. Leurs travail a démontré que le stockage par classe offre un plus grand bénéfice que le stockage dédié où la variabilité de l'inventaire des articles est élevé.

Li & Tang (2009) ont construit un modèle multi-objectif pour le problème d'optimisation de l'attribution d'emplacement de stockage. Pour résoudre ce problème, un algorithme génétique amélioré est développé pour la disposition des emplacements de stockage. L'approche envisageant la fréquence d'ordre de prélèvements ainsi que la stabilité du rack basé sur la politique de stockage par classe améliore l'efficacité d'entrepôt. Le test avec des ensembles de données générés aléatoirement montre que l'approche développée calcule beaucoup plus efficacement et que l'algorithme permet une meilleure optimisation pour le

problème d'allocation d'emplacements de stockage. En plus, il peut également être appliqué à d'autres problèmes d'affectation.

Yu et De Koster (2009a) ont tiré la moyenne du temps de transport en simple cycle en vertu de la politique de stockage full-turnover par classe. Pour mettre en œuvre la politique du stockage par classe, Yu et De Koster (2009b) ont introduit le modèle pour déterminer les limites optimales de zone de stockage pour un 3D compact AS/RS. Pour la détermination des limites de la zone, ils ont introduit le modèle non linéaire mixte en nombres entiers.

Certaines variations de la politique de stockage par classes ont été étudiés. L'ensemble de ces études montrent l'importance du stockage par classes dans les systèmes de stockage, afin d'améliorer les performances des différents systèmes de stockage, et plus particulièrement la minimisation du temps moyen de déstockage. Dans le tableau 3, quelques travaux sont cités pour l'étude du temps de transport pour différents AS/RS en stockage par classes.

Tableau 3 : Travaux sur le temps de transport pour différents AS/RS en stockage par classes

| | | Stockage par classes |
|------------------------------------|--------------|---|
| AS/RS à charge unitaire | Simple cycle | (Hausman et al., 1976) (Rosenblatt & Eynan, 1989) (Thonemann & Brandeau, 1998) (Kim & Seidmann, 1990) (Eynan & Rosenblatt, 1994) (Kouvelis & Papanicolaou, 1995) (Pan & Wang 1996) (Ashayeri et al., 2002) |
| | Double cycle | (Graves et al., 1977) (Kim & Seidmann, 1990) (Kouvelis & Papanicolaou, 1995) (Pan & Wang, 1996) (Ashayeri et al., 2002) |
| Carousel | | (Hwang & Ha, 1994) (Vickson & Fujimoto, 1996) (Vickson & Lu, 1998) |
| Système conventionnel multi-allées | | (Jarvis & McDowell, 1991) (Chew & Tang, 1999) (Hwang et al., 2004) |

4.4. Conclusion

Nous avons présenté, dans ce chapitre, un état de l'art détaillé des différentes recherches sur le stockage par classes pour les différents systèmes de stockage. Nous avons cité ces travaux par ordre chronologique.

L'ensemble de ces études montrent l'importance de l'étude des performances des méthodes de stockage dans les système de stockage, avec plus particulièrement un critère de performance relatif au temps moyen de déstockage.

Plusieurs travaux ont également démontré que le stockage par classes permet une réduction considérable en temps de déstockage par rapport aux autres méthodes de stockage telles que le stockage dédié et le stockage aléatoire. Dans la plupart de ces recherches, l'AS/RS utilisé est toutefois à charge unitaire. Or, nous allons voir dans le chapitre suivant que la profondeur du rack modifie la pertinence des résultats proposés.

4.5. Références Bibliographiques

- Askin, R. G. & Standridge, C. R., (1993). Modelling and Analysis of Manufacturing Systems, *John Wiley & Sons*, Ed.
- Ashayeri, J., R. M. Heuts, M. W. T. Valkenburg, H. C. Veraarts, & M. R. Wilhelm, (2002). A geometrical approach to computing expected cycle times for zone-based storage layouts in AS/RS. *International Journal of Production Research*, 40(17), p. 4467-4483.
- Ashayeri, J., Heuts, R.M., Beekhof, M. & Wilhelm, M.R. (2003). On the determination of class-based storage assignments in an AS/RS having two I/O locations, In: Meller et al. (eds.) *Progress in Material Handling Research*, p. 27-43.
- Caron, F., Marchet, G., & Perego, A., (1998). Routing policies and COI-based storage policies in picker-to-part systems. *International Journal of Production Research*, 36(3), p. 713-732.
- Caron, F., Marchet, G., & Perego, A., (2000). Optimal layout in low-level picker-to-part systems. *International Journal of Production Research*, 38(1), p. 101-117.
- Chew, E.P., Tang, L.C., 1999. Travel time analysis for general item location assignment in a rectangular warehouse. *European Journal of Operational Research* 112, 582–597.
- Eldemir, F., Graves, R. J., & Malmborg, C. J., (2004). New cycle time and space estimation models for automated storage and retrieval system conceptualization. *International Journal of Production Research* 42 (22), p. 4767–4783.
- Eynan, A., & Rosenblatt, M. J., (1994). Establishing zones in single-command class-based rectangular AS/RS. *IIE Transactions*, 26(1), p. 38–46.

- Gaouar, N., Sari, Z., & Ghouali, N., (2005). Développement d'une Heuristique de Stockage/Déstockage pour un Système AS/R à Convoyeur Gravitationnel. *6e Congrès International de Génie Industriel, (GI'2005)*. Besançon Micropolis, France.
- Gaouar, N., Sari, Z., & Ghouali, N. (2006). Modélisation et implémentation d'une Heuristique de Stockage/Déstockage pour un Système AS/R à Convoyeur Gravitationnel. *6ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'06)*. Rabat, Maroc.
- Graves, S.C., Hausman, W.H., & Schwarz, L.B., (1977). Storage-retrieval interleaving in automatic warehousing systems. *Management Science* 23 (9), 935–945.
- Guenov, M., & Raeside, R., (1992). Zone shapes in class based storage and multicommand order picking when storage/retrieval machines are used. *European Journal of Operational Research* 58, p. 37–47.
- Ha, J-W., & Hwang, H., (1994). Class-based storage assignment policy in carousel system. *Computers industries Engineering*, 26 (3), p. 489-499.
- Hausman, W.H., Schwarz, L.B., & Graves, S.C., (1976). Optimal storage assignment in automatic warehousing systems. *Management Science* 22 (6), p. 629–638.
- Heskett, J. L. (1963). Cube-per-order index – A key to warehouse stock location. *Transportation and distribution Management*, 3, p. 27–31.
- Hwang, H., & Ha, J.W., (1994). An optimal boundary for two class-based storage assignment policy in carousel system. *Computers & Industrial Engineering* 27 (1-4), p. 87–90.
- Hwang, H., Oh, Y.H., & Lee, Y.K., (2004). An evaluation of routing policies for orderpicking operations in low-level picker-to-part system. *International Journal of Production Research* 42 (18), p. 3873–3889.
- Hsieh, S., & Tsai, K.-C., (2001). A BOM Oriented Class-Based Storage Assignment in an Automated Storage/Retrieval System. *International Journal of Advancing Manufacturing Technologie*, 17, p. 683–691.
- Jarvis, J.M. & McDowell, E.D. (1991). Optimal product layout in an order picking warehouse. *IIE Transactions* 23(1), 93-102.
- Kouvelis, P., & Papanicolaou, V., (1995). Expected travel time and optimal boundary formulas for a two-class-based automated storage/retrieval system. *International Journal of Production Research*, 33 (10), p. 2889-2905.
- Kulturel, S., Ozdemirel, N. E., Sepil, C., & Bozkurt, Z., (1999). Experimental investigation of shared storage assignment policies in automated storage/retrieval systems. *IIE Transactions*, 31(8), 739-749.
- Larson, T.N., March, H., & Kusiak, A., (1997). A heuristic approach to warehouse layout with class-based storage, *IIE Transactions* 29 (4) p. 337-348.
- Le-Duc, T., & De Koster, R., (2005a). Travel distance estimation and storage zone optimisation in a 2-block ABC-storage strategy warehouse. *International Journal of Production research* 43(17), p. 3561-3581.
- Le-Duc, T., & De Koster, R., (2005b). Layout optimization for class-based storage strategy warehouses, In: De Koster and Delfmann (eds.) *Supply Chain Management: European Perspectives*, p. 191-214 (CBS Press: Sweden).

- Le-Duc, T., & De Koster, R., (2004). Travel distance estimation in a single-block ABC storage strategy warehouse, In: Fleischmann and Klose (eds.) *Distribution Logistics: advanced solutions to Practical Problems*, p. 185-202 (Berlin: Springer Verlag).
- Li, M.-j. & Tang, H.-y., (2009). An Improved Genetic Algorithm for Locations Allocation Optimization Problem of Automated Warehouse. In *Fuzzy Information and Engineering*, Bingyuan Cao, Tai-fu Li, Cheng-yi Zhang (Eds.): Volume 2, AISC 62, p. 1549–1560.
- Manzini, R., Gamberi, M., & Regattieri, A., (2005). Design and control of a flexible order picking system (FOPS) a new integrated approach to the implementation of an expert system. *Journal of Manufacturing Technology Management* 16 (1), 18–35.
- Manzini, R., Gamberi, M., Persona, A., & Regattieri, A., (2007). Design of a class based storage picker to product order picking system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 32 (17), 811–821.
- Muppani, V. R., & Adil, G. K., (2008a). A branch and bound algorithm for class based storage location assignment. *European Journal of Operational Research*, 189, p. 492–507.
- Muppani, V. R., & Adil, G. K., (2008b). Efficient formation of storage classes for warehouse storage location assignment: A simulated annealing approach. *Omega* 36, p. 609 – 618
- Pan CH, Wang CH (1996) A framework for the dual command cycle travel time model in automated warehousing systems. *Int J Prod Res* 34(8):2099–2117
- Park, Y.H., Webster, D.B., (1989a). Design of class-based storage racks for minimizing travel time in a three-dimensional storage system. *International Journal of Production Research* 27 (9), 1589–1601.
- Park, Y.H., & Webster, D.B., (1989b). Modelling of three-dimensional warehouse systems. *International Journal of Production Research*, 27 (6), p. 985–1003.
- Park, B. C., Foley, R. D., White, J. A., & Frazelle, E. H., (2003). Dual command travel times and miniload system throughput with turnover-based storage. *IIE Transactions*, 35, p. 343–355.
- Park, B. C., (2006). Performance of automated storage/retrieval systems with non-square-in-time racks and two-class storage. *International Journal of Production Research*, 44(6), 15 March, p. 1107–1123.
- Park, B. C., Foley, R. D., & Frazelle, E. H., (2006). Performance of miniload systems with two-class storage. *European Journal of Operational Research*, 170, p. 144–155.
- Peters B. A., Smith J. S., & Hale, T. S., (1996). Closed form models for determining the optimal dwell point location in automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 34(6), p. 1757-1771.
- Petersen, C.G., Aase, G. & Heiser, D.R. (2004). Improving order-picking performance through the implementation of class-based storage. *International Journal of Physical and Logistics Management* 34(7), p.534-544.

- Petersen, C. G., & Aase, G., (2004). A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking. *International Journal of Production Economics* 92, p. 11–19
- Rau, H., & Yin, Y.-L., (2007). Dual commands dispatching of a class-based unit-load automated storage and retrieval system using multi-pass simulation with generic algorithm. *International Journal of Advancing Manufacturing Technologie* 33, p. 530–539.
- Rosenblatt, M.J., & Eynan, A., (1989). Deriving the optimal boundaries for class-based automatic storage/retrieval systems. *Management Science*, 35(12), p. 1519–1524.
- Sari, Z., (2003). Modélisation, Analyse et Evaluation des Performances d'un AS/RS à Convoyeur Gravitationnel, Thèse de Doctorat d'état, LAT, Université de Tlemcen.
- Sarker, B.R., Mann, L., & Dos Santos, J.R.G.L., (1994), Evaluation of a class-based storage scheduling technique applied to dual-shuttle automated storage and retrieval systems, *Production Planning & Control*, 5 (5), p. 442-449
- Schwarz, L. B., Graves, S. C., & Hausman, W. H., (1978). Scheduling policies for automatic warehousing systems: simulation results. *AIIE Transactions*, 10(3), p. 260-270.
- Tang, L.C. & Chew, E.P. (1997). Order picking systems: batching and storage assignment strategies. *Computer & Industrial Engineering* 33(3), 817-820.
- Thonemann, U.W., & Brandeau, M., (1998). Note: optimal storage assignment policies for automated storage and retrieval systems with stochastic demands. *Management Science*, 44(1), p. 142–8.
- Vickson, R.G., Fujimoto, A., 1996. Optimal storage locations in a carousel storage and retrieval system. *Location Science* 4 (4), p. 237–245.
- Vickson, R.G., Lu, X., 1998. Optimal product and server locations in one dimensional storage racks. *European Journal of Operational Research* 105, p. 18–28.
- Van den Berg, J.P., (1996). Class-based storage allocation in a single command warehouse with space requirement constraints. *International Journal of Industrial Engineering*, 3(1), p. 21–28.
- Van den Berg, J.P., & Gademann, A.J.R.M., (2000). Simulation study of an automated storage/retrieval system. *International Journal of Production Research*, 38 (6), p. 1339–1356.
- Van den Berg, J.P., (2002). Analytic expressions for the optimal dwell point in an automated storage/retrieval system. *International Journal of Production Economics*, 76, p. 13–25.
- Wen, U.P., Chang, D.T., & Chen, S.P., (2001). The impact of acceleration/deceleration on travel-time models in class-based automated S/R systems. *IIE Trans* 33(7), p. 599–608
- Yu, Y., & De Koster, M.B.M., (2009a). Designing an optimal turnover-based storage rack for a 3D compact AS/RS. *International Journal of Production Research* 47 (6), 1551–1571.
- Yu, Y., & De Koster, M.B.M., (2009b). Optimal zone boundaries for two class-based compact 3D AS/RS. *IIE Transactions* 41 (3), 194–208.

Partie B

Stockage par classe dans un AS/RS à
convoyeur gravitationnel

Chapitre 5

Modélisation des temps de transport par classe d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel pour le stockage

| | |
|--|----|
| <i>5.1.Introduction</i> | 77 |
| <i>5.2.Formulation du problème</i> | 78 |
| <i>5.3.Modélisation analytique :</i> | 81 |
| <i>5.4.Modélisation par simulation</i> | 93 |
| <i>5.5.Conclusion</i> | 97 |
| <i>5.6.Références Bibliographiques</i> | 97 |

5.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous proposons de modéliser les temps moyens de stockage et de déstockage par classe d'un système automatisé de stockage/déstockage à convoyeur gravitationnel. Deux modèles sont développés. Le premier modèle que nous proposons est un modèle analytique basé sur la moyenne de tout les temps de transport entre les casiers et les stations de depot/livraison et le convoyeur de restockage. Le second est la modélisation par simulation.

La modélisation, et plus particulièrement la phase de conception du problème, est l'étape la plus importante. En section 5.2, nous allons définir le système à étudier en formulant le problème. (Pour plus de détails sur le système, voir partie A, chapitre 2.)

Le premier modèle, présenté dans la section 5.3, est approché mais se présente sous forme d'expressions analytiques simples et calculables à la main. Ce modèle est basé sur les travaux de Bozer et White (1984) et les travaux de Peters (1996).

En section 5.4, nous présentons le modèle par simulation où nous utilisons le logiciel Arena afin de déterminer le temps moyen de stockage et de déstockage.

5.2. Formulation du problème

Notations :

Avant d'entamer notre étude, nous allons définir les différents termes que nous utiliserons pour le développement des modèles :

| | |
|--------------------|--|
| $\overline{E(SC)}$ | Temps moyen de stockage ; |
| $\overline{E(RC)}$ | Temps moyen de déstockage ; |
| $\overline{E(V)}$ | Temps moyen de transport en deux points de la face du rack ; |
| L, H, D | Longueur, hauteur et profondeur du rack AS/RS à CG ; |
| l, h, d | Longueur, hauteur et profondeur d'un emplacement de stockage ; |
| M | Nombre d'emplacement dans un casier, nombre de couches dans un rack ; |
| m | Numéro de couche ; |
| N_l | Nombre de casier pour chaque ligne ; |
| N_h | Nombre de casier pour chaque colonne ; |
| t_h | Temps de transport horizontal de la station de dépôt/livraison à la colonne la plus éloignée ; |
| t'_h | Temps de transport horizontal entre deux casiers mitoyen ; |
| t_v | Temps de transport vertical de la station de dépôt/livraison à la ligne la plus éloignée ; |
| t'_v | Temps de transport vertical entre deux casiers mitoyen ; |
| b | Facteur de forme ; |
| T | Facteur de normalisation ; |
| ρ | Taux de charge. |
| λ | Taux de rotation |

Le stockage par classe divise l'espace de stockage disponible dans un certain nombre de zones. Chaque article est ensuite affecté à l'une des zones, basée sur la fréquence de la demande de l'article, ainsi suivant le taux de rotation des articles et dans chaque zone, le stockage aléatoire est appliqué. Souvent, l'espace de stockage est divisé en trois classes, nommé "stockage ABC". Cela reflète la pratique courante d'appeler les articles les plus demandés par la classe A, les articles moyennement demandés par la classe B, et ainsi les articles les moins demandés par la classe C. Selon la méthode de stockage par classe, n'importe quel produit de classe A peut être stocké dans n'importe quel casier dans la zone A et n'importe quel produit de classe B peut être stocké dans n'importe quel casier dans la zone B, respectivement pour la classe C.

Suivant la disposition et la profondeur des casiers dans l'AS/RS à convoyeur gravitationnel, à l'intérieur de chaque casier, plusieurs types de produits peuvent être stockés à n'importe quel emplacement du rack. De ce fait, la détermination du temps de cycle pour l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels n'est pas aussi simple que celui de l'AS/RS à charge unitaire pour un stockage par classe.

Les temps de transport des machines de stockage/déstockage dépend de la configuration du rack, de la capacité de stockage et du nombre de produits à stocker. Le rack de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel comme le montre la figure 5.1 est profond de largeur L , d'une hauteur H et d'une profondeur D . Il est composé de N_l casiers horizontaux, N_h casiers verticaux et M couches numérotées de 0 (face de déstockage) à $M-1$ (face de stockage). Chaque emplacement peut stocker un seul produit à la fois. Chaque emplacement a une largeur de $l = L/N_l$, une hauteur de $h = H/N_h$ et une profondeur de $d = D/M$. La capacité de stockage peut être calculée comme étant $N = N_l \cdot N_h \cdot M$.

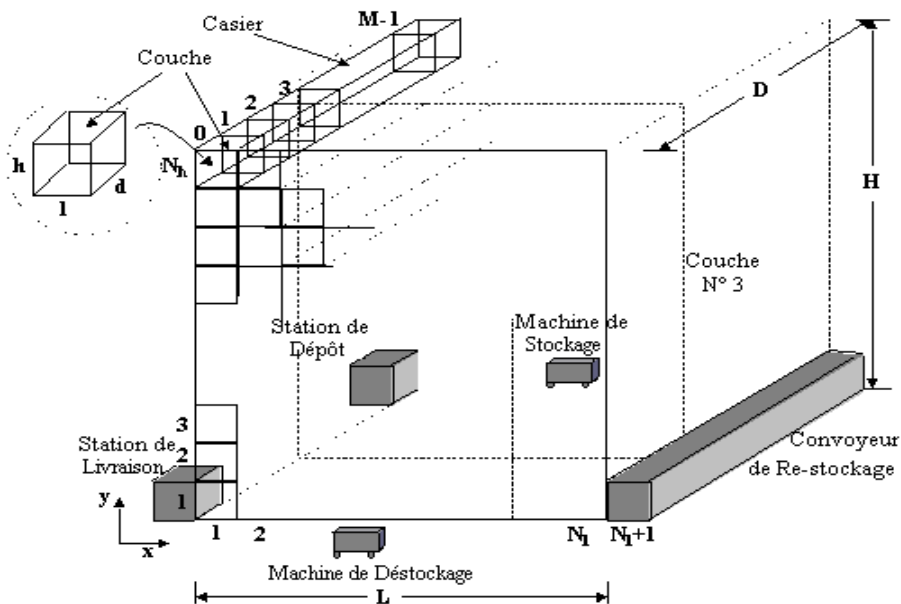


Figure 5.1 : Configuration de l'AS/RS à Convoyeurs Gravitationnels (Sari, 2003)

Les machines de stockage/déstockage peuvent se déplacer simultanément sur deux axes (Tchebychev Travel). Ces deux axes forment le plan x-y parallèle aux deux faces du rack. Ils possèdent la même vitesse horizontale V_h , et la même vitesse verticale V_v . par conséquent, les temps de transport peuvent être calculés comme suit :

- t_h , le temps de déplacement horizontal de la station de dépôt/livraison à la colonne la plus éloignée : $t_h = L/V_h$;
- t_v , le temps de déplacement vertical de la station de dépôt/livraison à la ligne la plus éloignée : $t_v = H/V_v$;
- t'_h , le temps de déplacement horizontal d'un casier au suivant : $t'_h = l/V_h = t_h/N_l$ avec $l = L/N_l$;
- t'_v , le temps de déplacement vertical d'un casier au suivant : $t'_v = h/V_v = t_v/N_h$ avec $h = H/N_h$.

Dans notre cas, $N_l=N_h$ et $t'_h = t'_v$, de ce fait $t_h = t_v$ et donc le facteur de normalisation se calcule, $T = \max(t_h, t_v) = t_h = t_v$ et le facteur de forme, $b = \min\left(\frac{t_h}{T}, \frac{t_v}{T}\right) = 1$.

Comme le montre la figure 1.1, la station de dépôt est située sur la face de stockage où la machine de stockage récupère les produits à stocker. La station de livraison est située sur la face de déstockage où la machine de déstockage dépose les produits pour la livraison. Le convoyeur de re-stockage incliné en sens inverse relie la machine de déstockage à la machine de stockage. Il permet de transférer les produits à restocker vers la station de dépôt. Sur le plan x - y , les stations de dépôt et de livraison ont pour coordonnées $(x,y) = (0,1)$, le convoyeur de restockage a pour coordonnées $(x,y) = (N_l+1,1)$. Le point de repos de la machine de déstockage est le milieu du rack (Peters et al., 1996). Il peut être défini comme suit : $(x, y) = \left(\frac{N_l+1}{2}, \frac{N_h+1}{2}\right)$.

Comme cité précédemment, les temps de transport des machines de stockage/déstockage dépendent de la configuration du rack, de la capacité de stockage et du nombre de produits à stocker. Pour stocker un produit de la classe A (B ou C), la machine de stockage (MS) le récupère au point de dépôt et le dépose dans un casier appartenant à la zone de la classe A (B ou C) de la face avant du rack (face de stockage). Le produit glisse sur le convoyeur gravitationnel et se positionne dans l'emplacement libre le plus proche de la face arrière du rack (face de déstockage). Chaque emplacement peut stocker un seul produit à la fois, placé l'un après l'autre. De ce fait, l'opération de stockage pour l'AS/RS à convoyeur gravitationnel est identique à une opération de simple cycle pour l'AS/RS à charge unitaire.

Contrairement au stockage, pour le déstockage d'un produit de la classe A (B ou C) positionné dans l'emplacement m ($m < M$) d'un casier appartenant à la zone de la classe A (B ou C), la machine de déstockage (MD) déstocke successivement tous les produits qui le précèdent et les dépose au convoyeur de re-stockage où ils seront pris en charge par la machine de stockage (MS) pour le stockage. Enfin la machine de déstockage (MD) récupère le produit et le dépose au point de livraison.

De ce fait, la machine de déstockage nécessite plusieurs déplacements afin de déstocker un produit. Donc le temps de déstockage pour un produit de n'importe quelle classe se trouvant dans une couche m peut alors être déterminé comme suit :

$$E(RC) = E(V_1) + E(V_2) + m(E(V_3) + E(V_4)) \quad (1)$$

où

- m : le numéro de la couche où se trouve le produit désiré (avec $0 \leq m \leq M-1$)
- $E(V_1)$: le temps de transport entre le point de repos de la machine S/R et le point de déstockage ;
- $E(V_2)$: le temps de transport entre le point de déstockage et la station de livraison ;
- $E(V_3)$: le temps de transport entre le point de déstockage et le convoyeur de restockage ;
- $E(V_4)$: le temps de transport entre le convoyeur de restockage et le point de déstockage.

Sachant que dans le stockage/déstockage par classe, les produits de classe A sont les plus demandés, les produits de classe B sont moyennement demandés et les produits de classe C sont les moins demandés. Ainsi, les produits sont déstockés suivant le taux de leur demande. Afin de déterminer le temps moyen de déstockage, il est nécessaire de déterminer les différents temps moyens de déstockage pour chaque classe (A, B et C) et le taux de demande des produits de chaque classe. Donc le temps moyen de déstockage peut alors être déterminé comme suit :

$$\overline{E(RC)} = \lambda_a \cdot \overline{E(RC)}_a + \lambda_b \cdot \overline{E(RC)}_b + \lambda_c \cdot \overline{E(RC)}_c \quad (2)$$

Où $\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c = 1$

- λ_a : le taux de demande des produits de la classe A ;
- λ_b : le taux de demande des produits de la classe B ;
- λ_c : le taux de demande des produits de la classe C.

5.3. Modélisation analytique :

Pour notre étude, nous allons considérer un système à deux classes (A et B). Ainsi, nous avons deux zones, la zone A et la zone B. Donc le temps moyen de déstockage peut alors être déterminé comme suit :

$$\overline{E(RC)} = \lambda_a \cdot \overline{E(RC)}_a + \lambda_b \cdot \overline{E(RC)}_b \quad (3)$$

Avec $\lambda_a + \lambda_b = 1$

$$\overline{E(RC)}_a = \overline{E(V_1)}_a + \overline{E(V_2)}_a + m_a \cdot (\overline{E(V_3)}_a + \overline{E(V_4)}_a) \quad (4)$$

$$\overline{E(RC)}_b = \overline{E(V_1)}_b + \overline{E(V_2)}_b + m_b \cdot (\overline{E(V_3)}_b + \overline{E(V_4)}_b) \quad (5)$$

Il reste à déterminer les différents temps de déplacements de la machine de déstockage. Pour cette approche, nous basons notre étude sur les travaux de Bozer et White (1984) ainsi que sur les travaux de Peters (1996) où ils ont déterminé le temps moyen de déplacement des machines de stockage et de déstockage entre les différents point du rack.

- Le temps moyen de simple cycle :

$$\overline{E(RC)} = T \cdot \left(\frac{b^2}{3} + 1 \right) \quad (6)$$

- Le temps moyen de déplacement entre un coin du rack et n'importe quel point du rack, et similairement entre n'importe quel point et un coin du rack (Peters, 1996) :

$$\overline{E}_1 = T \cdot \left(\frac{b^2}{6} + \frac{1}{2} \right) \quad (7)$$

- Le temps moyen de déplacement entre le milieu du rack et n'importe quel point du rack, et similairement entre n'importe quel point et le milieu du rack (Peters, 1996) :

$$\overline{E}_2 = \frac{T}{2} \cdot \left(\frac{b^2}{6} + \frac{1}{2} \right) \quad (8)$$

La figure suivante représente la face de déstockage de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel à deux classes. R, représente la limite de la zone de la classe A. La capacité de stockage de la classe A peut être calculée comme étant $N_A = R^2 \cdot M$. Dans notre cas $N_l = N_h$ et $t'_h = t'_v$ de ce fait $t_h = t_v$ et $b = 1$.

Les expressions (6), (7) et (8) deviennent :

$$\overline{E(RC)} = \frac{4}{3} \cdot T \quad (9)$$

$$\overline{E}_1 = \frac{2}{3} \cdot T \quad (10)$$

$$\overline{E}_2 = \frac{1}{3} \cdot T \quad (11)$$

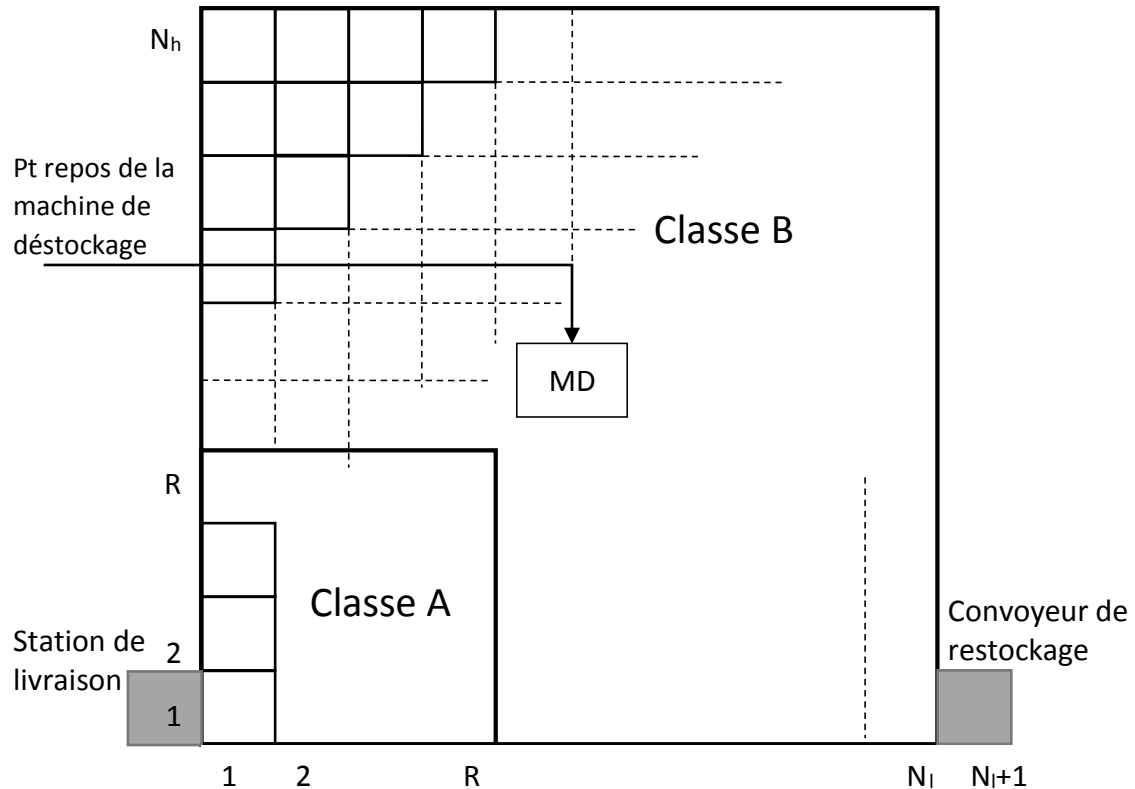


Figure 5.2 : Face de déstockage de l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels.

5.3.1. Calcul du temps moyen de déstockage pour la classe A, $\overline{E(RC)}_a$

L'expression du temps moyen de déstockage pour la classe A, $\overline{E(RC)}_a$ est donnée comme suit :

$$\overline{E(RC)}_a = \overline{E(V_1)}_a + \overline{E(V_2)}_a + m_a \cdot (\overline{E(V_3)}_a + \overline{E(V_4)}_a) \quad (4)$$

1. Calcul du temps par rapport au point de repos, $\overline{E(V_1)}_a$

La détermination du temps de transport entre le point de repos de la machine S/R et le point de déstockage dépend de la position du point de repos de la machine S/R dans l'AS/RS à convoyeur gravitationnel généralement positionné au milieu du rack. Le temps de transport peut être déterminé suivant l'expression (8) de (Peters, 1996) pour l'ensemble du rack. Néanmoins, pour une zone dans le rack, comme la zone de la classe A (figure 5.2), le temps de transport est différent de l'expression (8). Cela dépend de la position du point de repos par rapport à la taille de la zone

de la classe A, comme le montre la figure 5.3. Il y a deux possibilités : la position de point de repos est soit à l'extérieur de la zone de la classe A soit à l'intérieur.

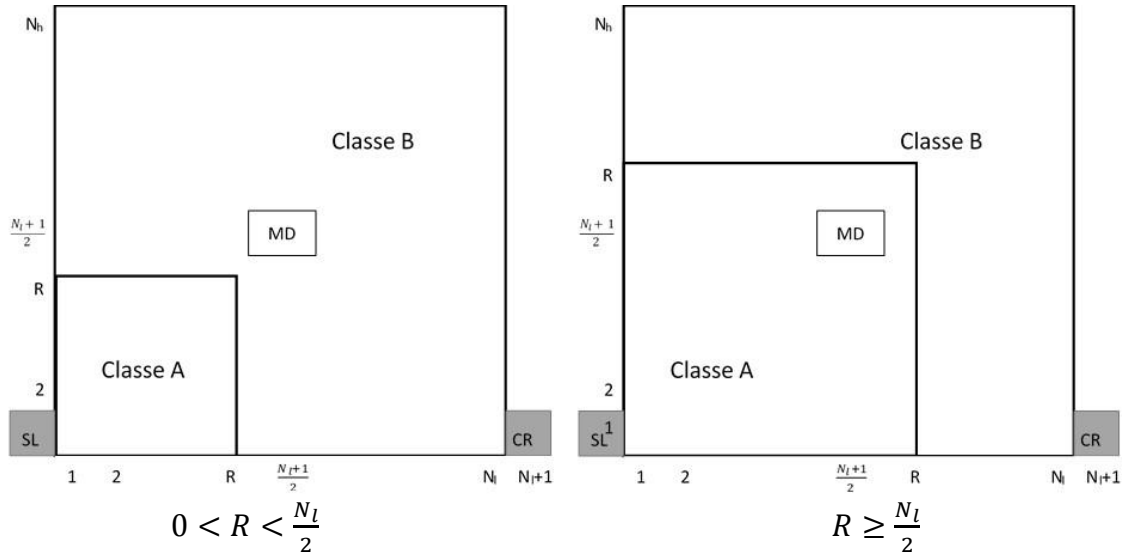
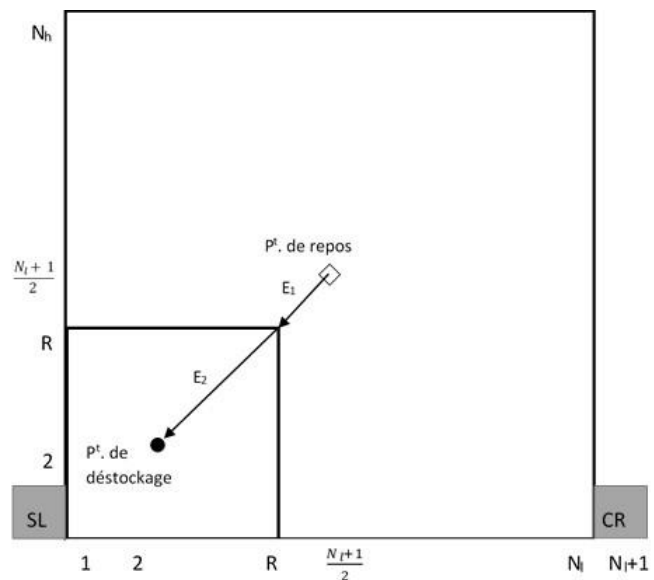


Figure 5.3 : Position du point de repos par rapport à la zone de la classe A.

Donc, le temps moyen par rapport au point de repos peut alors être déterminé comme suit :

$$\overline{E(V1)}_a = \begin{cases} \overline{y1a_1} & \text{si } 0 < R < \frac{N_i}{2} \\ \overline{y1a_2} & \text{si } R \geq \frac{N_i}{2} \end{cases} \quad (12)$$

1^{er} cas : $0 < R < \frac{N_i}{2}$:



Dans ce cas-là, le temps est composé de deux temps $\overline{E1}$ et $\overline{E2}$. Donc :

$$\overline{y1a_1} = \overline{E1} + \overline{E2} \quad (13)$$

$\overline{E1}$ est le temps moyen de déplacement entre le milieu du rack et la limite de la zone de la classe A, nous pouvons le déterminer comme suit :

$$\overline{E1} = t'_h \cdot \left(\frac{N_l}{2} - R \right) \quad (14)$$

$\overline{E2}$ est le temps moyen de déplacement entre un coin et n'importe quel point de la zone de la classe A, nous pouvons le déterminer comme suit :

$$\overline{E2} = t'_h \cdot R \cdot \left(\frac{b^2}{6} + \frac{1}{2} \right) = \frac{2}{3} \cdot t'_h \cdot R \quad (15)$$

En remplaçant dans l'expression (13) par les expressions (14) et (15), nous obtenons :

$$\overline{y1a_1} = t'_h \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot R + \left(\frac{N_l}{2} - R \right) \right) = t'_h \cdot \left(\frac{N_l}{2} - \frac{R}{3} \right) \quad (16)$$

2^{ème} cas : $R \geq \frac{N_l}{2}$

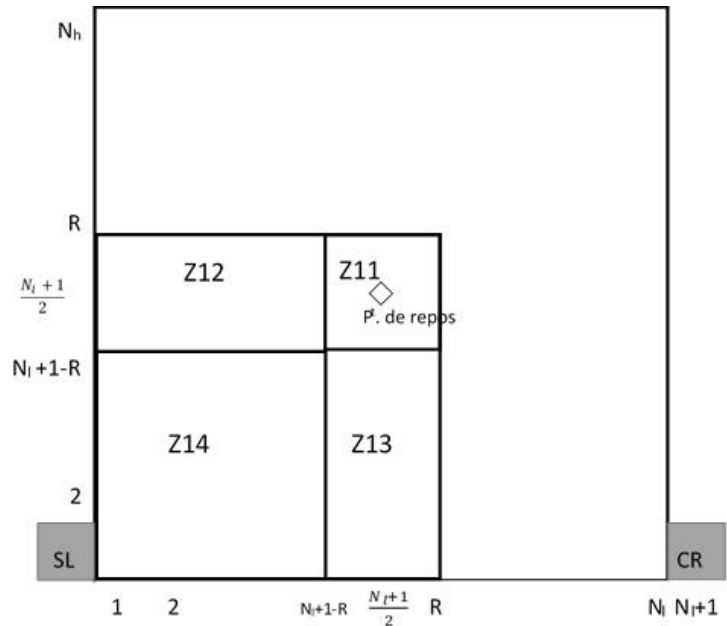
Afin de déterminer le temps moyen de déplacement dans ce cas-là, nous partageons la zone de la classe A en quatre zones où dans chaque zone nous déterminons le temps moyen de déplacement, ce qui est représenté dans la figure suivante où la superficie de chaque zone est déterminée comme suit :

$$z_{11} = (2 \cdot R - N_l)^2$$

$$z_{12} = (N_l - R) \cdot (2 \cdot R - N_l)$$

$$z_{13} = z_{12}$$

$$z_{14} = (N_l - R)^2$$



Dans ce cas-là, le temps moyen de déplacement est le rapport entre la somme du temps moyen de déplacement dans chaque zone multiplié par la superficie de chaque zone respectivement, et la superficie de la zone de la classe A, que l'on peut formuler comme suit :

$$\overline{y1a_2} = \frac{\overline{E11}.z11 + \overline{E12}.z12 + \overline{E13}.z13 + \overline{E14}.z14}{R^2} \quad (17)$$

$\overline{E11}$ est le temps moyen de déplacement entre le milieu du rack et la limite de la zone z11, nous pouvons le déterminer comme suit :

$$\overline{E11} = t'_h \cdot \frac{(2.R - N_l)}{2} \cdot \left(\frac{b^2}{6} + \frac{1}{2} \right) = t'_h \cdot \frac{(2.R - N_l)}{3} \quad (18)$$

$\overline{E12}$ et $\overline{E13}$ sont le temps moyen de déplacement entre le milieu du rack et n'importe quel point des zones z12 et z13 respectivement, nous pouvons le déterminer comme suit :

$$\begin{aligned} \overline{E12} &= t'_h \cdot \left(\left(R - \frac{N_l}{2} \right) + \frac{N_l}{2} \right) / 2 \\ \overline{E13} &= \overline{E12} = t'_h \cdot \frac{R}{2} \end{aligned} \quad (19)$$

$\overline{E14}$ est le temps moyen de déplacement entre le milieu du rack et un coin de la zone z14 plus le temps moyen de déplacement entre le coin et n'importe quel point de la zone z14, nous pouvons le déterminer comme suit :

$$\overline{E14} = t'_h \cdot \left((N_l - R) \cdot \left(\frac{b^2}{6} + \frac{1}{2} \right) + \left(R - \frac{N_l}{2} \right) \right) = t'_h \cdot \left(\frac{N_l}{6} + \frac{2}{3} \cdot R \right) \quad (20)$$

En remplaçant l'expression (17) par les expressions (18), (19) et (20), nous obtenons :

$$\overline{y1a_2} = \frac{1}{6} \cdot t'_h \cdot \frac{6.R^3 - 9.R^2.N_l + 6.R.N_l^2 + N_l^3}{R^2} \quad (21)$$

2. Calcul du temps par rapport à la station de livraison, $\overline{E(V2)_a}$

Dans ce cas-là, la taille de la zone de la classe A n'est pas importante puisque le déplacement se fait à l'intérieur de la zone et que la station de livraison est au coin bas de la zone. Le temps de transport moyen entre le point de déstockage et la station de livraison peut être défini par l'expression (7), le temps moyen peut être déterminé comme suit :

$$\overline{E(V2a)} = t'_h \cdot R \cdot \left(\frac{b^2}{6} + \frac{1}{2} \right) = \frac{2}{3} \cdot t'_h \cdot R \quad (22)$$

3. Calcul du temps par rapport au convoyeur de restockage, $\overline{E(V3)}_a, \overline{E(V4)}_a$

Dans ce cas-là, la taille de la zone de la classe A est importante. Cela dépend de sa taille par rapport au milieu du rack, plus la taille est grande plus on se rapproche du convoyeur de restockage (figure 1.4). Donc, le temps moyen par rapport au convoyeur de restockage peut alors être déterminé comme suit :

$$\overline{E(V3a)} = \overline{E(V4a)} = \begin{cases} \overline{y3a_1} & \text{si } 0 < R \leq \frac{N_l}{2} \\ \overline{y3a_2} & \text{si } R > \frac{N_l}{2} \end{cases} \quad (23)$$

1^{er} cas : $0 < R < \frac{N_l}{2}$:

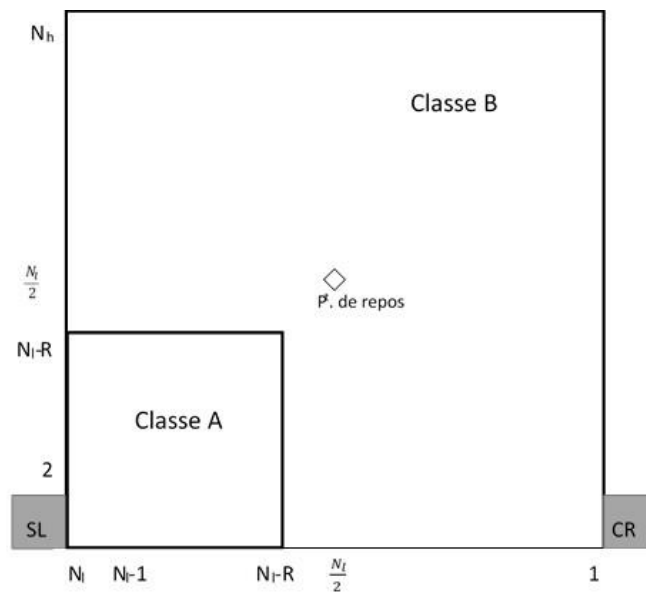


Figure 5.4 : Position du convoyeur de restockage par rapport à la zone de la classe A. Le cas $0 < R < \frac{N_l}{2}$

Dans ce cas-là, le temps moyen de déplacement d'un point de la zone de la classe A vers le convoyeur de restockage et vice versa est donné comme suit :

$$\overline{y3a_1} = t'_h \cdot \frac{(N_l+1-R)+N_l}{2} = t'_h \cdot \frac{2 \cdot N_l+1-R}{2} \quad (24)$$

2^{ème} cas : $R \geq \frac{N_l}{2}$

Afin de déterminer le temps moyen de déplacement dans ce cas-là, nous répartirons la zone de la classe A en trois zones où dans chaque zone nous

déterminons le temps moyen de déplacement. Ce qui est représenté dans la figure suivante où la superficie de chaque zone est déterminée comme suite :

$$\begin{aligned} z31 &= (2.R - N_l)^2 \\ z32 &= (N_l - R). (2.R - N_l) \\ z33 &= R. (N_l - R) \end{aligned}$$

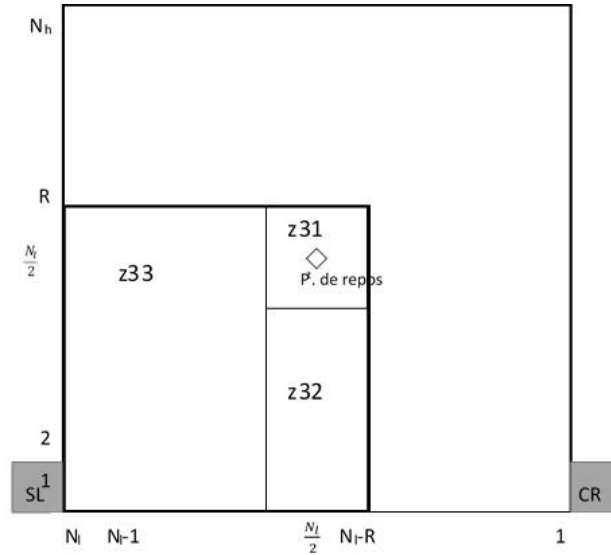


Figure 5.5 : Position du convoyeur de restockage par rapport à la zone de la classe A. Le cas $R \geq \frac{N_l}{2}$

Dans ce cas-là, le temps moyen de déplacement est le rapport entre la somme du temps moyen de déplacement dans chaque zone multiplié par la superficie de chaque zone respectivement, et la superficie de la zone de la classe A, que l'on peut formuler comme suit :

$$\overline{y3a_2} = \frac{\overline{E31}.z31 + \overline{E32}.z32 + \overline{E33}.z33}{R^2} \quad (25)$$

$\overline{E31}$ est le temps moyen de déplacement entre le convoyeur de restockage un coin de la zone z31 plus le temps moyen de déplacement entre le coin et n'importe quel point de la zone z31, nous pouvons le déterminer comme suit :

$$\overline{E31} = t'_h. (2.R - N_l). \left(\frac{b^2}{6} + \frac{1}{2}\right) + t'_h. (N_l - R) = \frac{1}{3}. t'_h. (R + N_l) \quad (26)$$

$\overline{E32}$ et $\overline{E33}$ sont les temps moyen de déplacement entre le convoyeur de restockage et n'importe quel point de la zone z32 (z33 respectivement), nous pouvons le déterminer comme suit :

$$\overline{E32} = t'_h. \frac{(N_l+1-R)+R}{2} = t'_h. \frac{N_l+1}{2} \quad (27)$$

$$\overline{E33} = t'_h \cdot \frac{N_l + 1 + R}{2} \quad (28)$$

En remplaçant l'expression (25) par les expressions (26), (27) et (28), nous obtenons :

$$\overline{y3a_2} = t_h \cdot \frac{5.R^3 + 6.R.N_l^2 - N_l^3 - 6.R^2.N_l + 12.N_l.R - 3.N_l^2 - 9.R^2}{6.R^2} \quad (29)$$

4. Calcul du temps moyen de déstockage pour la classe A, $\overline{E(RC)_a}$

1^{er} cas : $0 < R < \frac{N_l}{2}$:

En remplaçant l'expression (4) par les expressions (16), (22) et (24), l'expression du temps moyen de déstockage pour la classe A, $\overline{E(RC)_a}$ devient comme suit :

$$\overline{E(RC)_a} = t'_h \cdot \left(m_a \cdot (2.N_l + 1 - R) + \frac{N_l}{2} + \frac{R}{3} \right) \quad (30)$$

2^{ème} cas : $R \geq \frac{N_l}{2}$

En remplaçant l'expression (4) par les expressions (21), (22) et (29), l'expression du temps moyen de déstockage pour la classe A, $\overline{E(RC)_a}$ devient comme suit :

$$\overline{E(RC)_a} = \frac{t'_h}{6.R^2} \cdot \left(10.R^3 - 9.R^2.N_l + 6.R.N_l^2 - N_l^3 + \left(2.m_a \cdot (5.R^3 + 6.R.N_l^2 - N_l^3 - 6.N_l.R^2 + 12.N_l.R - 3.N_l^2 - 9.R^2) \right) \right) \quad (31)$$

5.3.2. Calcul du temps moyen de déstockage pour la classe B, $\overline{E(RC)_b}$

L'expression du temps moyen de déstockage pour la classe B, $\overline{E(RC)_b}$ est donné comme suite :

$$\overline{E(RC)_b} = \overline{E(V_1)_b} + \overline{E(V_2)_b} + m_b \cdot (\overline{E(V_3)_b} + \overline{E(V_4)_b}) \quad (5)$$

Le temps moyen de déplacement entre un coin et n'importe quel point du rack, est similairement entre n'importe quel point et un coin du rack (Peters, 1996) :

$$\overline{E1} = t'_h \cdot N_l \cdot \left(\frac{b^2}{6} + \frac{1}{2} \right) = \frac{2}{3} \cdot t'_h \cdot N_l \quad (32)$$

Le temps moyen de déplacement entre le milieu et n'importe quel point du rack, est similairement entre n'importe quel point et le milieu du rack (Peters, 1996) :

$$\overline{E2} = \frac{t'_h \cdot N_l}{2} \cdot \left(\frac{b^2}{6} + \frac{1}{2} \right) = \frac{1}{3} \cdot t'_h \cdot N_l \quad (33)$$

1. Calcul du temps par rapport au point de repos, $\overline{E(V1)}_b$

Le temps moyen de déplacement par rapport au point de repos est la différence entre le temps moyen de déplacement dans un rack multiplié par sa superficie et le temps moyen de déplacement $\overline{E(V1)}_a$ multiplié par la superficie de la zone de la classe A, sur la superficie de la zone de la classe B, que l'on peut formuler comme suit :

$$\overline{E(V1)}_b = \frac{N_l^2 \cdot \overline{E2} - R^2 \cdot \overline{E(V1)}_a}{N_l^2 - R^2} \quad (34)$$

En remplaçant $\overline{E2}$ et $\overline{E(V1)}_a$ par leurs expressions respectives, l'expression (34) devient :

$$\text{1^{er} cas : } 0 < R < \frac{N_l}{2} :$$

$$\overline{E(V1)}_b = \frac{1}{6} \cdot t'_h \cdot \frac{2 \cdot N_l^3 - 3 \cdot R^2 \cdot N_l + 2 \cdot R^3}{N_l^2 - R^2} \quad (35)$$

$$\text{2^{ème} cas : } R \geq \frac{N_l}{2}$$

$$\overline{E(V1)}_b = \frac{1}{2} \cdot t'_h \cdot \frac{N_l^2 - N_l \cdot R + 2 \cdot R^2}{N_l + R} \quad (36)$$

2. Calcul du temps par rapport à la station de livraison, $\overline{E(V2)}_b$

Le temps moyen de déplacement par rapport au point de repos est la différence entre le temps moyen de déplacement dans un rack multiplié par sa superficie et le temps moyen de déplacement $\overline{E(V2)}_a$ multiplié par la superficie de la zone de la classe A, sur la superficie de la zone de la classe B, que l'on peut formuler comme suit :

$$\overline{E(V2)}_b = \frac{N_l^2 \cdot \overline{E1} - R^2 \cdot \overline{E(V2)}_a}{N_l^2 - R^2} \quad (37)$$

En remplaçant $\overline{E1}$ et $\overline{E(V2)}_a$ par leurs expressions respectives, l'expression (37) devient :

$$\overline{E(V2)}_b = \frac{2}{3} \cdot t'_h \cdot \frac{N_l^2 + N_l \cdot R - R^2}{N_l - R} \quad (38)$$

3. Calcul du temps par rapport au convoyeur de restockage, $\overline{E(V3)}_b, \overline{E(V4)}_b$

Le temps moyen de déplacement par rapport au point de repos est la différence entre le temps moyen de déplacement dans un rack multiplié par sa superficie et le temps moyen de déplacement $\overline{E(V3)}_a$ multiplié par la superficie de la zone de la classe A, sur la superficie de la zone de la classe B, que l'on peut formuler comme suit :

$$\overline{E(V3)}_b = \overline{E(V4)}_b = \frac{N_l^2 \cdot \overline{E1} - R^2 \cdot \overline{E(V3)}_a}{N_l^2 - R^2} \quad (39)$$

En remplaçant $\overline{E1}$ et $\overline{E(V3)_a}$ par leurs expressions respectives, l'expression (39) devient :

$$\text{1^{er} cas : } 0 < R < \frac{N_l}{2} :$$

$$\overline{E(V3)_b} = \overline{E(V4)_b} = \frac{1}{6} \cdot t'_h \cdot \frac{4.N_l^3 - 6.R^2.N_l - 3.R^2 + 3.R^3}{N_l^2 - R^2} \quad (40)$$

$$\text{2^{ème} cas : } R \geq \frac{N_l}{2}$$

$$\overline{E(V3)_b} = \overline{E(V4)_b} = \frac{1}{6} \cdot t'_h \cdot \frac{5.N_l^2 + 3.N_l - N_l.R - 9.R + 5.R^2}{N_l + R} \quad (41)$$

4. Calcul du temps moyen de déstockage pour la classe B, $\overline{E(RC)_b}$

$$\text{1^{er} cas : } 0 < R < \frac{N_l}{2} :$$

En remplaçant l'expression (5) par les expressions (35), (38) et (40), l'expression du temps moyen de déstockage pour la classe B, $\overline{E(RC)_b}$ devient comme suit :

$$\overline{E(RC)_b} = \frac{t'_h}{N_l^2 - R^2} \cdot \left(m_b \cdot \left(\frac{4}{3} \cdot N_l^3 - 2 \cdot R^2 \cdot N_l - R^2 + R^3 \right) + N_l^3 + \frac{1}{2} \cdot N_l^2 \cdot R^2 - \frac{1}{3} \cdot R^3 \right) \quad (42)$$

$$\text{2^{ème} cas : } R \geq \frac{N_l}{2}$$

En remplaçant dans l'expression (5) par les expressions (36), (38) et (41), l'expression du temps moyen de déstockage pour la classe B, $\overline{E(RC)_b}$ devient comme suit :

$$\overline{E(RC)_b} = \frac{t'_h}{6 \cdot (N_l + R)} \cdot \left(m_b \cdot \left(10 \cdot N_l^2 + 6 \cdot N_l - 2 \cdot N_l \cdot R - 18 \cdot R + 10 \cdot R^2 \right) + 7 \cdot N_l^2 + N_l \cdot R + 10 \cdot R^2 \right) \quad (43)$$

5.3.3. Calcul du temps moyen de déstockage, $\overline{E(RC)}$

Nous avons vu, auparavant, que le temps moyen de déstockage peut être déterminé comme suit :

$$\overline{E(RC)} = \lambda_a \cdot \overline{E(RC)_a} + \lambda_b \cdot \overline{E(RC)_b} \quad (3)$$

$$\text{Avec } \lambda_a + \lambda_b = 1 \Leftrightarrow \lambda_b = 1 - \lambda_a$$

$$\overline{E(RC)_a} = \overline{E(V1)_a} + \overline{E(V2)_a} + m_a \cdot \left(\overline{E(V3)_a} + \overline{E(V4)_a} \right) \quad (4)$$

$$\overline{E(RC)_b} = \overline{E(V1)_b} + \overline{E(V2)_b} + m_b \cdot \left(\overline{E(V3)_b} + \overline{E(V4)_b} \right) \quad (5)$$

Nous résumons dans le tableau suivant les expressions des différents temps de transport ainsi que le temps moyen de déstockage.

Tableau 1 : Temps de transport par classe pour l'AS/RS à convoyeur gravitationnel

| | |
|---|---|
| 1 ^{er} cas : $0 < R < \frac{N_l}{2}$ | |
| A. | $\overline{E(V1a)} = t'_h \cdot \left(\frac{N_l}{2} - \frac{R}{3} \right)$ $\overline{E(V2a)} = \frac{2}{3} \cdot t'_h \cdot R$ $\overline{E(V3a)} = \overline{E(V4a)} = t'_h \cdot \frac{2 \cdot N_l + 1 - R}{2}$ $\overline{E(RC)}_a = t'_h \cdot \left(m_a \cdot (2 \cdot N_l + 1 - R) + \frac{N_l}{2} + \frac{R}{3} \right)$ |
| B. | $\overline{E(V1)}_b = \frac{1}{6} \cdot t'_h \cdot \frac{2 \cdot N_l^3 - 3 \cdot R^2 \cdot N_l + 2 \cdot R^3}{N_l^2 - R^2}$ $\overline{E(V2)}_b = \frac{2}{3} \cdot t'_h \cdot \frac{N_l^2 + N_l \cdot R - R^2}{N_l - R}$ $\overline{E(V3)}_b = \overline{E(V4)}_b = \frac{1}{6} \cdot t'_h \cdot \frac{4 \cdot N_l^3 - 6 \cdot R^2 \cdot N_l - 3 \cdot R^2 + 3 \cdot R^3}{N_l^2 - R^2}$ $\overline{E(RC)}_b = \frac{t'_h}{N_l^2 - R^2} \cdot \left(m_b \cdot \left(\frac{4}{3} \cdot N_l^3 - 2 \cdot R^2 \cdot N_l - R^2 + R^3 \right) + N_l^3 + \frac{1}{2} \cdot N_l^2 \cdot R^2 - \frac{1}{3} \cdot R^3 \right)$ |
| $\overline{E(RC)} = \frac{t'_h}{N_l^2 - R^2} \cdot \left(\lambda_a \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot N_l^3 + \frac{1}{3} \cdot R \cdot N_l^2 + m_a \cdot (2 \cdot N_l^3 - 2 \cdot N_l \cdot R^2 + N_l^2 - R^2 - R \cdot N_l^2 + R^3) + m_b \cdot \left(2 \cdot R^2 \cdot N_l - \frac{2}{3} \cdot N_l^3 + R^2 - R^3 \right) \right) + 6 \cdot N_l^3 - 3 \cdot R^2 \cdot N_l - 2 \cdot R^3 + m_b \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot N_l^3 - 2 \cdot R^2 \cdot N_l - R^2 + R^3 \right) \right)$ | |
| 2 ^{ème} cas : $R \geq \frac{N_l}{2}$ | |
| A. | $\overline{E(V1a)} = \frac{1}{6} \cdot t'_h \cdot \frac{6 \cdot R^3 - 9 \cdot R^2 \cdot N_l + 6 \cdot R \cdot N_l^2 + N_l^3}{R^2}$ $\overline{E(V2a)} = \frac{2}{3} \cdot t'_h \cdot R$ $\overline{E(V3a)} = \overline{E(V4a)} = t'_h \cdot \frac{5 \cdot R^3 + 6 \cdot R \cdot N_l^2 - N_l^3 - 6 \cdot R^2 \cdot N_l + 12 \cdot N_l \cdot R - 3 \cdot N_l^2 - 9 \cdot R^2}{6 \cdot R^2}$ $\overline{E(RC)}_a = \frac{t'_h}{6 \cdot R^2} \cdot \left(10 \cdot R^3 - 9 \cdot R^2 \cdot N_l + 6 \cdot R \cdot N_l^2 - N_l^3 + \left(2 \cdot m_a \cdot (5 \cdot R^3 + 6 \cdot R \cdot N_l^2 - N_l^3 - 6 \cdot N_l \cdot R^2 + 12 \cdot N_l \cdot R - 3 \cdot N_l^2 - 9 \cdot R^2) \right) \right)$ |

| | |
|---|--|
| B. | $\overline{E(V1)}_b = \frac{1}{2} \cdot t'_h \frac{N_l^2 - N_l \cdot R + 2 \cdot R^2}{N_l + R}$ $\overline{E(V2)}_b = \frac{2}{3} \cdot t'_h \cdot \frac{N_l^2 + N_l \cdot R - R^2}{N_l - R}$ $\overline{E(V3)}_b = \overline{E(V4)}_b = \frac{1}{6} \cdot t'_h \cdot \frac{5 \cdot N_l^2 + 3 \cdot N_l \cdot R - 9 \cdot R + 5 \cdot R^2}{N_l + R}$ $\overline{E(RC)}_b = \frac{t'_h}{6 \cdot (N_l + R)} \cdot (m_b \cdot (10 \cdot N_l^2 + 6 \cdot N_l \cdot R - 2 \cdot N_l \cdot R - 18 \cdot R + 10 \cdot R^2) + 7 \cdot N_l^2 + N_l \cdot R + 10 \cdot R^2)$ |
| $\overline{E(RC)} = \frac{t'_h}{R^2 \cdot (N_l + R)} \cdot \left(\lambda_a \cdot \left(\frac{5}{3} \cdot R^2 \cdot N_l^2 - \frac{5}{6} \cdot R \cdot N_l^3 + \frac{1}{6} \cdot N_l^4 + m_a \cdot (N_l^3 - N_l \cdot R^2 - 2 \cdot R \cdot N_l^2 + 2 \cdot R^3 + \frac{1}{3} \cdot N_l^4 + \frac{1}{6} \cdot R^3 \cdot N_l - \frac{5}{3} \cdot R \cdot N_l^3 - \frac{5}{3} \cdot R^4) + m_b \cdot (R^2 \cdot N_l - 2 \cdot R^3 + \frac{5}{3} \cdot R^2 \cdot N_l^2 - \frac{1}{3} \cdot R^3 \cdot N_l + \frac{5}{3} \cdot R^4) \right) - \frac{7}{6} \cdot R^2 \cdot N_l^2 - \frac{1}{6} \cdot R^3 \cdot N_l - \frac{5}{3} \cdot R^4 + m_b \cdot (2 \cdot R^3 - R^2 \cdot N_l - \frac{5}{3} \cdot R^2 \cdot N_l^2 + \frac{1}{3} \cdot R^3 \cdot N_l - \frac{5}{3} \cdot R^4) \right)$ | |

Le temps moyen de déstockage dépend du taux de la demande des produits, λ_a et λ_b . Selon la méthode de Pareto, pour classer les différentes références de produits, 20% de références de produits représentent 80% de la demande, selon la loi 20/80 (Petersen et al., 2004). Ainsi, la répartition dénommée « 20%/80% » indique que 20% des références présentes dans le rack représentent 80% du trafic en entrée et en sortie. Dans ce cas là, le taux de la demande des produits de la classe A, λ_a est de 0,80 et le taux de la demande des produits de la classe B, λ_b est de 0,20. Ainsi le temps moyen de déstockage peut être déterminé comme suit :

$$\overline{E(RC)} = 0,8 \cdot \overline{E(RC)}_a + 0,2 \cdot \overline{E(RC)}_b \quad (44)$$

5.4. Modélisation par simulation

La simulation, selon Robert E. Shannon (1975), est « le processus de conception d'un modèle d'un vrai système et d'entreprendre des expériences avec ce modèle dans le but de comprendre le comportement du système ou d'évaluer diverses stratégies (dans les limites imposées par un critère ou par un ensemble de critères) pour le fonctionnement du système ».

La simulation est l'un des outils les plus puissants disponibles chez les personnes responsables de la conception et du fonctionnement des processus et des systèmes complexes. Elle rend l'étude, l'analyse et l'évaluation possibles dans des situations qui ne seraient pas autrement possibles. Dans un monde de plus en plus

concurrentiel, la simulation est devenue une méthodologie indispensable de résolution des problèmes pour des ingénieurs, des chercheurs, des analystes, des concepteurs et des directeurs. La simulation est l'imitation de l'opération d'un temps fini réel de processus ou de système. (Banks 1998, 1999)

Arena/SIMAN est un logiciel de simulation, dédié à la modélisation, la simulation et l'animation des systèmes de production. Le logiciel est basé sur les concepts de programmation orientée objet et de modélisation hiérarchique, utilisant la puissance et la flexibilité de modélisation du système SIMAN/Cinema. (Hammann, 1995), (Sadowski, 1999).

Arena permet de réaliser chacune des étapes d'un projet (Kelton, 1998):

- La description graphique du flux et la notion de hiérarchie permettent de décrire et d'organiser les différents processus.
- Les outils d'analyse de données permettent de consolider des données réelles pour les rendre exploitables par l'outil.
- Les fonctions d'animation aident à visualiser le comportement du système, afin de comprendre son comportement et pour pouvoir expliquer simplement les phénomènes observés.
- Les rapports générés permettent de partager les résultats avec la plupart des applications Bureautiques standards du marché (Formats Word, Excel, Access, HTML...).

Dans ce paragraphe, nous proposons de développer un modèle de simulation en utilisant le logiciel Arena/SIMAN pour calculer le temps moyen de déstockage pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel à 2-classes. L'algorithme proposé permet de calculer le temps de déstockage. Dans Arena, il y a une variable nommée IDSNET qui permet de donner le temps de déplacement d'un point à un autre suivant un réseau de transport

Algorithme : Calcul du temps moyen de déstockage

Initialisation des variables

- 1 limite_casier \leftarrow valeur numérique ; nombre de casiers dans la classe A.
- 2 NbCasiers \leftarrow valeur numérique ; nombre de casiers dans le rack.
- 3 RefCouloir[valeur numérique] \leftarrow Numéro des casiers classés par rapport à leurs distance, par rapport à la station de livraison et le convoyeur de restockage ;
- 4 couloir [valeur numérique] \leftarrow 0 ; nombre de produits par casier

- 5 Alea, Rang \leftarrow 0 ;
- 6 ev1, ev2, ev3, Erc \leftarrow 0;
- 7 Déclaration du trasporteur, du réseau de transport et des liens entre les différentes intersections de chaque station ;
- 8 indice, classe, couche \leftarrow attribut ;
- 9 IL \leftarrow point d'intersection de la station de livraison ;
- 10 ICR \leftarrow point d'intersection du convoyeur de restockage ;
- 11 PtRepos \leftarrow point de repos de la machine de déstockage ;
- 12 Pt_int \leftarrow point de déstockage ;

Programme principal

```
1  i  $\leftarrow$  0 ; i est une opération de
   stockage
2  While (i < arrondi(NbCasiers*0.75)) do
3      Alea  $\leftarrow$  arrondi(Uniforme(0.5, NbCasiers+0.5)) ; générer
   aléatoirement une valeur suivant la loi de distribution uniforme
4      indice  $\leftarrow$  RefCouloir(Alea) ; lui attribuer un numéro de casier
5      If couloir(indice) < 10 then ; le nombre maximal de produits par
   casier est 10
6          couloir(indice)  $\leftarrow$  couloir(indice)+1 ; stocker le produit dans le
   casier
7      else
8          go to (3) ;
9      end if
10     i  $\leftarrow$  i+1 ;
11 end while ;
12 i  $\leftarrow$  0 ; i est une opération de déstockage
13 While (i < 1000000) do
14     Executer Retrieval();
15     i  $\leftarrow$  i+1 ;
16 end while ;
```

Procédure de déstockage

Procedure Retrieval();

1 **For** chaque minute **do**

2 Créer une entité ;

3 classe \leftarrow Uniforme(0,1) \leq 0.6 ; Attribuer à l'entité une
 classe

4 Alea \leftarrow arrondi(Uniforme(0.5,NbCasiers+0.5)) ;

5 indice \leftarrow RefCouloir(Alea) ; Attribuer un numéro de casier pour
 déstocker

6 Rang \leftarrow arrondi(Uniforme(0.5,couloir(indice)+0.5)) ; Attribuer
 l'emplacement du produit à destocker

7 Pt_int \leftarrow point de déstockage suivant le numéro de l'indice ;

8 ev1 \leftarrow temps de déplacement entre Pt_int et PtRepos ;

9 ev2 \leftarrow temps de déplacement entre Pt_int et IL ;

10 ev3 \leftarrow temps de déplacement entre Pt_int et ICR ;

11 Erc \leftarrow ev1+ev2+2*(Rang-1)*ev3 ; calcul du temps de
 déstockage

12 couloir(indice) \leftarrow couloir(indice)-Rang ; déstocker les produits du
 casier

13 Executer **Storage()** ;

12 **End For**

END

Procédure de stockage

Procedure Storage();

1 **For** i=1 **to** Rang **do**

2 Alea \leftarrow ANINT(UNIF(0.5,NbCasiers+0.5)) ;

3 indice \leftarrow RefCouloir(Alea) ;

4 **If** couloir(indice) $<$ 10 **then**;

5 couloir(indice) \leftarrow couloir(indice)+1 ;

6 **Else**

7 go to (2) ;

8 **End if**
9 **End For**
END

5.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modéliser les temps moyens de stockage et de déstockage d'un système automatisé de stockage/déstockage à convoyeur gravitationnel. Nous avons proposé deux modèles.

En premier, nous avons proposé une modélisation analytique qui est basée sur la moyenne de tout les temps de transport entre les casiers et les stations de depot/livraison et le convoyeur de restockage. En se basant sur les travaux de Bozer et White (1984) et les travaux de Peters (1996), nous avons pu déterminer l'expression analytique du temps moyen de déstockage. Néanmoins, l'expression développée est si compliquée et longue que nous proposons de la simplifier dans les prochains travaux.

Le second est la modélisation par simulation où nous avons utilisé le logiciel de simulation Arena. Cette partie a permis de présenter l'AS/RS à convoyeur gravitationnel à deux classes qui va être utilisé pour calculer le temps moyen de déstockage. Cette partie nous permettra dans les prochaines parties du travail, de tester un très grand nombre de paramètres et de valeurs afin d'étudier les performances de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel

5.6. Références Bibliographiques

- Banks J., (1998). Handbook of simulation, Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. *John Wiley & Sons, Inc. New York.*
- Banks, J., (1999). INTRODUCTION TO SIMULATION. *The 1999 Winter Simulation Conference*. AutoSimulations, Inc. Atlanta, GA 30067, U.S.A. pp 7-13.
- Bozer, Y. A., & White, J. A. (1984). Travel time models for automated storage/retrieval systems. *IIE Transactions* , 16 (4), 329-338.
- Hamman, J. E., markovitch, N. A., (1995). INTRODUCTION TO ARENA®, *Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference*, pp. 519-523; 462-463.
- Kelton W.D., Sadawski R.P., (1998). Simulation with arena, *WCB Mc Graw-Hill, Boston.*

- Peters, B. A., Smith, J. S., & Hale, T. S. (1996). Closed form models for determining the optimal dwell point location in automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research* , 34 (6), 1757-1771.
- Petersen, C.G., Aase, G. & Heiser, D.R. (2004). Improving order-picking performance through the implementation of class-based storage. *International Journal of Physical and Logistics Management* 34(7), p.534-544.
- Sadowski, D., Bapat, V., (1999). The Arena Product Family: Enterprise Modeling Solutions, *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, pp. 159-166.
- Sari, Z., (2003). *Modélisation, Analyse et Evaluation des Performances d'un AS/RS à Convoyeur Gravitationnel*, Thèse de Doctorat d'état, LAT, Université de Tlemcen.
- Shannon, R. E., (1998). Introduction To The Art And Science Of Simulation. *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, pp 7-14

Chapitre 6

Impact du stockage par classe sur les performances de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel

| | |
|---|-----|
| 6.1. <i>Introduction</i> | 99 |
| 6.2. <i>Impact de la disposition des casiers dédiés aux classes sur le temps de stockage/déstockage</i> | 100 |
| 6.3. <i>Impact du nombre de classes sur le temps de stockage/déstockage</i> | 115 |
| 6.4. <i>Conclusion</i> | 118 |
| 6.5. <i>Références Bibliographiques</i> | 118 |

6.1. Introduction

Plusieurs travaux ont également démontré que le stockage par classes permet une réduction considérable en temps de déstockage par rapport aux autres méthodes de stockage telles que le stockage dédié et le stockage aléatoire. Dans la plupart de ces recherches, l'AS/RS utilisé est toutefois à charge unitaire. Or, nous allons voir dans les exemples suivants que la profondeur du rack modifie la pertinence des résultats proposés.

Les résultats de ces travaux ne sont plus valables dans le cas d'un AS/RS à convoyeurs gravitationnels où chaque casier est profond de m couches. En effet, le nombre d'articles différents stockés dans le même casier peut ralentir le déstockage du produit requis par une multiplication des restockages. De ce fait, il semble pertinent de prendre en compte non seulement la position de la station de livraison, mais également la position du couloir de retour dans la disposition géographique des classes.

6.2. Impact de la disposition des casiers dédiés aux classes sur le temps de stockage/déstockage

Tout comme (Eynan et Rosenblatt, 1994), nous avons choisi la méthode de (Hausman et al., 1976) pour déterminer le nombre de casiers à dédier par classes. Cette méthode a été développée pour un rack à charge unitaire. Ce qui explique la position des classes (figures 6.3 et 6.4), dessinant des arcs de cercles autour de la station de livraison (Guenov et Raeside, 1992). De ce fait, nous allons adapter la disposition des classes pour prendre en compte la position du convoyeur de restockage et la profondeur du rack.

6.2.1. Disposition géographique des casiers dédiés aux classes dans les AS/RS

Selon la politique du stockage par classes, les articles dans l'entrepôt sont divisés en groupes basés sur leur fréquence d'entrée/sortie (E/S). Ces groupes d'articles sont assignés à une région (classe) où le nombre de régions est égal au nombre de groupes. L'attribution des groupes d'articles aux régions est faite selon la fréquence d'entrée/sortie. Ainsi, la région dont découle le plus faible temps moyen de déstockage (restockages compris) est assignée au groupe d'articles avec la fréquence la plus élevée. Cette région est placée proche de la station d'entrée/sortie (E/S). Ce processus continue jusqu'à ce que la région donnant le plus fort temps moyen de déstockage soit assignée au groupe d'articles avec la plus basse fréquence. Cette région est placée loin de la station d'entrée/sortie. (Figure 6.1)

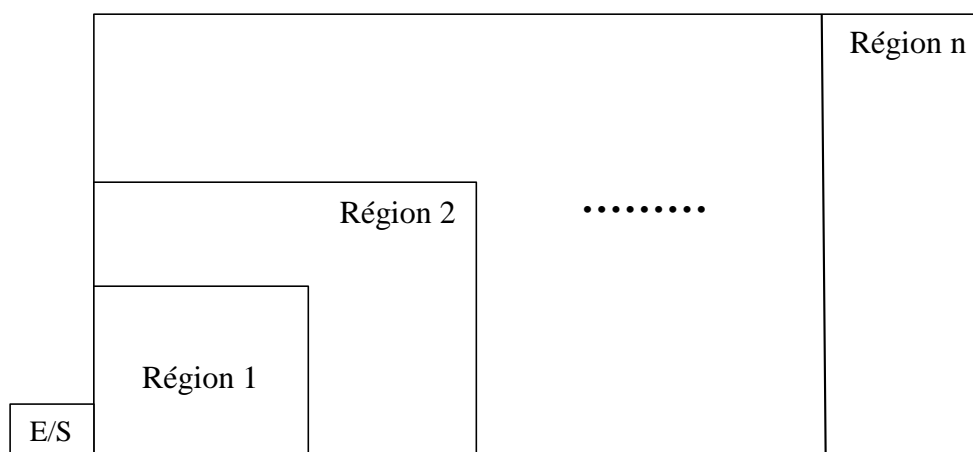


Figure 6.1 : Disposition géographique des classes.

L'analyse ABC permet de ranger tous les articles dans un inventaire par leur contribution à la demande totale et les classer en groupe (classe), la classe A représentant les articles à fort débit, la classe B les articles de moyen débit, et la classe C les articles à faible débit. La courbe ABC représente le pourcentage cumulé de la demande, $G(i)$, par rapport au pourcentage d'articles de l'inventaire, i .

Hausman et al., (Hausman et al., 1976) représentent la courbe ABC (figure 6.2) par la fonction :

$$G(i) = i^s \quad \text{avec } 0 < s \leq 1 \quad (1)$$

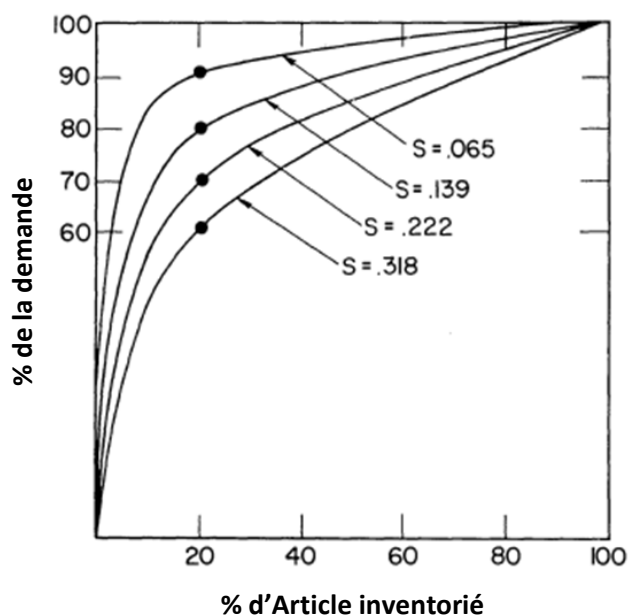


Figure 6.2 : Courbe ABC.

Chaque région i (classe i) dans un AS/RS est caractérisée par le pourcentage cumulé de la demande par rapport à l'inventaire des articles, G_i . Et la distance entre la station de livraison et la région i , R_i . la relation entre G_i et R_i est définie comme suit (Hausman et al., 1976), (Rosenblatt et Eynan, 1989) et (Eyan et Rosenblatt, 1994) :

$$G_i = R_i^{\frac{4s}{s+1}} \quad (2)$$

Le tableau 1 représente pour chaque courbe ABC, la valeur du coefficient s et de R_i , R pour 2 classes (figure 6.3) et R_1 et R_2 pour 3 classes (figure 6.4) en fonction du taux de rotation de la classe A. Ainsi, la répartition dénommée « 20%/60% »

indique que 20% des références présentes dans le rack représentent 60% du trafic en entrée et en sortie.

Tableau 1 : Coefficients de (Hausman et al., 1976)

| Courbe ABC | S | 2-classes | 3-classes | |
|------------|-------|-----------|-----------|-------|
| | | R | R1 | R2 |
| 20%/60% | 0.318 | 0.408 | 0.10 | 0.575 |
| 20%/80% | 0.139 | 0.285 | 0.075 | 0.45 |
| 20%/90% | 0.065 | 0.181 | 0.05 | 0.40 |

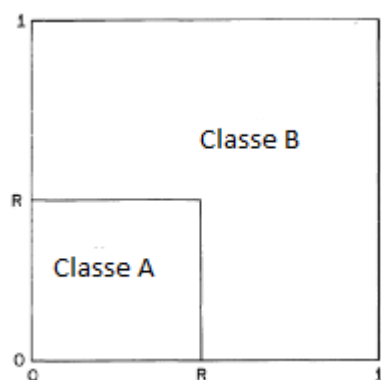


Figure 6.3 : Rack à 2-classes.

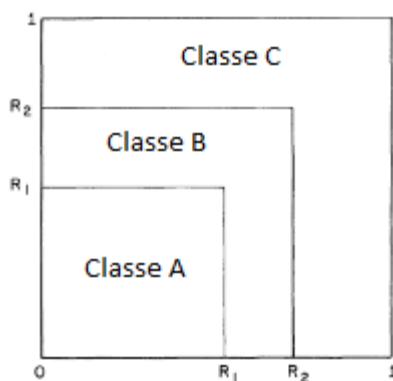


Figure 6.4 : Rack à 3-classes.

6.2.2. Configuration de l'AS/RS à Convoyeur Gravitationnel

L'AS/RS à convoyeurs gravitationnels est composé essentiellement d'un rack profond, de deux machines (une machine de stockage (MS) et une machine de déstockage (MD)), de deux stations (une station de dépôt et une station de livraison) et d'un convoyeur de restockage.

Pour le déstockage d'un produit (P) positionné dans l'emplacement m ($m < M$) d'un casier, la machine de déstockage (MD) déstocke successivement tous les produits qui le précèdent et les dépose au convoyeur de re-stockage où ils seront pris en charge par la machine de stockage (MS) pour le restockage. Ensuite, la machine de déstockage (MD) récupère le produit (P) et le dépose à la station de livraison.

Pour stocker ou restocker un produit, la machine de stockage (MS) le récupère à la station de dépôt ou au convoyeur de restockage et le dépose dans un casier de la face avant du rack (face stockage).

A faible taux de fonctionnement, les machines de stockage/déstockage sont souvent libres et souvent à leurs points de repos. De ce fait, les temps de stockage/déstockage sont composés de plusieurs temps de déplacement des machines vers différents points du système.

a) Stockage :

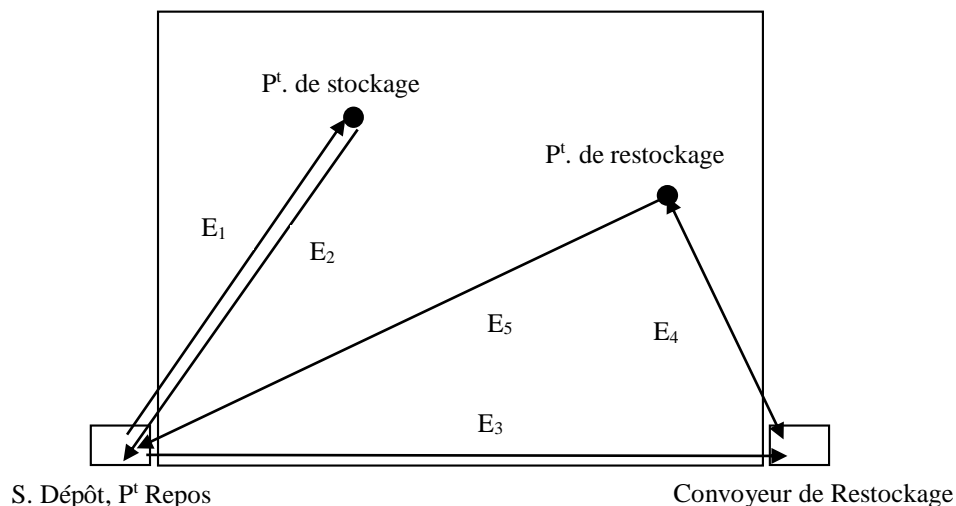


Figure 6.5. : Face stockage du rack.

Le temps de déplacement de la machine de stockage peut s'écrire, tel qu'il est illustré dans la figure 6.5., comme suit :

$$E_{SC} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 \quad (3)$$

Où :

- E_1 : temps de déplacement de la station de dépôt vers le point de stockage ;
- E_2 : temps de déplacement du point de stockage vers la station de dépôt ;
- E_3 : temps de déplacement de la station de dépôt vers le convoyeur de restockage ;
- E_4 : temps de déplacement du point de restockage vers le convoyeur de restockage ;
- E_5 : temps de déplacement du point de restockage vers le point de repos.

b) Déstockage

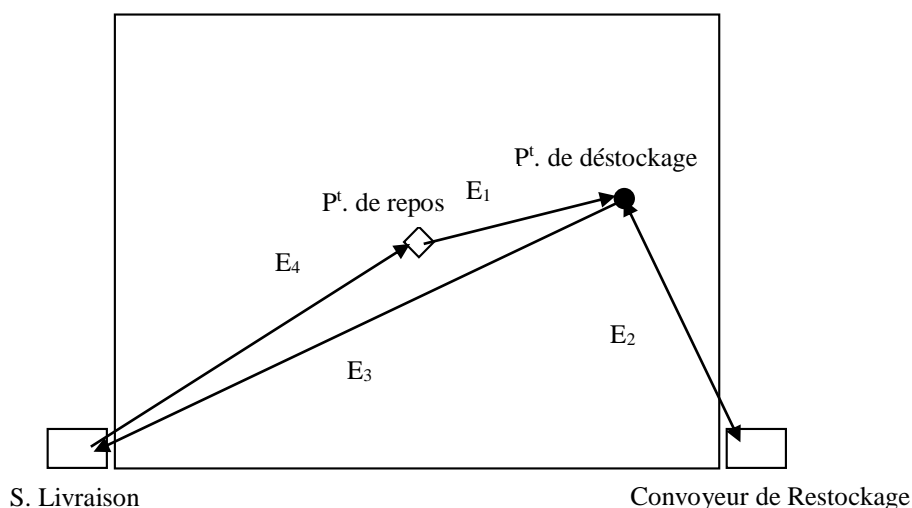


Figure 6.6. : Face de déstockage du rack.

Le temps de déplacement de la machine de déstockage peut s'écrire tel qu'il est illustré dans la figure 6.6., ainsi :

$$E_{RC} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \quad (4)$$

Où :

- E_1 : temps de déplacement du point de repos vers le point de déstockage ;
- E_2 : temps de déplacement du point de déstockage vers le convoyeur de restockage ;
- E_3 : temps de déplacement du point de déstockage vers la station de livraison ;
- E_4 : temps de déplacement de la station de livraison vers le point de repos ;

Nous constatons que la machine de déstockage (MD) peut avoir plusieurs fois recours au déplacement de produits vers le convoyeur de re-stockage afin

d'atteindre le produit désiré. Ce qui fera accroître le temps de déplacement. Quant à la machine de stockage, non seulement elle doit stocker les produits qui arrivent de la station de dépôt, mais aussi elle se charge de re-stocker les produits qui arrivent du convoyeur de re-stockage. Par conséquent, la disposition des classes donnée par Hausman et al., (Hausman et al., 1976) n'est pas valable pour l'AS/RS à convoyeur gravitationnel.

D'après (Hausman et al., 1976), (Rosenblatt et Eynan, 1989) et (Eyan et Rosenblatt, 1994) la configuration de la classe A dans un rack est carrée. Néanmoins, les études qui ont été faites sont pour un AS/RS à charge unitaire ce qui explique la position des classes (Figures 6.3 et 6.4). Pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel, c'est autre chose : le rack du système est profond et le convoyeur de restockage influence sur les résultats du temps moyen de déstockage. De ce fait, nous allons adapter la disposition des classes pour prendre en compte la position du convoyeur de restockage et la profondeur du rack.

6.2.3. Validation expérimentale

L'objet de cette partie est d'évaluer le temps moyen de stockage/déstockage du système en fonction de la politique de stockage considérée en prenant en compte la configuration du système, l'emplacement des classes et leurs tailles, la distance entre la station de livraison et la région i , R_i . Pour cela, nous allons étudier, par simulation à événements discrets (logiciel Arena), le comportement du système vis-à-vis d'une demande stochastique.

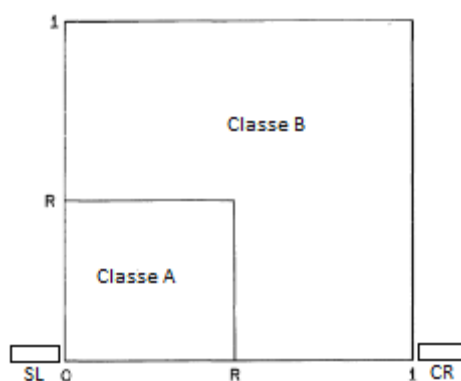


Figure 6.7 : AS/RS à convoyeur gravitationnel à 2-classes.

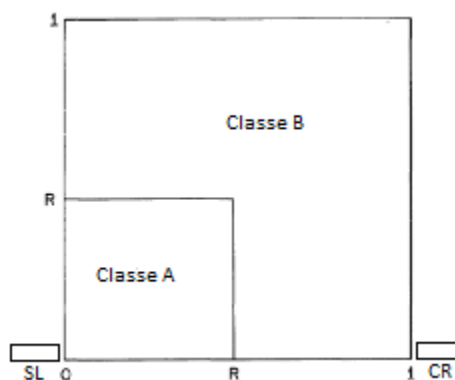
Nous avons considéré quatre modèles d'AS/RS à convoyeur gravitationnel à 625 casiers à 2-classes (figure 6.7). La position du point de repos de la machine de déstockage est au milieu du rack et celle de la machine de stockage est la station de

dépôt. Le nombre de casiers pour les deux classes est identique pour les quatre modèles.

1. Modèle M1 :

La classe A est carrée et près de la station de livraison, c'est la configuration donnée par (Hausman et al., 1976), (Rosenblatt et Eynan, 1989) et (Eyan et Rosenblatt, 1994)

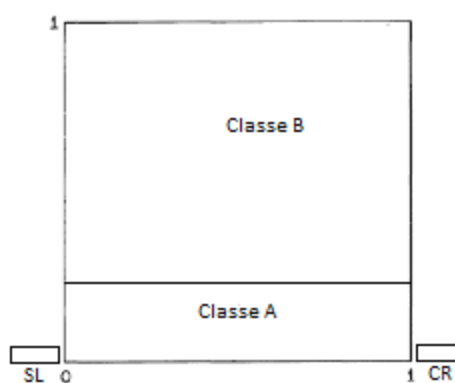
Figure 6.8 : Modèle M1.



2. Modèle M2 :

La région dédiée à la classe A est fixée sur les casiers reliant la station de livraison au convoyeur de restockage, c'est-à-dire aux lignes du bas du système dans notre application.

Figure 6.9 : Modèle M2.



3. Modèle M3 :

Puisque dans un AS/RS, nous avons plusieurs fois des déplacements du produit vers le convoyeur de re-stockage afin d'atteindre le produit désiré, la classe A est carrée et mise près du convoyeur de restockage.

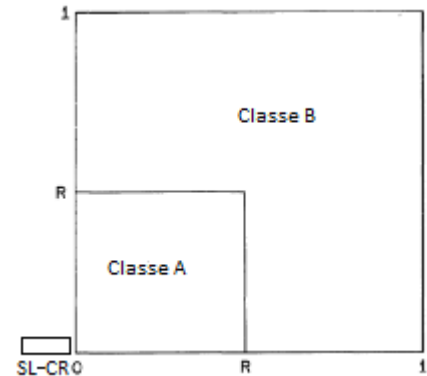
Figure 6.10 : Modèle M3.



4. Modèle M4 :

Pour ce modèle, nous avons reconsidéré l'emplacement du convoyeur de restockage, en le positionnant au même emplacement que la station de livraison reliant la station de livraison à la station de dépôt.

Figure 6.11 : Modèle M4.



6.2.4. Résultats et interprétations

En plus de la distance entre la station de livraison et la région i , R_i , la taille des classes présentes dans le système, R_i^2 , nous faisons varier le taux de rotation des produits de la classe A : 20%/60%, 20%/80% et 20%/90%.

Les résultats données dans les figures suivantes concernent l'influence de la distance entre la station de livraison et la classe A pour les quatre modèles.

1. Modèle M1 :

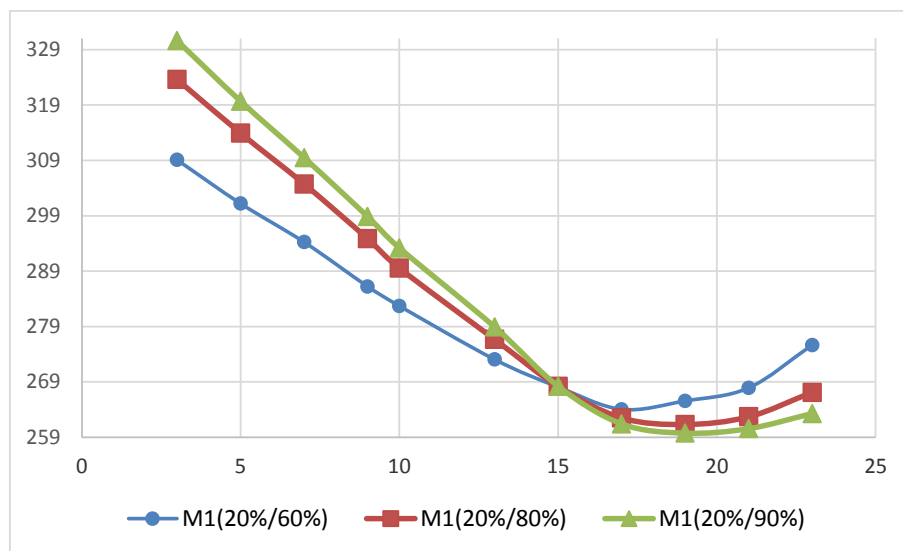


Figure 6.12 : Temps moyen de déstockage par rapport aux taux de rotation et R_i pour le modèle M1.

Nous constatons que plus la taille de la classe A augmente plus le temps moyen de déstockage diminue. Par contre, ce n'est pas le cas pour le temps moyen de

stockage où plus la taille de la classe A augmente, plus le temps moyen augmente. Ceci est dû au convoyeur de restockage. Lorsque la taille de la classe est grande, les casiers de la classe A se rapprochent du convoyeur de restockage et la distance entre le convoyeur de restockage et le point de déstockage diminue. Ainsi, nous avons une diminution du temps de déstockage pour le restockage.

En plus, plus il y a de stockage de produits de la classe A par rapport à la classe B, plus le temps est favorable pour un taux de rotation (20%/90%). Par contre, pour le déstockage le taux de rotation (20%/60%) est intéressant pour des $R_i \leq 15$. Au-delà de 15, le taux de rotation (20%/90%) est intéressant.

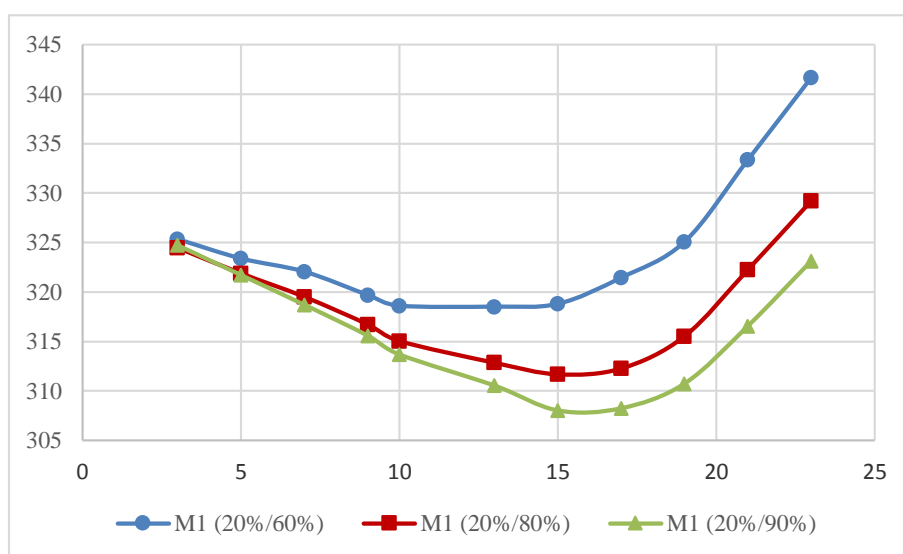


Figure 6.13 : Temps moyen de stockage par rapport aux taux de rotation et R_i pour le modèle M1.

2. Modèle M2 :

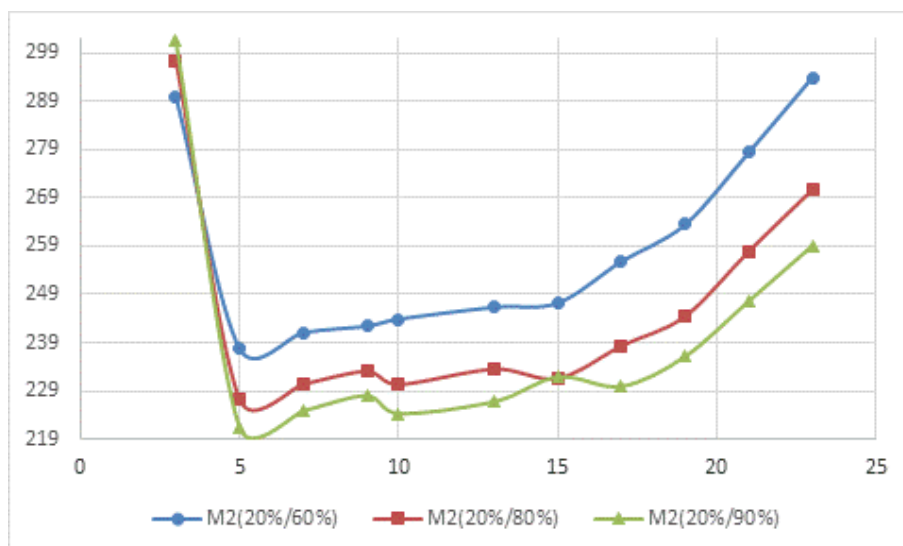


Figure 6.14 : Temps moyen de déstockage par rapport aux taux de rotation et R_i pour le modèle M2.

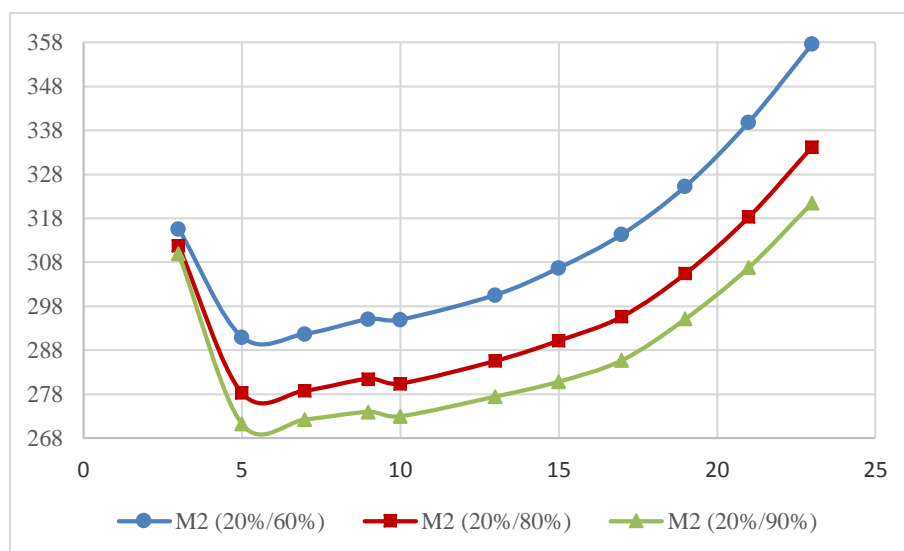


Figure 6.15 : Temps moyen de stockage par rapport aux taux de rotation et R_i pour le modèle M2.

Nous constatons qu'à partir de $R_i=5$, le temps moyen de stockage et le temps moyen de déstockage augmentent. Ce qui est tout à fait normal puisque nous allons avoir du stockage/déstockage dans des casiers (classe A) qui sont loin de la station de dépôt, de la station de livraison et du convoyeur de restockage. La taille optimal de la classe A est de 25.

Le taux de rotation (20%/90%) est favorable par rapport aux autres taux de rotation.

3. Modèle M3 :

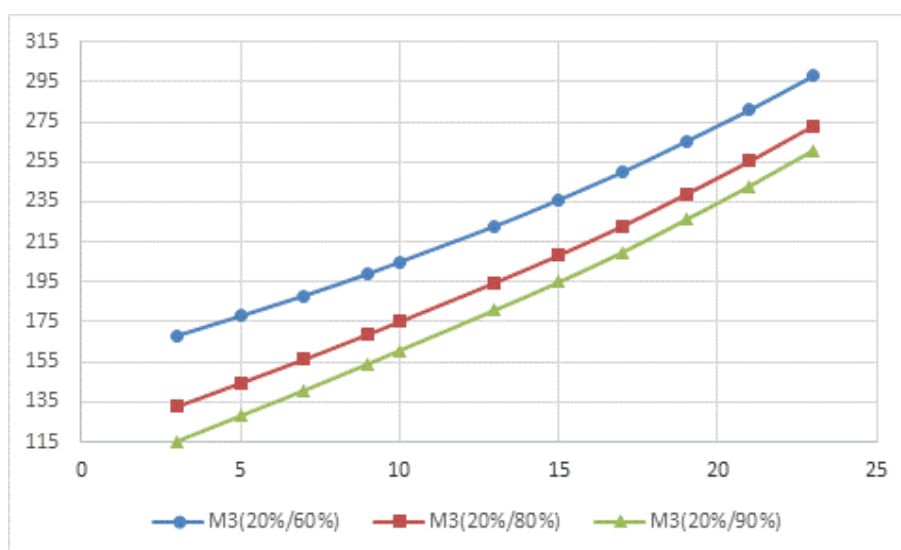


Figure 6.16 : Temps moyen de déstockage par rapport aux taux de rotation et R_i pour le modèle M3.

Nous constatons dans ce modèle que plus le R_i augmente plus le temps moyen de déstockage et le temps moyen de stockage augmentent. Néanmoins, ces temps restent meilleurs que les autres modèles. En plus, le taux de rotation (20%/90%) est intéressant par rapport aux autres taux de rotation.

Dans ce modèle, les casiers de la classe A sont placés près du convoyeur de restockage. Plus R_i augmente plus la taille augmente, plus nous avons du stockage/déstockage dans des casiers qui se trouvent loin du convoyeur de restockage et près de la station de dépôt et la station de livraison. De ce fait les temps augmentent mais ceci n'influence pas beaucoup.

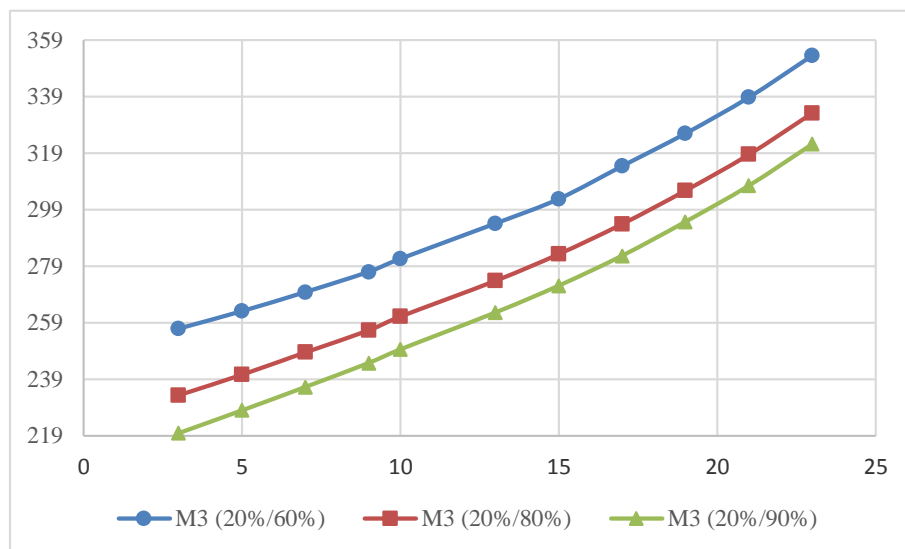


Figure 6.17 : Temps moyen de stockage par rapport aux taux de rotation et R_i pour le modèle M3.

4. Modèle M4 :

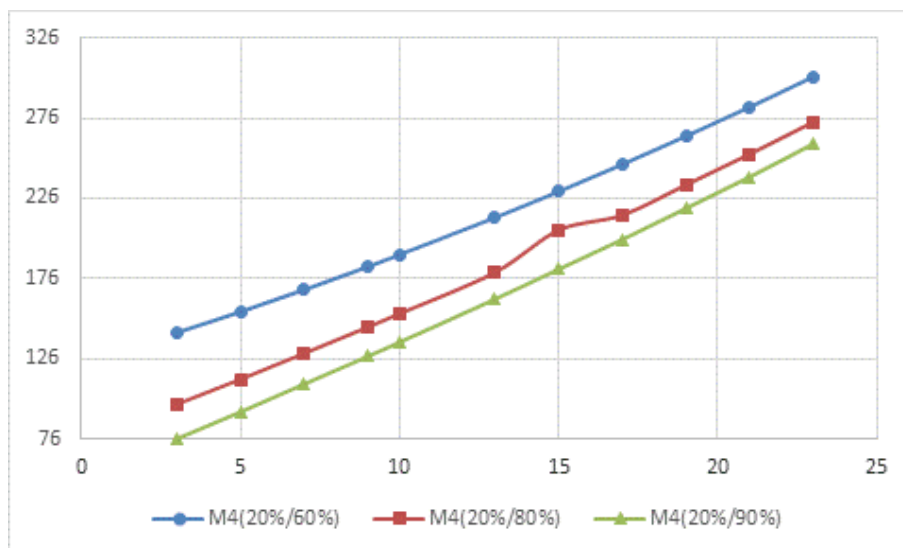


Figure 6.18 : Temps moyen de déstockage par rapport aux taux de rotation et R_i pour le modèle M4.

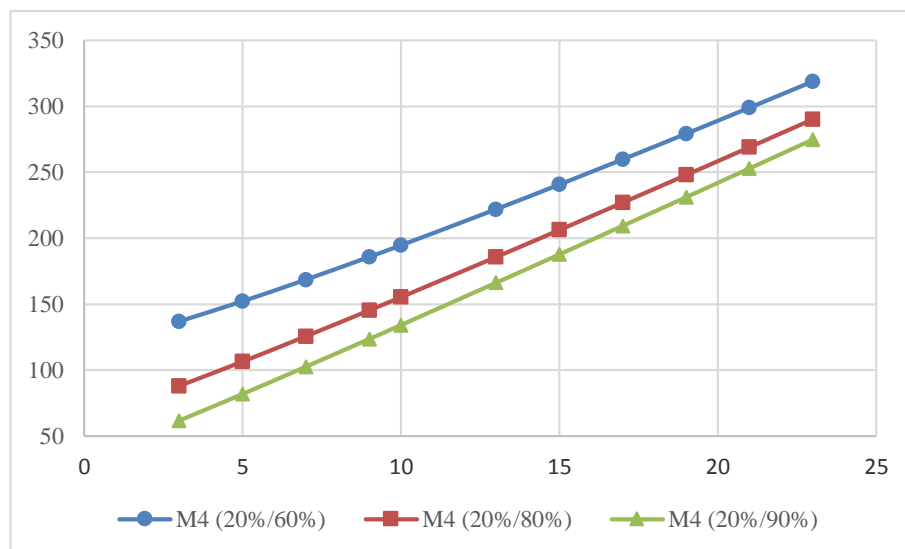


Figure 6.19 : Temps moyen de stockage par rapport aux taux de rotation et R_i pour le modèle M4.

Dans ce modèle, la station de livraison et le convoyeur de restockage sont au même point. Nous constatons dans ce modèle que plus le R_i augmente plus le temps moyen de déstockage et le temps moyen de stockage augmentent. Néanmoins, ces temps restent meilleurs que les autres modèles. En plus, le taux de rotation (20%/90%) est favorable par rapport aux autres taux de rotation.

5. Comparaison entre les modèles :

Les figures suivantes représentent la variation du temps moyen de déstockage et du temps moyen de stockage par rapport à la distance R_i , pour les taux de rotation de 20%/60% et 20%/90%.

A la lecture de ces résultats, il est évident que le modèle 4 s'avère très efficace par rapport aux autres modèles. Ceci est dû à la position du convoyeur de restockage au même endroit que la station de livraison. La profondeur du rack et le convoyeur de restockage influence beaucoup les performances du système.

En plus de ces 4 modèles, nous avons considéré un modèle avec le stockage/déstockage purement aléatoire afin de faire une comparaison entre le stockage par classe et le stockage aléatoire.

Nous constatons une nette amélioration puisque le temps moyen de stockage et le temps moyen de déstockage pour le stockage par classe sont inférieurs au temps

moyen de stockage et au temps moyen de déstockage. Il y a eu une amélioration des performances de l'A/RS à convoyeur gravitationnel.

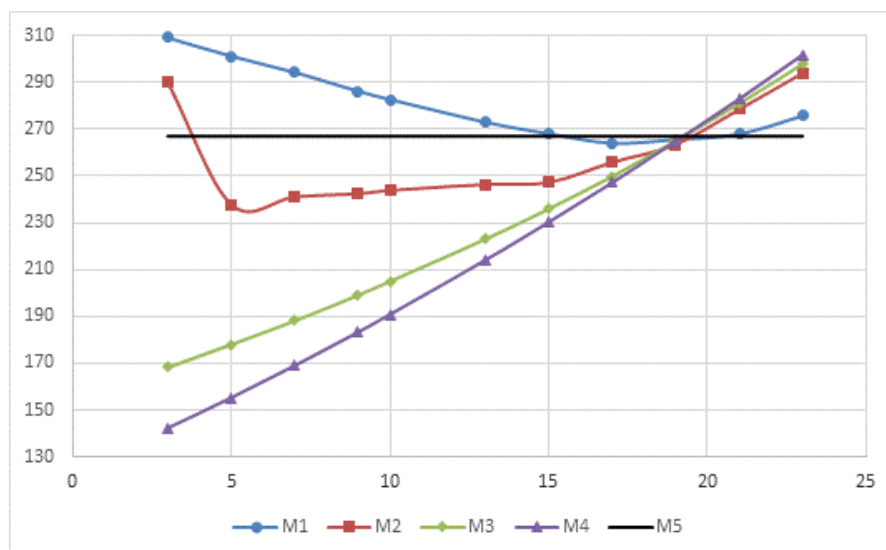


Figure 6.20 : Temps moyen de déstockage par rapport à R_i pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers, pour un taux de rotation de 20%/60%

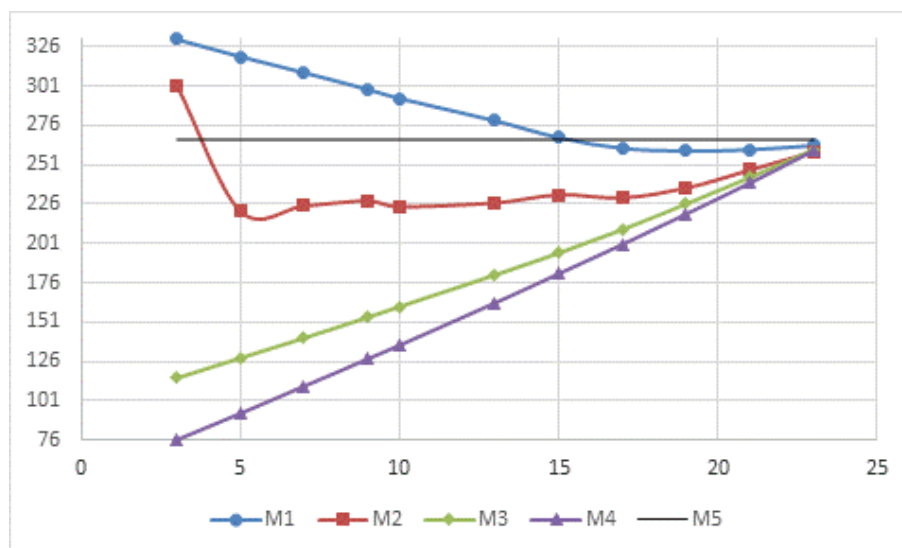


Figure 6.21 : Temps moyen de déstockage par rapport à R_i pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers, pour un taux de rotation de 20%/90%

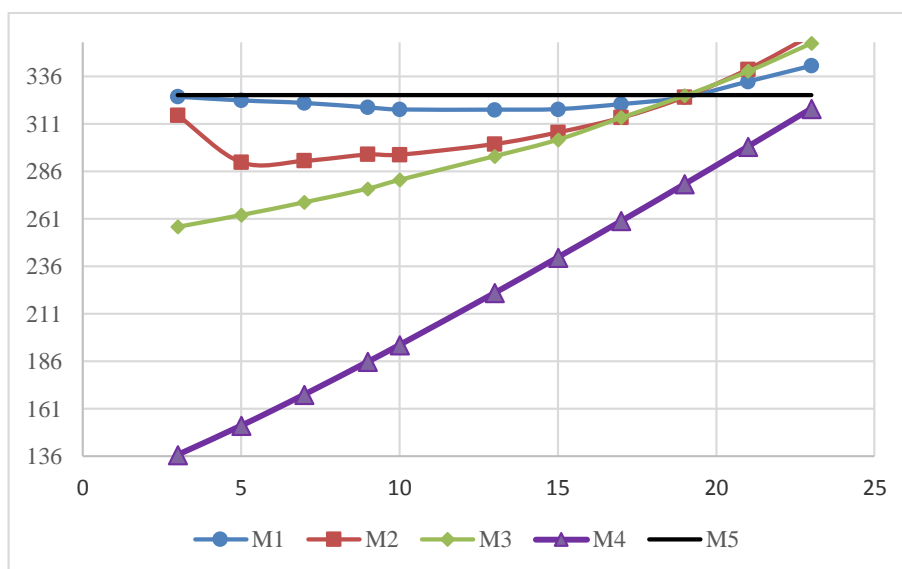


Figure 6.22 : Temps moyen de stockage par rapport à R_i pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers, pour un taux de rotation de 20%/60%

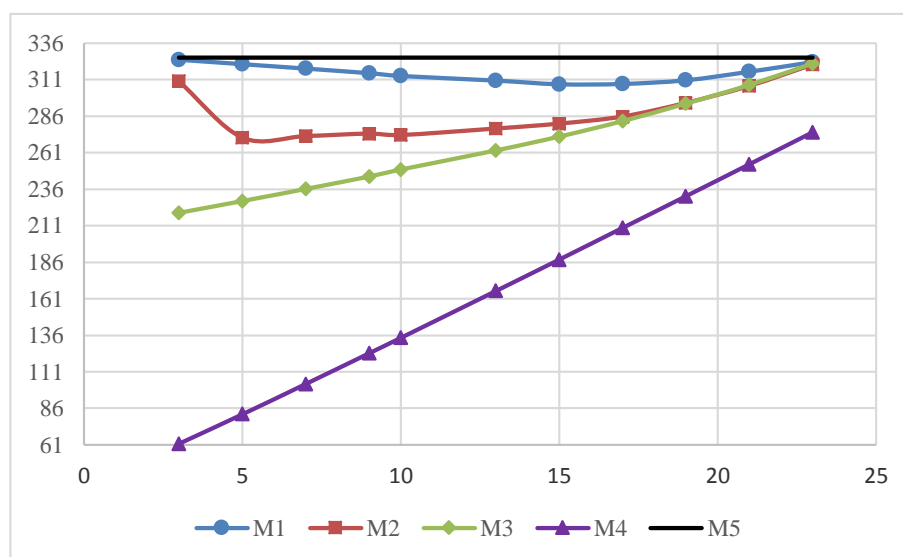


Figure 6.23 : Temps moyen de stockage par rapport à R_i pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers, pour un taux de rotation de 20%/90%

6.3. Impact du nombre de classes sur le temps de stockage/déstockage

Rosenblatt & Eynan (1989) ont élargi la méthode de (Hausman et al., 1976) pour établir les limites optimales des classes pour un nombre donné de classes dans un rack carré-en-temps. La procédure de résolution du problème est basée sur une recherche à une seule dimension. Les auteurs montrent que le maximum de réduction dans les temps de transport est obtenu lorsque l'AS/RS contient relativement peu de régions de stockage. Eynan et Rosenblatt (1994) ont utilisé cette méthode à la suite, pour n'importe quel rack rectangulaire.

Ces auteurs (Rosenblatt & Eynan, 1989) et (Eynan & Rosenblatt, 1994) ont montré qu'il est préférable d'utiliser des racks avec un facteur de forme $b \geq 0.6$ et moins de 7 classes. En plus, ils ont conclu qu'un nombre relativement restreint de classes, généralement inférieur à 10, est préférable pour obtenir des économies potentielles en temps de transport par rapport au stockage full-turnover. Dans la pratique, le nombre de classes est souvent limité à trois.

Ha et Hwang (1994) ont montré que le stockage à 2 classes réduit le temps de stockage et le temps de déstockage par rapport à un stockage aléatoire pour un simple et double cycle pour un système de stockage à carrousel.

L'AS/RS à convoyeur gravitationnel est constitué d'un rack profond de N casiers et chaque casier à m couches, m emplacements de stockage. De ce fait, la répartition des classes n'est pas si évidente, il faut prendre en considération la profondeur du rack.

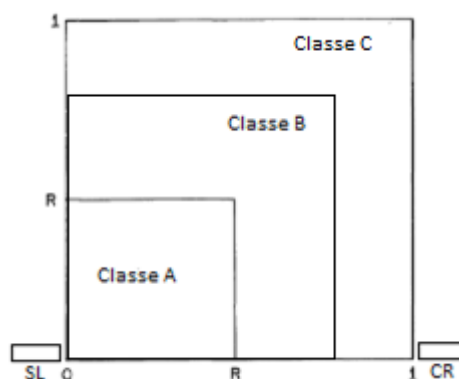
6.3.1. Validation expérimentale

L'objet de cette partie est d'évaluer le temps moyen de déstockage du système en fonction du nombre de classes pour la politique de stockage par classe. Pour cela, nous avons considéré deux AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers : le premier avec 3-classes et trois modèles de configuration, le deuxième avec 2-classes et trois modèles de configuration (les modèles ont été cités auparavant dans le paragraphe 6.2.3).

1. Modèle M1 :

C'est la configuration donnée par (Hausman et al., 1976), (Rosenblatt et Eynan, 1989) et (Eyan et Rosenblatt, 1994)

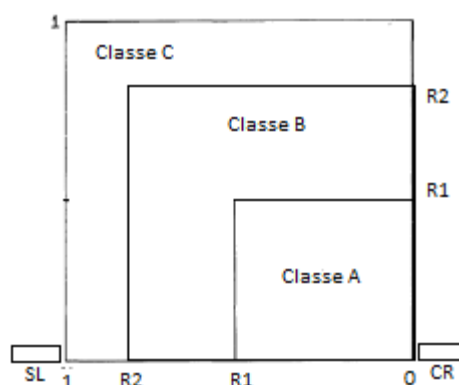
Figure 6.24 : Modèle M1.



2. Modèle M2 :

Puisque dans un AS/RS, nous avons plusieurs fois des déplacements du produit vers le convoyeur de re-stockage afin d'atteindre le produit désiré, les classes sont mises près du convoyeur de restockage.

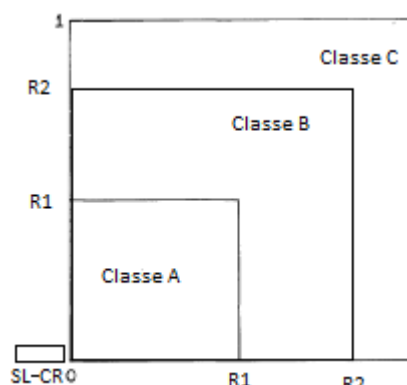
Figure 6.25 : Modèle M2.



3. Modèle M3 :

Pour ce modèle, nous avons reconsidéré l'emplacement du convoyeur de restockage, en le positionnant au même emplacement que la station de livraison, reliant la station de livraison à la station de dépôt.

Figure 6.26 : Modèle M3.



6.3.2. Résultats et interprétation

En plus de la distance entre la station de livraison et la région i , R_i , la taille des classes présente dans le système, R_i^2 , nous faisons varier le taux de rotation des produits des classes A, B et C : A%/B%/C%

Les premiers résultats que nous proposons dans le Tableau 2 concernent, alors, l'influence de ce taux de rotation et de la taille des classes (système à 3-classes) sur le temps moyen de déstockage (Modèles M1, M2 et M3). Ces résultats montrent que plus le taux du trafic en entrée et en sortie augmente plus le temps

moyen de déstockage diminue, et plus la taille de la classe A grandit (R1) plus le temps moyen de déstockage augmente, sauf pour le modèle 1 où c'est le contraire.

Tableau 2 : Influence du taux de rotation et de la taille des classes sur le temps moyen de déstockage (Modèles M1, M2 et M3)

| | | 50%/30%/20% | | | 60%/20%/20% | | | 80%/15%/5% | | |
|----|----|-------------|--------|--------|-------------|--------|--------|------------|--------|--------|
| R1 | R2 | RC1 | RC2 | RC3 | RC1 | RC2 | RC3 | RC1 | RC2 | RC3 |
| 4 | 13 | 301,04 | 141,72 | 166,16 | 307,07 | 132,19 | 159,03 | 319,92 | 91,42 | 126,78 |
| 5 | 15 | 295,13 | 155,08 | 176,54 | 301,86 | 144,30 | 168,48 | 313,59 | 102,44 | 135,12 |
| 8 | 16 | 283,86 | 176,99 | 193,19 | 290,04 | 166,59 | 185,41 | 298,78 | 127,99 | 154,30 |
| 11 | 18 | 272,55 | 203,66 | 214,24 | 278,01 | 192,57 | 205,81 | 282,49 | 155,46 | 175,40 |
| 14 | 20 | 267,33 | 231,52 | 236,75 | 270,42 | 219,49 | 227,23 | 271,20 | 183,81 | 197,28 |

Les résultats donnés dans le Tableau 3 concernent l'influence du taux de rotation et de la taille des classes (système à 2-classes) sur le temps moyen de déstockage (Modèles M1, M3 et M4). Ces résultats montrent que plus le taux du trafic en entrée et en sortie augmente, plus le temps moyen de déstockage diminue, et plus la valeur de R augmente (la taille grandit de la classe A) plus le temps moyen de déstockage augmente, sauf pour le modèle 1 où c'est le contraire.

Tableau 3 : Influence du taux de rotation et de la taille des classes sur le temps moyen de déstockage (Modèles M1, M3 et M4)

| | | 20%/60% | | | 20%/80% | | | 20%/90% | | |
|----|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--|
| R | RC1 | RC3 | RC4 | RC1 | RC3 | RC4 | RC1 | RC3 | RC4 | |
| 3 | 309,09 | 168,14 | 142,34 | 323,62 | 132,61 | 97,68 | 330,63 | 115,37 | 76,02 | |
| 5 | 301,20 | 177,96 | 155,29 | 313,91 | 144,37 | 113,17 | 319,69 | 128,08 | 92,86 | |
| 7 | 294,25 | 188,13 | 169,04 | 304,75 | 156,23 | 129,35 | 309,50 | 140,82 | 110,16 | |
| 9 | 286,23 | 199,09 | 183,37 | 294,87 | 168,73 | 145,74 | 298,86 | 154,02 | 127,52 | |
| 10 | 282,71 | 204,96 | 190,90 | 289,55 | 175,08 | 154,15 | 293,19 | 160,73 | 136,28 | |
| 13 | 273,05 | 222,98 | 214,05 | 276,68 | 194,60 | 179,84 | 278,93 | 180,99 | 163,18 | |
| 15 | 268,09 | 235,94 | 230,32 | 268,17 | 208,27 | 206,16 | 268,21 | 194,87 | 181,75 | |
| 17 | 264,05 | 249,83 | 247,16 | 262,50 | 222,80 | 215,58 | 261,41 | 209,76 | 200,34 | |
| 19 | 265,56 | 265,12 | 264,84 | 261,30 | 238,73 | 234,40 | 259,74 | 226,10 | 219,73 | |
| 21 | 267,91 | 280,94 | 282,93 | 262,69 | 255,28 | 253,58 | 260,55 | 242,90 | 239,37 | |
| 23 | 275,65 | 297,88 | 301,84 | 267,11 | 272,93 | 273,65 | 263,28 | 260,75 | 260,03 | |

Nous pouvons dire que la configuration du modèle M3 pour le système à 3-classes et la configuration du modèle M4 pour le système à 2-classes, où le convoyeur de restockage et la station sont placés au même endroit, est la plus favorable.

6.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé un programme de simulation en utilisant le logiciel ARENA pour le stockage par classe d'un système AS/R à convoyeur gravitationnel. De ces simulations, un certain nombre de conclusions peuvent être faites. Nous résumons, ici, l'essentiel.

La configuration du système joue un rôle important dans les résultats des performances du système du fait que le rack est profond à plusieurs couches et l'emplacement du convoyeur de restockage. La disposition des classes donnée par (Hausman et al., 1976), (Rosenblatt et Eynan, 1989) et (Eyan et Rosenblatt, 1994) n'est pas la meilleure. Du fait que le rack est profond et que nous sommes conduits à faire du déstockage pour le restockage, il vaut mieux placer la station de livraison et le convoyeur de restockage au même endroit. En plus, cette configuration nous a donné de meilleurs résultats

Le nombre de classes considérés dans le système dépend de deux facteurs, la taille des classes (R_i) et le taux de rotation des produits.

Le temps moyen de stockage/déstockage pour un stockage par classe est réduit par rapport au temps moyen pour un stockage aléatoire. Il y a eu une amélioration des performances du système en utilisant le stockage par classe.

6.5. Références Bibliographiques

- Eynan, A., & Rosenblatt, M. J., (1994). Establishing zones in single-command class-based rectangular AS/RS. *IIE Transactions*, 26(1), p. 38–46.
- Gaouar, N., Sari, Z., & Ghouali, N., (2005). Développement d'une Heuristique de Stockage/Déstockage pour un Système AS/R à Convoyeur Gravitationnel. *6e Congrès International de Génie Industriel, (GI'2005)*. Besançon Micropolis, France.
- Gaouar, N., Sari, Z., & Ghouali, N. (2006). Modélisation et implémentation d'une Heuristique de Stockage/Déstockage pour un Système AS/R à Convoyeur Gravitationnel. *6ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'06)*. Rabat, Maroc.
- Guenov, M., & Raeside, R., (1992). Zone shapes in class based storage and multicommand order picking when storage/retrieval machines are used. *European Journal of Operational Research* 58, p. 37–47.
- Ha, J-W., & Hwang, H., (1994). Class-based storage assignment policy in carousel system. *Computers industries Engineering*, 26 (3), p. 489-499.
- Hausman, W.H., Schwarz, L.B., & Graves, S.C., (1976). Optimal storage assignment in automatic warehousing systems. *Management Science* 22 (6), p. 629–638.

- Rosenblatt, M.J., & Eynan, A., (1989). Deriving the optimal boundaries for class-based automatic storage/retrieval systems. *Management Science*, 35(12), p. 1519–1524.
- Sari, Z., (2003). Modélisation, Analyse et Evaluation des Performances d'un AS/RS à Convoyeur Gravitationnel, Thèse de Doctorat d'état, LAT, Université de Tlemcen.

Chapitre 7

Impact des positions des stations de dépôt/livraison et du convoyeur de restockage sur les temps de transport d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel

| | |
|--|-----|
| 7.1. <i>Introduction</i> | 120 |
| 7.2. <i>Impact du point de repos de la machine de déstockage (MD) sur le temps moyen de déstockage</i> | 121 |
| 7.3. <i>Influence des positions des stations de dépôt/livraison et du convoyeur de restockage sur les temps de stockage/déstockage</i> | 124 |
| 7.4. <i>Conclusion</i> | 129 |
| 7.5. <i>Références Bibliographiques</i> | 129 |

7.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons d'analyser l'influence des positions des stations de dépôt/livraison (stations D/L) et du convoyeur de restockage (CR) sur le temps moyens de déstockage dans l'AS/RS à convoyeur gravitationnel. Pour cela, plusieurs configurations vont être proposées en changeant les positions des stations de dépôt/livraison (D/L) et du convoyeur de restockage (CR). Deux positions principales sont considérées, au centre ou au coin bas du rack.

Nous commencerons par analyser l'influence du point de repos de la machine de déstockage sur les temps moyens de déstockage dans l'AS/RS à convoyeur gravitationnel. Nous procéderons, par la suite, à une comparaison des modèles obtenus. Quatre positions sont considérées, au centre, au coin bas du rack (position

de la station de livraison), au coin supérieur de la classe A ou au centre de la classe A.

Enfin, nous présenterons les résultats de ces comparaisons. Nous interpréterons ces résultats pour classer les configurations par rapport à leurs performances.

7.2. Impact du point de repos de la machine de déstockage (MD) sur le temps moyen de déstockage

En se basant sur le travail de (Peters *et al.*, 1996), Sari (Sari, 2003), (Sari *et al.*, 2005), ont déterminé que les points de repos optimaux sont la station de dépôt pour la machine de stockage et le milieu du rack pour la machine de déstockage. Ces positions ont été considérées pour un stockage/déstockage purement aléatoire et pour un déplacement des deux machines aléatoire vers tous les casiers du rack.

Par contre, pour un stockage par classe, le rack est partagé en classe et suivant le taux de rotation, nous avons plus de déplacement vers les casiers qui se trouvent dans la classe A que les autres casiers des autres classes. Ce qui influence sur le temps moyen de déstockage.

Quatre positions principales sont considérées : au centre du rack, au coin bas du rack (position de la station de livraison), au coin supérieur de la classe A ou au centre de la classe A.

7.2.1. Validation expérimentale

L'objet de cette partie est d'évaluer le temps moyen de déstockage du système en fonction de la position du point de repos de la machine de déstockage. Nous avons considéré quatre modèles d'AS/RS à convoyeur gravitationnel à 625 casiers à 2-classes (tableau 1). Le taux de charge pour les quatre modèles est identique (20%/60%). Le nombre de casiers pour les deux classes est identique pour les quatre modèles.

Tableau 1 : Les quatre modèles considérés (Modèles M1, M2, M3 et M4)

| Modèles | M1 | M2 | M3 | M4 |
|-----------|----------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Positions | Centre du rack | Position de la station de livraison | Coin supérieur de la classe A | Centre de la classe A |

7.2.2. Résultats et interprétations

Les résultats donnés dans les figures 7.1 et 7.2 concernent l'influence de la distance entre la station de livraison et la classe A, R_i pour les quatre modèles.

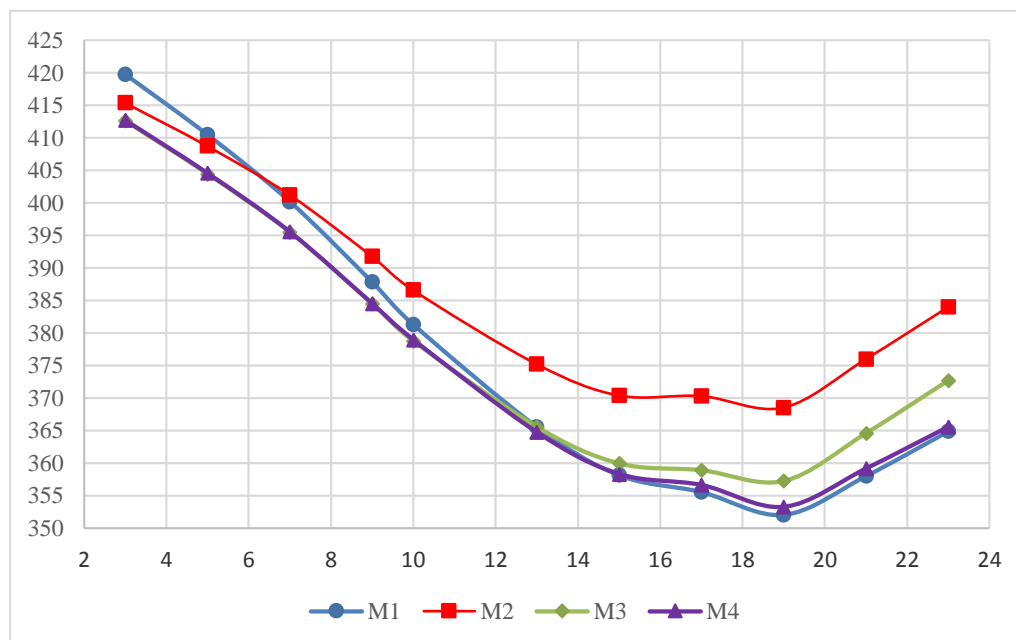


Figure 7.1 : Temps moyen de déstockage par rapport à R_i pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers, pour un taux de rotation de 20%/60%

Nous constatons que plus la taille de la classe A augmente plus le temps moyen de déstockage diminue. Ceci est dû au convoyeur de restockage. Lorsque la taille de la classe est grande, les casiers de la classe A se rapprochent du convoyeur de restockage et la distance entre le convoyeur de restockage et le point de déstockage diminue. Ainsi, nous avons une diminution du temps de déstockage pour le restockage.

Nous remarquons pour R_i inférieur ou égale à 13, une légère amélioration pour les modèles M3 et M4 c.à.d pour la position du point de repos aux environs de la classe A. Par contre, pour des valeurs supérieures à 13 le milieu du rack est favorable. Néanmoins, la différence n'est pas très importante.

Pour pouvoir comparer les performances de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel avec les différentes positions du point de repos de la machine de déstockage, nous

avons utilisé le système de grandeur par unité. Nous prendrons comme grandeurs de base, le temps moyen de déstockage du modèle M1 (point de repos au centre du rack). (figure 7.2)

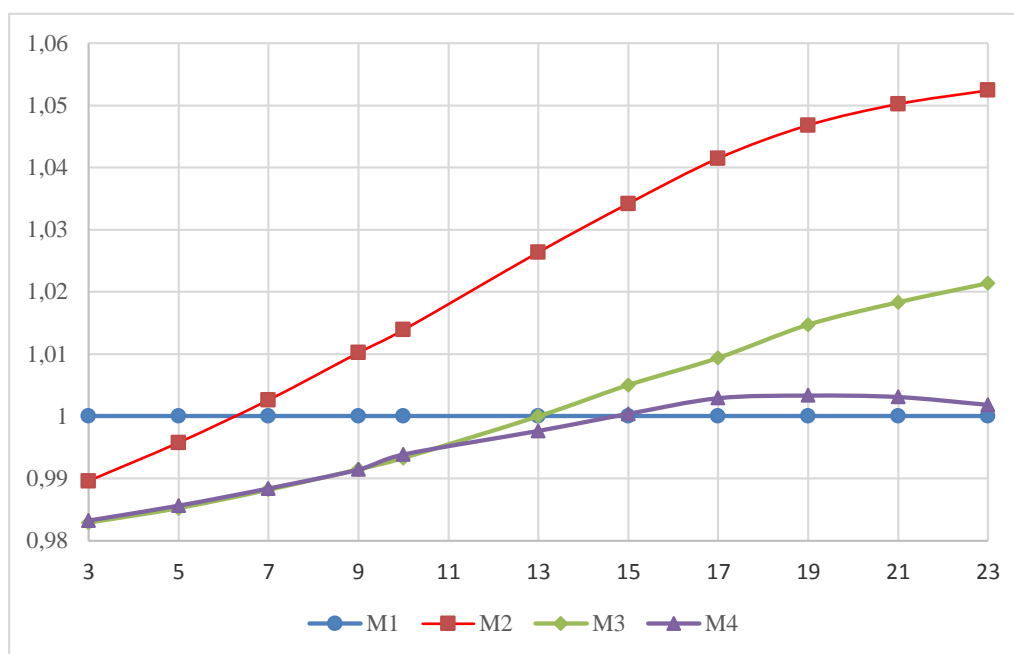


Figure 7.2 : Temps moyen de déstockage par unité par rapport à R_i pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers, pour un taux de rotation de 20%/60%

Nous remarquons que le temps moyen de déstockage par unité dépend de la taille de la classe A et de la position du point de repos de la machine de déstockage. Pour des valeurs de R inférieure ou égale à 13, le temps moyen de déstockage pour les modèles aux positions, le coin supérieur de la classe A et le milieu de la classe A est plus avantageux que les autres modèles. Par contre, pour des valeurs de R supérieure à 13, le temps moyen de déstockage pour le modèle où le point de repos de la machine de déstockage est mieux au centre du rack. Ceci est dû à la configuration de la classe A et de sa taille, plus la taille est grande plus on s'éloigne de la station de livraison.

Finalement, en positionnant le point de repos au centre de la classe A ou au coin supérieur de la classe A, le temps moyen de déstockage sera réduit puisque la distance entre le point de repos et n'importe quel casier de la classe A sera réduit.

7.3. Influence des positions des stations de dépôt/livraison et du convoyeur de restockage sur les temps de stockage/déstockage

Comme Sari (Sari, 2003), nous avons considéré deux positions principales pour les stations de dépôt/livraison et le convoyeur de restockage : au centre ou au coin bas du rack.

Après une analyse de l'impact des positions des stations dépôt/livraison ainsi que celles du convoyeur de re-stockage sur les temps moyens de stockage et déstockage pour un stockage purement aléatoire et une comparaison des performances entre les différentes configurations, Sari (Sari, 2003) a déduit que le meilleur système par rapport au temps de déstockage est lorsque la station de dépôt/livraison et le convoyeur de re-stockage sont au centre du rack et que le système le moins performant est lorsque la station de dépôt/livraison et le convoyeur de re-stockage sont aux extrémités opposées du rack.

7.3.1. Validation expérimentale

Dans cette partie, nous proposons d'évaluer le temps moyen de transport du système en fonction des positions de la station de dépôt/livraison et du convoyeur de restockage. Pour cela, nous avons considéré un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers, avec cinq modèles. Chaque modèle correspond à un emplacement de la station de dépôt/livraison et du convoyeur de restockage. La configurations des différents modèles sont données dans le tableau suivant :

Tableau 2 : Les cinq modèles considérés (Modèles M1, M2, M3, M4 et M5)

| | | |
|----|----------|----------------------|
| M1 | SL | Au coin du rack |
| | CR | A l'autre coin |
| M2 | SL | Au coin du rack |
| | CR | Au centre du rack |
| M3 | SL | Au centre du rack |
| | CR | Au coin du rack |
| M4 | SL et CR | Au centre du rack |
| M5 | SL et CR | Au même coin du rack |

Les premiers résultats que nous proposons concernent, alors, l'influence des positions de la station de dépôt/livraison et du convoyeur de restockage sur le temps

moyen de stockage et le temps moyen de déstockage. Nous faisons varier la taille de la classe A.

Par la suite, nous allons voir l'influence du point de repos de la machine de déstockage sur le modèle qui a donné la meilleure performance. Nous proposons donc, une nouvelle configuration du système.

7.3.2. Résultats et interprétation

Lorsque nous déplaçons les stations de dépôt/livraison, ainsi que le convoyeur de restockage, nous remarquons des variations importantes dans le temps moyen de stockage et le temps moyen de déstockage.

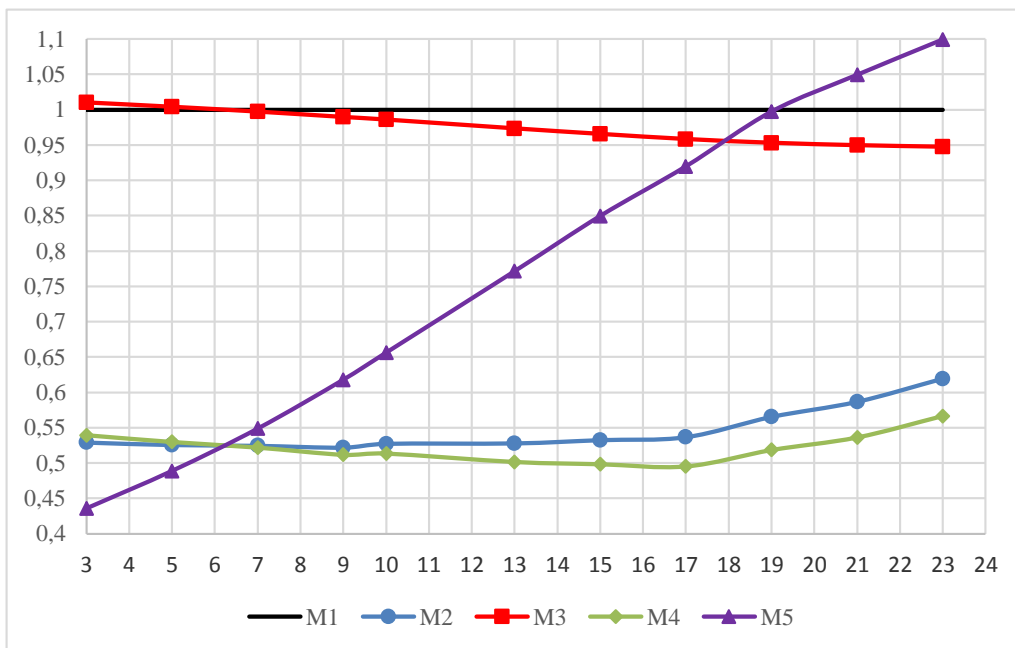


Figure 7.3 : Temps moyen de déstockage par unité par rapport à R_i pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers.

Les figures 7.3 et 7.4 représentent les temps moyens de déstockage et les temps moyens de stockage par rapport à la variation de R. Les temps moyen de déstockage du modèle M1 (la station de dépôt/livraison et le convoyeur de restockage aux extrémités opposés du rack) ont été utilisés comme grandeurs de base. Par conséquent, des temps moyens de déstockage par unité inférieurs à 1 indiquent une

amélioration des performances des autres modèles par rapport au modèle M1. Par contre, les temps moyens de déstockage par unité supérieurs à 1 indiquent une détérioration des performances.

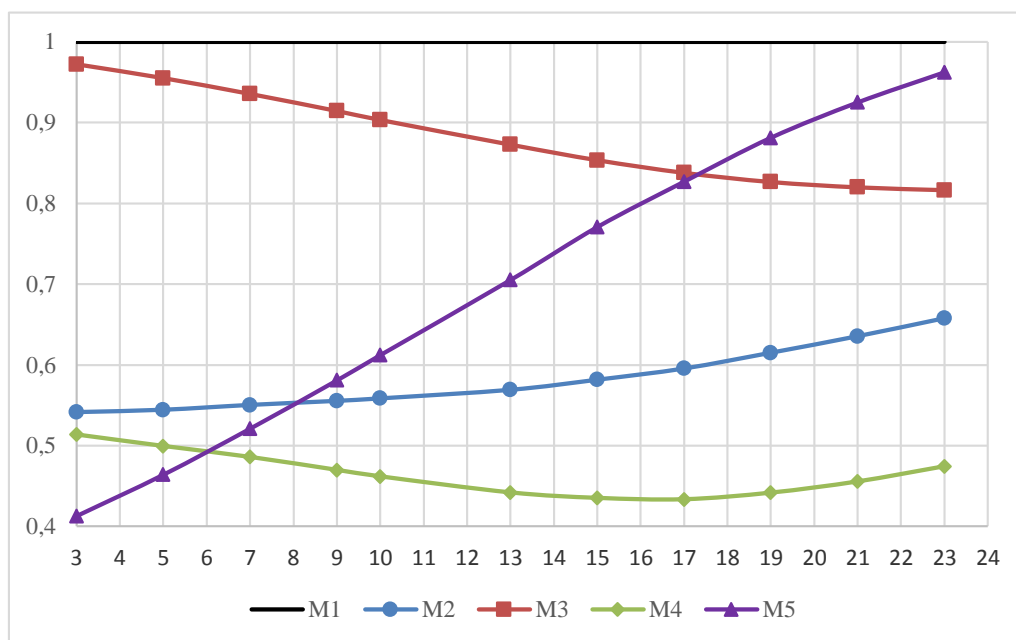


Figure 7.4 : Temps moyen de stockage par unité par rapport à R_i pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers.

Comportement des temps moyens de transport :

- Dans les deux cas où le convoyeur de restockage est au centre du rack, nous remarquons que le temps moyen de stockage et le temps moyen de déstockage par unité ont diminué.
- Dans le cas où la station de dépôt/livraison et le convoyeur de restockage sont au même coin du rack, nous remarquons que plus la distance entre la station de livraison et la classe A, R augmente plus les temps moyens de stockage et de déstockage augmentent. Mais cela reste toujours plus efficace que leurs positions à l'extrémité opposé du rack.
- Dans le cas où la station de dépôt/livraison et le convoyeur de restockage sont au centre du rack, nous remarquons que le temps moyen de stockage et

le temps moyen de déstockage par unité ont diminué. Ainsi, nous avons les meilleures performances.

Considérons maintenant le modèle M4 (la station de dépôt/livraison et le convoyeur de restockage sont au centre du rack) où nous allons étudier le comportement de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel, en repositionnant le point de repos de la machine de déstockage.

En plus de ces modèles, nous proposons de reconsidérer la configuration de la classe A, qui est à la base carrée et près de la station de livraison (Hausman et al., 1976). Puisque dans le modèle M4, la station de dépôt/livraison est au centre du rack, nous proposons que la classe A soit au centre du rack.

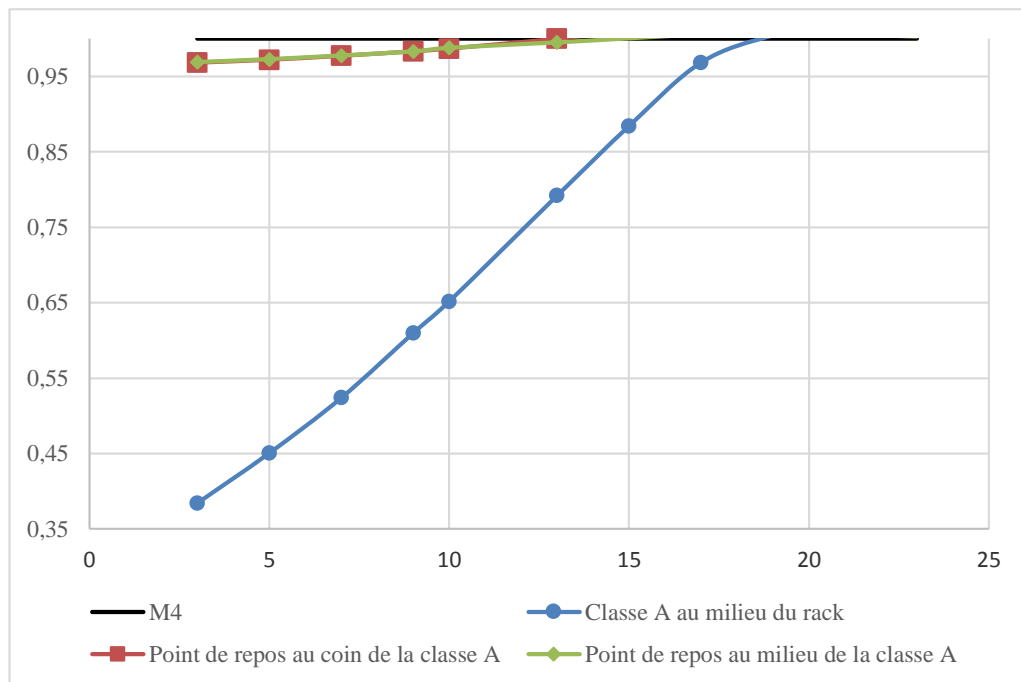


Figure 7.5 : Temps moyens de déstockage par unité par rapport à R_i pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers.

La figure 7.5 représente les temps moyens de déstockage par rapport à la variation de R . Les temps moyens de déstockage du modèle M4 (la station de dépôt/livraison et le convoyeur de restockage au centre du rack) ont été utilisés comme grandeurs de base. Par conséquent, des temps moyens de déstockage par

unité inférieure à 1 indiquent une amélioration des performances des autres modèles par rapport au modèle M1. Par contre, les temps moyens de déstockage par unité supérieurs à 1 indiquent une détérioration des performances.

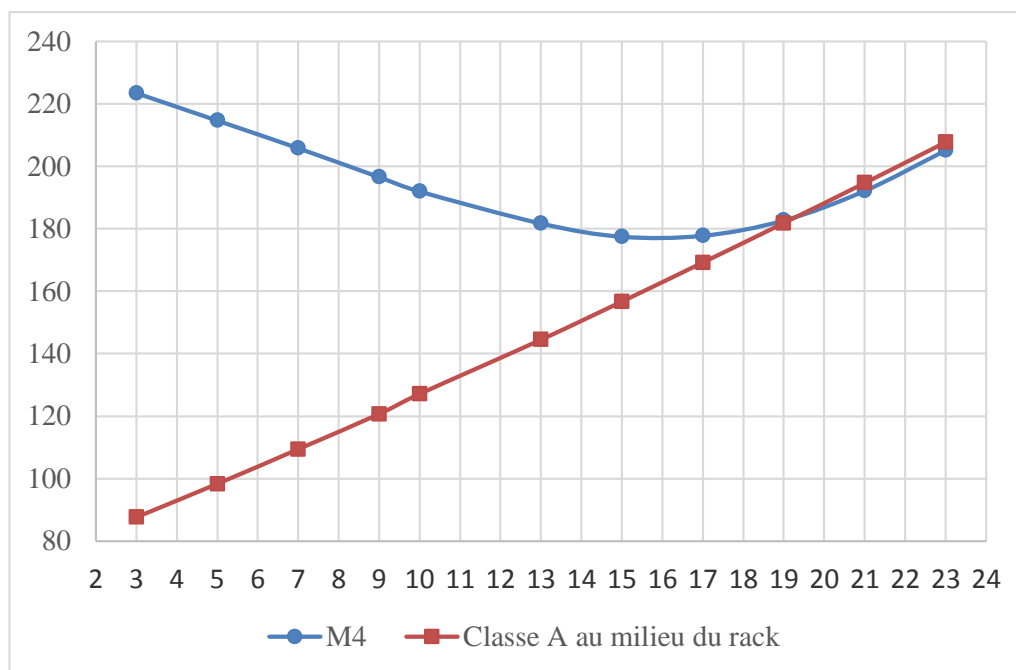


Figure 7.6 : Temps moyens de stockage par rapport à R_i pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers.

Nous remarquons dans la figure 7.6 que le temps moyen de stockage pour un AS/RS où la classe A est au centre du rack, est inférieur par rapport au temps moyen de stockage où la classe A est au coin du rack. Ceci réduit considérablement le déplacement avec n'importe quel casier.

En conclusion, le meilleur système par rapport au temps de déstockage est lorsque la station de dépôt/livraison et le convoyeur de re-stockage sont au centre du rack et que le système le moins performant est lorsque la station de dépôt/livraison et le convoyeur de re-stockage sont aux extrémités opposées du rack.

7.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé l'influence des positions des stations de dépôt/livraison (stations D/L) et du convoyeur de restockage (CR) sur les temps moyens de transport dans l'AS/RS à convoyeur gravitationnel. Pour cela, nous avons proposé plusieurs configurations où nous avons déplacé les positions des stations de dépôt/livraison (D/L) et du convoyeur de restockage (CR). Deux positions principales sont considérées au centre ou au coin bas du rack. A partir des résultats de cette étude, nous pouvons faire les remarques suivantes :

- La position du point de repos de la machine de déstockage a quelque effet sur le temps moyen de déstockage.
- Le meilleur système est lorsque le convoyeur de restockage est au centre du rack.
- La position de la station de livraison a un effet faible sur le temps moyen de déstockage.
- Finalement, nous pouvons dire que le meilleur système est lorsque la station de dépôt/livraison et le convoyeur de restockage sont au centre du rack et que la classe A est au centre du système.

7.5. Références Bibliographiques

- Hausman, W.H., Schwarz, L.B., & Graves, S.C., (1976). Optimal storage assignment in automatic warehousing systems. *Management Science* 22 (6), p. 629–638.
- Peters, B. A., Smith, J. S., & Hale, T. S. (1996). Closed form models for determining the optimal dwell point location in automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research* , 34 (6), 1757-1771.
- Sari, Z., (2003). Modélisation, Analyse et Evaluation des Performances d'un AS/RS à Convoyeur Gravitationnel, Thèse de Doctorat d'état, LAT, Université de Tlemcen.
- Sari, Z., Grassman, S., & Ghouali, N. (2007). Impact of Pickup/Dropoff Stations and Restoring Conveyor Locations on Retrieval Time Models of Flow-Rack Automated Storage and Retrieval Systems. *Production Planning and Control* , 18 (2), 105-116.
- Sari, Z., Saygin, C., & Ghouali, N. (2005). Travel-Time Models for Flow-Rack Automated Storage and Retrieval Systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25, 979-987.

Chapitre 8

Adaptation de l'Heuristique de stockage/déstockage au stockage par classe

| | |
|--|-----|
| 8.1. <i>Introduction</i> | 130 |
| 8.2. <i>Heuristique de stockage/déstockage</i> | 131 |
| 8.3. <i>Heuristique de stockage/déstockage par classe</i> | 134 |
| 8.4. <i>Comparaison entre les différentes méthodes de stockage</i> | 137 |
| 8.5. <i>Conclusion</i> | 138 |
| 8.6. <i>Références Bibliographiques</i> | 139 |

8.1. Introduction

L'heuristique de stockage/déstockage pour l'AS/RS à convoyeur gravitationnel a été développée par Sari (Sari, 2003). Cette heuristique a été construite de manière intuitive pour essayer de réduire au maximum le temps moyen de déstockage. La réduction du temps de stockage, celui-ci étant très petit par rapport au temps de déstockage, n'a pas été prise en considération dans le développement de cette heuristique.

Cette heuristique a été développée pour le système AS/R à convoyeur gravitationnel où la station de dépôt/livraison et le convoyeur de restockage sont aux extrémités opposées du rack. Cette configuration du système est la moins performante des quatre en temps de déstockage (Sari, 2003).

Dans ce chapitre, nous allons commencer à présenter l'heuristique de stockage/déstockage, l'adapter au stockage par classe afin d'améliorer les performances du système étudié.

Enfin, nous allons présenter les résultats obtenus et faire une comparaison entre le stockage aléatoire, le stockage par classe, l'heuristique et l'heuristique par classe pour classer les méthodes de stockage par rapport à leurs performances.

8.2. Heuristique de stockage/déstockage

Dans un stockage purement aléatoire, chaque casier peut contenir plusieurs types de produits. Pour déstocker un produit demandé qui se trouve dans une couche d'un casier, il faut d'abord déstocker, un à un, les produits qui le précèdent et les déposer au convoyeur de restockage pour être réstockés dans le rack. De ce fait, plus le numéro de la couche est grand plus la machine de déstockage mettra du temps pour déstocker le produit demandé. Ainsi, le temps de déstockage augmente et la satisfaction de la demande sera retardée.

Le temps de déstockage peut être minimisé :

- En réduisant le nombre de produits différents dans le même casier.
- En plaçant les produits identiques dans les mêmes casiers et en sélectionnant les casiers les plus proches de la station de livraison et/ou du point de repos de la machine de déstockage.

Sari (2003) a développé l'heuristique de stockage/déstockage de manière intuitive en se basant sur ces deux idées. Elle est constituée sur un ensemble de règles simples, ayant pour objectif commun de réduire le temps de déstockage. Elle comporte deux procédures appelées procédure de stockage et procédure de déstockage (Gaouar, 2004) (Gaouar *et al.*, 2005, 2006). Le développement de cette heuristique est basé sur les idées suivantes:

▪ *Procédure de stockage*

La procédure de stockage comporte trois priorités hiérarchiques et consiste à :

1. Stocker le produit en cours derrière *un produit identique*.

Si un seul casier, Stocker

Si plusieurs casiers,

- a. Stocker dans le casier où il n'y a qu'*un seul type de produits* (identique au produit en cours de stockage).

Si un seul casier, Stocker

Si plusieurs casiers, Stocker dans le casier où il y a *le plus de produits de ce type*.

Si un seul casier, Stocker

Sinon, Stocker dans le casier *le plus proche de la station de livraison.*

Si un seul casier, Stocker

Sinon, Stocker dans le casier *le plus proche du point de repos de la machine de déstockage.*

Sinon,

b. Stocker dans le casier où il y a *le plus de produits de même type* (identique au produit en cours de stockage).

Si un seul casier, Stocker

Sinon, Stocker dans le casier où il y a *le moins de type de produits en général.*

Si un seul casier, Stocker

Sinon, Stocker dans le casier *le plus proche de la station de livraison.*

Si un seul casier, Stocker

Sinon, Stocker dans le casier *le plus proche du point de repos de la machine de déstockage.*

Sinon,

2. Stocker dans *un casier vide.*

Si un seul casier, Stocker

Si plusieurs casiers, Stocker dans le casier *le plus proche de la station de livraison.*

Si un seul casier, Stocker

Sinon, Stocker dans le casier *le plus proche du point de repos de la machine de déstockage.*

Sinon,

3. Stocker dans le casier où il y a *le moins de produits.*

Si un seul casier, Stocker

Sinon, Stocker dans le casier où il y a *le moins de types de produits différents.*

Si un seul casier, Stocker

Sinon, Stocker dans le casier *le plus proche de la station de livraison.*

Si un seul casier, Stocker

Sinon, Stocker dans le casier *le plus proche du point de repos de la machine de déstockage.*

▪ **Procédure de déstockage**

Chercher le produit désiré se trouvant dans *la couche la plus proche de l'allée où se trouve la machine de déstockage.*

Si un seul casier, Déstocker

Sinon, Déstocker à partir du casier *le plus proche de la station de déstockage.*

Si un seul casier, Déstocker

Sinon, Déstocker à partir du casier *le plus proche du point de repos de la machine de déstockage.*

L'analyse des résultats des travaux précédents (Gaouar *et al.*, 2005, 2006) a permis de montrer l'intérêt d'utiliser cette heuristique pour le contrôle de l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels. Le temps moyen de déstockage pour un système utilisant l'heuristique est inférieur au temps moyen obtenu pour un stockage aléatoire. Ainsi, si l'on considère par exemple un système ayant 1000 emplacements (10x10x10) et utilisant le stockage aléatoire et ce même système utilisant l'heuristique de stockage/déstockage pour 200 références différentes, le gain de temps de déstockage est en moyenne de 40%.

Toutefois, cette amélioration tend à diminuer au fur et à mesure de l'augmentation du rapport entre le nombre de références présentes dans le rack et le nombre d'emplacements de stockage de ce même rack.

8.3. Heuristique de stockage/déstockage par classe

L'heuristique de stockage/déstockage par classe consiste à appliquer l'heuristique de stockage/déstockage aux différents casiers de chaque classe. L'application de l'heuristique dans chaque classe va considérablement réduire le temps moyen de déstockage puisque d'après (Hausman et al., 1976) 20% des références présentes dans le rack représentent 60% du trafic en entrée et en sortie. Par exemple : sur 1000 références de produit, 200 références seront stockées dans la classe A.

Avant d'entamer la procédure de stockage pour le produit à stocker, nous allons tester à quelle classe appartient ce produit et limiter les casiers à chercher :

Si classe produit est égale à 1,

Alors, stocker dans la classe A, en appliquant la procédure de stockage dans des casiers de 1 à R_1^2

Si classe produit est égale à 2,

Alors, stocker dans la classe B, en appliquant la procédure de stockage dans des casiers allant de $R_1^2 + 1$ à R_2^2

Sinon Stocker dans la classe C, en appliquant la procédure de stockage dans des casiers allant de $R_2^2 + 1$ à $M.N_l.N_h$

De même pour la procédure de déstockage. Avant d'entamer la procédure de déstockage pour le produit à déstocker, nous devons connaître la classe à laquelle appartient ce produit et limiter les casiers à chercher :

Si classe produit est égale à 1,

Alors, déstocker dans la classe A, en appliquant la procédure de déstockage dans des casiers de 1 à R_1^2

Si classe produit est égale à 2,

Alors, déstocker dans la classe B, en appliquant la procédure de déstockage dans des casiers allons de $R_1^2 + 1$ à R_2^2

Sinon Déstocker dans la classe C, en appliquant la procédure de déstockage dans des casiers allons de $R_2^2 + 1$ à $M.N_l.N_h$

Le choix du casier à stocker ou à déstocker dépend de son emplacement dans la répartition des classes et de la taille de la classe.

Pour procéder à la comparaison entre les différentes méthodes de stockage, nous avons considéré un AS/RS à convoyeur gravitationnel à 625 casiers à 10 couches à 2-classes. Le taux de rotation est de (20%/60%). La figure suivante représente la face de déstockage du système étudié avec $N_l = N_h = 25$ casiers et R , la distance entre la station de livraison et la limite de la classe A

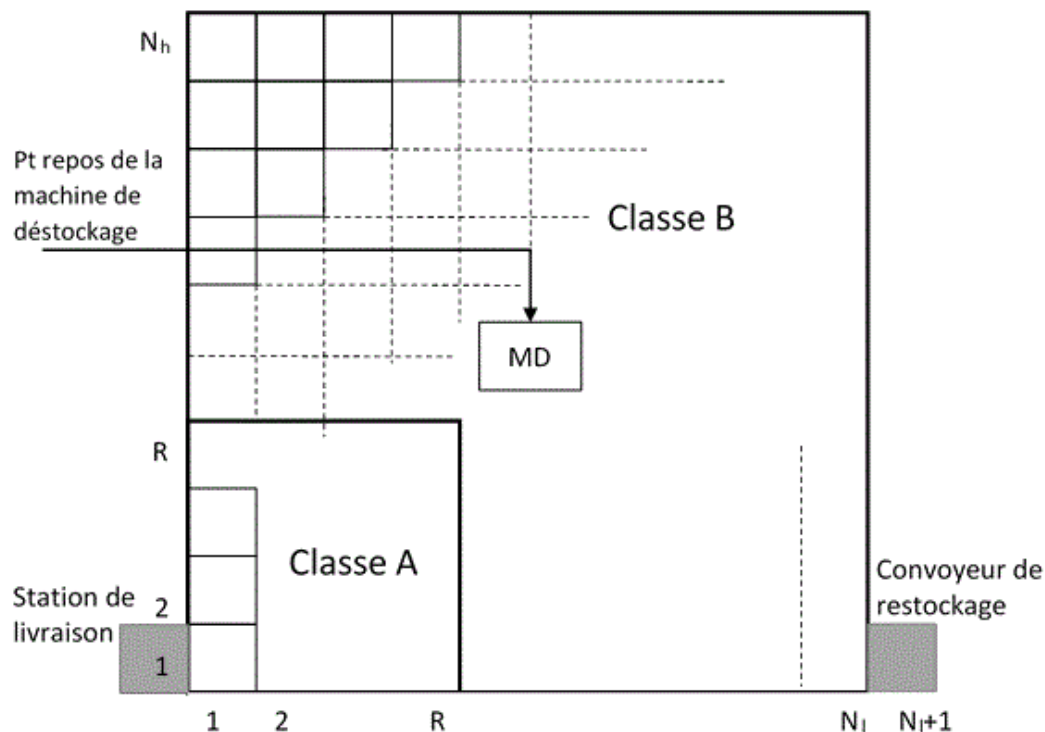


Figure 8.1 : Face déstockage de l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels.

Résultats et interprétations

Pour pouvoir comparer les deux méthodes de stockage/déstockage et déterminer les performances de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel, nous avons utilisé le système de grandeur par unité. Nous prendrons comme grandeur de base le temps moyen de déstockage pour le stockage par classe.

Les résultats donnés dans la figure 8.2 sont une comparaison entre les temps moyen de déstockage pour le stockage par classe et les temps moyens de déstockage pour l'heuristique par classe en variant R , la distance entre la station de livraison et la limite de la classe A pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel pour 1000 produits différents. Par conséquent, les temps moyens de déstockage par unité inférieure à 1 indiquent une amélioration des performances du système. Par contre,

les temps moyens de déstockage par unité supérieure à 1 indiquent une détérioration des performances.

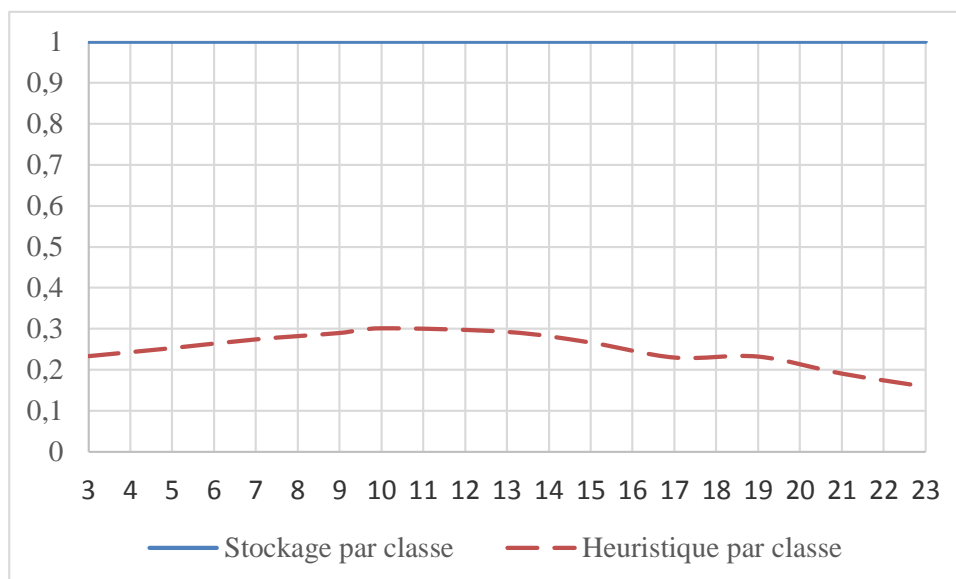


Figure 8.2 : Temps moyen de déstockage par rapport à R_i pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers à 10 couches, pour un taux de rotation de 20%/60%

En conséquence, le temps moyen de déstockage par heuristique est nettement plus inférieur au temps moyen de déstockage par classe. Pour un système AS/RS à convoyeur gravitationnel à 10 couches à 2-classes, et R égal à 10 (la taille de la classe A est de 100 casiers), nous avons une réduction de 70%. Les performances du système se sont améliorées.

Le tableau suivant représente le temps moyen de déstockage pour l'heuristique de stockage/déstockage par classe en fonction du nombre de type de références et R . Nous constatons que plus R augmente, plus le temps moyen de déstockage diminue, et plus le nombre de références augmente plus le temps moyen de déstockage augmente. Ceci est dû au nombre d'emplacements alloués à la classe A. Pour un taux de rotation de 20%/60%, 20% des produits (types de références) sont destinés à la classe A. Par exemple pour 2000 références, 400 références de la classe A par rapport à 1600 références de la classe B ont un taux de rotation de 60% et pour $R=13$, 1690 emplacements sont dédiés à la classe A

Tableau 1 : Le temps moyen de déstockage pour l'heuristique de stockage/déstockage par classe en fonction du nombre de type de références et R

| Nombre de type de références | R=10 | R=13 | R=15 |
|------------------------------|--------|--------|--------|
| 100 | 34,89 | 36,12 | 36,03 |
| 500 | 54,81 | 57,51 | 51,37 |
| 1000 | 114,99 | 107,04 | 95,53 |
| 1500 | 149,45 | 145,92 | 137,20 |
| 2000 | 169,72 | 170,02 | 158,15 |
| 3000 | 195,59 | 192,95 | 184,74 |
| 5000 | 218,61 | 214,02 | 212,33 |

8.4. Comparaison entre les différentes méthodes de stockage

En utilisant l'heuristique de stockage/déstockage, nous avons pu augmenter le nombre de produits différents dans un AS/RS à convoyeur gravitationnel par rapport à un système où le stockage/déstockage est aléatoire. En plus, nous avons eu une diminution du temps moyen de déstockage par rapport au stockage aléatoire, il y a eu une amélioration des performances du système.

Par la suite, nous ferons une comparaison entre les différentes méthodologies de stockage afin de déterminer la meilleure méthode. Le stockage dédié n'est pas pris en considération puisqu'il ne permet pas une grande diversité de produits du fait qu'un casier ou plus est consacré à un produit. Pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel à 625 casiers, nous avons au maximum 625 produits différents.

Résultats et interprétations

Pour pouvoir comparer entre les différentes méthodologies de stockage/déstockage et déterminer les performances de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel, nous avons utilisé le système de grandeur par unité. Nous prendrons comme grandeur de base le temps moyen de déstockage pour le stockage aléatoire.

Le système considéré est un AS/RS à convoyeur gravitationnel à 6250 emplacements avec un taux de rotation de (20%/60%), où nous pouvons varier le nombre de produits différents à stocker.

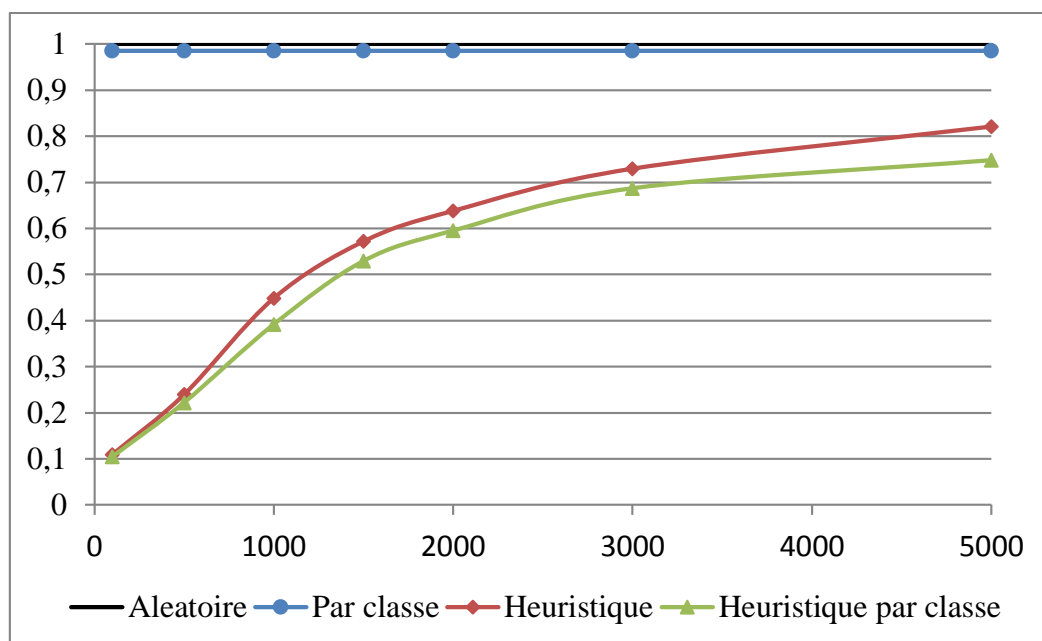


Figure 8.3 : Temps moyen de déstockage par unité par rapport aux variations du nombre de type de produits pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 6250 emplacements.

La figure 8.3 représente les temps moyens de déstockage par rapport aux variations du nombre de type de produits. Par conséquent, les temps moyens de déstockage par unité inférieurs à 1 indiquent une diminution du temps par rapport au temps moyen de déstockage pour le système à stockage/déstockage aléatoire. Par contre, les temps moyens de déstockage par unité supérieurs à 1 indiquent une augmentation des temps.

Par conséquent, le temps moyen de déstockage pour le système utilisant l'heuristique par classe est réduit par rapport aux autres systèmes de stockage. Nous avons eu une amélioration des performances de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel.

8.5. Conclusion

L'heuristique de stockage/déstockage a été développée par Sari (Sari, 2003) et implémentée par Gaouar (Gaouar, 2005) afin d'améliorer les performances de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel par rapport au temps moyen de déstockage.

Dans ce chapitre, nous avons adapté cette heuristique au système utilisant le stockage par classe. Nous avons aussi comparé l'heuristique par classe au stockage

aléatoire et l'heuristique. A partir des résultats de cette étude, nous pouvons dire que le temps moyen de déstockage a été réduit considérablement, les performances du système se sont nettement améliorées.

L'heuristique de stockage/déstockage peut être une bonne alternative pour l'AS/RS à convoyeur gravitationnel

8.6. Références Bibliographiques

- Gaouar, N., (2004). *Implementation & Simulation d'une Heuristique de Stockage/Déstockage en vue de réduire le temps de cycle d'un AS/RS à Convoyeur Gravitationnel*. Magister Signaux et Systèmes, LAT, Université de Tlemcen.
- Gaouar, N., Sari, Z., & Ghouali, N. (2005). Développement d'une Heuristique de Stockage/Déstockage pour un Système AS/R à Convoyeur Gravitationnel. *6e Congrès International de Génie Industriel, (GI'2005)*. Besançon Micropolis, France.
- Gaouar, N., Sari, Z., & Ghouali, N. (2006). Modélisation et implémentation d'une Heuristique de Stockage/Déstockage pour un Système AS/R à Convoyeur Sari, Z., (2003). Modélisation, Analyse et Evaluation des Performances d'un AS/RS à Convoyeur Gravitationnel, Thèse de Doctorat d'état, LAT, Université de Tlemcen.
- Sari, Z., Grassman, S., & Ghouali, N. (2007). Impact of Pickup/Dropoff Stations and Restoring Conveyor Locations on Retrieval Time Models of Flow-Rack Automated Storage and Retrieval Systems. *Production Planning and Control*, 18 (2), 105-116.
- Sari, Z., Saygin, C., & Ghouali, N. (2005). Travel-Time Models for Flow-Rack Automated Storage and Retrieval Systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25, 979-987.

Conclusion Générale & Perspectives

Les politiques de stockage sont des procédés qui déterminent les méthodes de stockage effectuées dans un système automatisé de stockage/ déstockage (AS/RS). Une politique de stockage sert à déterminer les casiers où sont assignés les articles. Etant donné les demandes du client ou de la production, le problème consiste à déterminer les emplacements des articles à déstocker afin de les satisfaire en un temps minimum. Ainsi, le choix de la politique de stockage des articles est très important.

Les AS/RS à convoyeurs gravitationnels permettent, de par leur conception, de minimiser l'espace utilisé par la suppression des allées entre étagères. Par contre pour un stockage purement aléatoire, leur temps moyen de déstockage reste moyen et est dans la plupart des cas plus long que celui d'un AS/RS à charge unitaire. Le temps moyen de déstockage représente l'un des critères de performances le plus important pour les AS/RS, et le plus étudié dans la plupart des recherches.

L'une des solutions que nous avons proposée dans cette thèse pour minimiser le temps moyen de déstockage est d'utiliser le stockage par classe comme politique de stockage. Plusieurs travaux ont démontré que le stockage par classe permet une réduction considérable en temps de déstockage par rapport aux autres méthodes de stockage telles que le stockage dédié et le stockage aléatoire. Dans la plupart de ces recherches, l'AS/RS utilisé est toutefois à charge unitaire. Or, la profondeur du rack dans l'AS/RS à convoyeur gravitationnel modifie la pertinence des résultats proposés dans ces travaux.

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés au stockage par classe dans un système automatisé de stockage/déstockage (AS/RS) à convoyeur gravitationnel. Nous avons partagé ce travail en deux parties.

La première partie (A) est un état de l'art sur les systèmes de stockage/déstockage et le stockage aléatoire par classe. Elle est constituée de quatre chapitres. En premier, nous avons donné une introduction aux systèmes automatisés de stockage/déstockage où nous avons parlé des différents aspects des AS/RS, de leur fonctionnalité, de leurs composants, des différents types d'AS/RS existants, ... Par la suite, une description détaillée du système de ces composants à son fonctionnement, ainsi que de la modélisation des temps de transport des machines

de stockage et de déstockage de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel a été réalisée. Et enfin, une analyse des taux de fonctionnement des machines S/R du système AS/R à convoyeur gravitationnel a suivi.

Avant d'entamer le sujet de notre travail, nous avons fait un résumé des travaux établis par différents chercheurs sur les systèmes AS/R afin d'améliorer leurs performances. En dernier, nous avons abordé un état de l'art détaillé des différentes recherches sur le stockage par classes pour les différents systèmes de stockage. Nous avons cité ces travaux par ordre chronologique.

La deuxième partie (B), représente le cœur de notre travail. Elle est constituée de quatre chapitres. Nous avons commencé par modéliser les temps moyens de stockage et de déstockage par classe du système automatisé de stockage/déstockage à convoyeur gravitationnel. Deux modèles sont développés : le premier modèle est un modèle analytique et le second est la modélisation par simulation.

La modélisation analytique que nous avons proposée est basée sur la moyenne de tout les temps de transport entre les casiers et les stations de dépôt/livraison et le convoyeur de restockage. En se basant sur les travaux de Bozer et White (1984) et les travaux de Peters (1996), nous avons pu déterminer l'expression analytique du temps moyen de déstockage. Néanmoins, l'expression développée est compliquée et longue et nous nous proposons de la généraliser dans de prochains travaux.

Le second est la modélisation par simulation où nous avons utilisé le logiciel de simulation des systèmes de production Arena/SIMAN. Cette partie a permis d'implémenter et de présenter l'AS/RS à convoyeur gravitationnel à deux classes qui sera utilisé pour calculer le temps moyen de déstockage. Cette partie nous a permis par la suite, de tester un très grand nombre de paramètres et de valeurs afin d'étudier les performances de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel. Les points traités sont les suivants :

- Déterminer les performances de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel pour le stockage par classe, en tenant compte de la configuration du système, l'emplacement des classes et leurs tailles ;
- Comparer les performances de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel pour les trois méthodes de stockage suivantes : le stockage aléatoire, l'heuristique de stockage/déstockage et le stockage par classe.
- Déterminer l'influence des positions des stations de dépôt/livraison et du convoyeur de restockage sur les temps de transport d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel à stockage par classe ;
- Adapter l'heuristique de stockage/déstockage au stockage par classe.

Selon la politique du stockage par classes, les articles dans l'entrepôt sont divisés en groupes basés sur leur fréquence d'entrée/sortie (E/S). Ces groupes d'articles sont assignés à une classe où le nombre de classes est égal au nombre de groupes. L'attribution des groupes d'articles aux régions est faite selon la fréquence d'entrée/sortie. Ainsi, la région dont découle le plus faible temps moyen de déstockage est assignée au groupe d'articles avec la fréquence la plus élevée. Cette région est placée près de la station d'entrée/sortie (E/S).

D'après (Hausman et al., 1976), (Rosenblatt et Eynan, 1989) et (Eyan et Rosenblatt, 1994), la configuration des classes dans un rack est carrée. Néanmoins, les études qui ont été faites sont pour un AS/RS à charge unitaire ce qui explique la disposition des classes. Pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel, c'est autre chose : le rack du système est profond et le convoyeur de restockage influence les résultats du temps moyen de déstockage.

Nous avons considéré quatre modèles d'AS/RS à convoyeur gravitationnel à 625 casiers à 2-classes. La position du point de repos de la machine de déstockage est au milieu du rack et celle de la machine de stockage est la station de dépôt. Le nombre de casiers pour les deux classes est identique pour les quatre modèles. Les modèles proposés sont :

1. Modèle M1 : La classe A est carrée et près de la station de livraison. C'est la configuration donnée par (Hausman et al., 1976), (Rosenblatt et Eynan, 1989) et (Eyan et Rosenblatt, 1994)
2. Modèle M2 : La région dédiée à la classe A est fixée sur les casiers reliant la station de livraison au convoyeur de restockage.
3. Modèle M3 : La classe A est carrée et mise près du convoyeur de restockage.
4. Modèle M4 : L'emplacement du convoyeur de restockage est au même emplacement que la station de livraison.

En faisant varier le taux de rotation des produits de la classe A (20%/60%, 20%/80% et 20%/90%) et la taille des classes présentes dans le système, nous avons constaté que plus la taille de la classe A augmente plus le temps moyen de déstockage augmente. Sauf pour le premier modèle où il diminue et que pour un taux de rotation des produits de 20%/90%, les performances du système sont meilleures.

Le modèle 4 s'avère très efficace par rapport aux autres modèles. Ceci est dû à la position du convoyeur de restockage qui est au même endroit que la station de livraison. Dans les autres modèles, la position du convoyeur de restockage est à l'autre extrémité du rack. Du fait que le rack est profond, nous sommes conduits à

faire du déstockage pour le restockage. Par conséquent, le temps moyen de déstockage augmente.

L'étape suivante est de considérer l'impact des positions des stations de dépôt/livraison et du convoyeur de restockage sur les temps de transport d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel. Mais auparavant, nous avons examiné la position du point de repos de la machine de déstockage. Pour cela, nous avons étudié quatre positions :

1. Modèle M1 : Au centre du rack.
2. Modèle M2 : A la position de la station de livraison.
3. Modèle M3 : Au coin supérieur de la classe A.
4. Modèle M4 : Au centre de la classe A.

Nous avons considéré quatre modèles d'AS/RS à convoyeur gravitationnel à 625 casiers à 2-classes. Le taux de charge pour les quatre modèles est identique (20%/60%). Le nombre de casiers pour les deux classes est aussi identique pour les quatre modèles. En faisant varier la taille des classes présentes dans le système, nous remarquons que, pour des valeurs de tailles des classes, les valeurs de R inférieures ou égales à 13 (ce qui vaut à $N_l/2$, milieu du rack). Le temps moyen de déstockage pour les modèles aux positions du coin supérieur de la classe A et le milieu de la classe A est plus avantageux que les autres modèles. Par contre, pour des valeurs de R supérieures à 13, le temps moyen de déstockage pour le modèle où le point de repos de la machine de déstockage est au centre du rack est meilleur. Ceci est dû à la configuration de la classe A et de sa taille : plus la taille est grande, plus on s'éloigne de la station de livraison.

La configuration du système joue un rôle important et influence beaucoup les performances du système, du fait que le rack est profond et composé de plusieurs couches, et que l'emplacement du convoyeur de restockage soit à l'autre extrémité du rack, à l'opposé de la station de livraison. La disposition des classes données par (Hausman et al., 1976), (Rosenblatt et Eynan, 1989) et (Eyan et Rosenblatt, 1994) n'est pas la meilleure. Il vaut mieux mettre la station de livraison et le convoyeur de restockage au même endroit. De plus, cette configuration nous a donné de meilleurs résultats. Le nombre de classes considéré dans le système dépend de deux facteurs : la taille des classes (R_i) et le taux de rotation des produits.

Puis, nous avons proposé d'évaluer le temps moyen de transport du système en fonction des positions de la station de dépôt/livraison et du convoyeur de restockage. Pour cela, nous avons considéré un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers, avec cinq modèles. Chaque modèle correspond à un emplacement de

la station de dépôt/livraison et du convoyeur de restockage. Les configurations des différents modèles sont données dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Les cinq modèles considérés (Modèles M1, M2, M3, M4 et M5)

| | | |
|----|----------|----------------------|
| M1 | SL | Au coin du rack |
| | CR | A l'autre coin |
| M2 | SL | Au coin du rack |
| | CR | Au centre du rack |
| M3 | SL | Au centre du rack |
| | CR | Au coin du rack |
| M4 | SL et CR | Au centre du rack |
| M5 | SL et CR | Au même coin du rack |

Nous faisons varier la taille de la classe A. D'après les résultats obtenus, le comportement des temps moyens de transport est le suivant :

- Dans les deux cas où le convoyeur de restockage est au centre du rack, nous avons remarqué que le temps moyen de stockage et le temps moyen de déstockage par unité ont diminué.
- Dans le cas où la station de dépôt/livraison et le convoyeur de restockage sont au même coin du rack, nous avons remarqué que plus la distance entre la station de livraison et la classe A, R augmente plus les temps moyen de stockage et de déstockage augmentent. Cependant cela reste toujours plus efficace que de placer la station de dépôt/livraison et le convoyeur de restockage aux deux extrémités opposés du rack.
- Dans le cas où la station de dépôt/livraison et le convoyeur de restockage sont au centre du rack, nous avons remarqué que le temps moyen de stockage et le temps moyen de déstockage par unité ont diminué. Ainsi, nous avons les meilleures performances.

Nous pouvons dire que :

- La position du point de repos de la machine de déstockage a quelque effet sur le temps moyen de déstockage.
- Le meilleur système est lorsque le convoyeur de restockage est au centre du rack.

- La position de la station de livraison a un faible effet sur le temps moyen de déstockage.

A la fin de notre travail, nous avons adapté l'heuristique de stockage/déstockage au stockage par classe où dans chaque classe nous avons appliqué l'heuristique de stockage/déstockage. Le système considéré est un AS/RS à convoyeur gravitationnel à 6250 emplacements avec un taux de rotation de (20%/60%), où nous avons varié le nombre de produits différents à stocker.

A partir des résultats de cette étude et en comparant l'heuristique par classe au stockage aléatoire et à l'heuristique, nous pouvons dire que le temps moyen de déstockage a été réduit considérablement. Les performances du système se sont nettement améliorées. L'heuristique de stockage/déstockage par classe serait une bonne alternative pour l'AS/RS à convoyeur gravitationnel

Le temps moyen de stockage/déstockage pour un stockage par classe est réduit par rapport au temps moyen pour un stockage aléatoire. C'est ce qui nous pousse à dire qu'il y a eu une très grande amélioration des performances du système en utilisant le stockage par classe.

Les résultats de l'étude ont montré, outre une amélioration du temps moyen de déstockage d'un produit, une performance relative différente entre le stockage par classes et le stockage par heuristique en fonction du nombre de références différentes présentes dans le système AS/R à convoyeur gravitationnel.

Enfin, nous proposons un certain nombre de travaux en cours d'étude qui concernent particulièrement la validation expérimentale des modèles analytique des temps moyens de déstockage pour les différents modèles proposés auparavant.

Table des figures & des tableaux

Partie A

Etat de la question sur la politique des systèmes AS/R

Chapitre 1

Les Systèmes Automatisé de Stockage/Déstockage

6

| | |
|---|----|
| Figure 1.1 : Structure d'un système AS/R (AS/RS à charge unitaire). | 9 |
| Figure 1.2 : AS/RS à charge unitaire. | 12 |
| Figure 1.3 : AS/RS à mini charge. | 13 |
| Figure 1.4 : AS/RS multi allées. | 13 |
| Figure 1.5 : AS/RS à racks glissants. | 14 |
| Figure 1.6 : AS/RS à carrousel. | 14 |
| Figure 1.7 : AS/RS à personne embarquée. | 15 |
| Figure 1.8 : AS/RS à étagères profondes. | 16 |
| Figure 1.9 : AS/RS à convoyeur gravitationnel. | 16 |

Chapitre 2

L'AS/RS à convoyeurs gravitationnels, Modélisation du temps moyen de déstockage

21

| | |
|---|----|
| Figure 2.1 : Configuration de l'AS/RS à Convoyeurs Gravitationnels (Sari, 2003) | 24 |
| Figure 2.2 : Vue de dessus d'un AS/RS à Convoyeurs Gravitationnels. | 24 |
| Figure 2.3 : Disposition des produits à l'intérieur des casiers. | 26 |

Chapitre 3

Evaluation des performances des AS/RS dans la littérature

33

| | |
|--|----|
| Figure 3.1 : Analyse des systèmes de production (Draghici et al., 1998) | 35 |
| Figure 3.2 : Processus simplifié de simulation (Revel et al., 2004) | 37 |
| Figure 3.3 : Conception d'un système AS/RS (Roodbergen & Vis, 2009). | 38 |
| Tableau 1 : Les décisions de conception d'un AS/RS (Roodbergen & Vis, 2009). | 39 |
| Tableau 2 : Un aperçu de quelque recherche traitant les problèmes de conception physique (Roodbergen & Vis, 2009). | 43 |
| Tableau 3 : Résumé de quelques recherches sur les modèles du temps de transport (Gu et al., 2010) | 51 |

Chapitre 4

Stockage par classe

60

| | |
|---|----|
| Figure 4.1 : Exemples de configurations de rack non-carrés-en-temps à 3-classes | 64 |
| Figure 4.2 : Exemples de localisation des classes des articles dans un entrepôt | 64 |
| Figure 4.3 : Une vue sur les 3 configurations de classe dans un rack avec trois classes de stockage de produits | 66 |
| Figure 4.4 : Trois différentes configurations du rack non-carrés-en-temps | 68 |
| Tableau 1 : Procédures définies pour déterminer les limites des classes | 63 |
| Tableau 2 : Schéma d'attribution de stockage | 69 |
| Tableau 3 : Travaux sur le temps de transport pour différents AS/RS en stockage par classes | 71 |

Partie B

Stockage par classe dans un AS/RS à convoyeur gravitationnel

Chapitre 5

Modélisation des temps de transport par classe d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel

77

| | |
|--|----|
| Figure 5.1 : Configuration de l'AS/RS à Convoyeurs Gravitationnels (Sari, 2003) | 79 |
| Figure 5.2 : Face déstockage de l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels. | 83 |
| Figure 5.3 : Position du point de repos par rapport à la zone de la classe A. | 84 |
| Figure 5.4 : Position du convoyeur de restockage par rapport à la zone de la classe A. Le cas $0 < R < N_l/2$ | 87 |

Figure 5.5 : Position du convoyeur de restockage par rapport à la zone de la classe A. Le cas $R \geq N_l/2$ 88

Tableau 1 : Temps de transport par classe pour l'AS/RS à convoyeur gravitationnel 92

Chapitre 6

Impact du stockage par classe sur les performances de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel

99

| | |
|--|-----|
| Figure 6.1 : Disposition géographique des classes. | 100 |
| Figure 6.2 : Courbe ABC. | 101 |
| Figure 6.3 : Rack à 2-classes. | 102 |
| Figure 5.4 : Rack à 3-classes. | 102 |
| Figure 6.5. : Face stockage du rack. | 103 |
| Figure 6.6. : Face de déstockage du rack. | 104 |
| Figure 6.7 : AS/RS à convoyeur gravitationnel à 2-classes. | 105 |
| Figure 6.8 : Modèle M1. | 106 |
| Figure 6.9 : Modèle M2. | 106 |
| Figure 6.10 : Modèle M3. | 106 |
| Figure 6.11 : Modèle M4. | 107 |
| Figure 6.12 : Temps moyen de déstockage par rapport aux taux de rotation et R_i pour le modèle M1. | 107 |
| Figure 6.13 : Temps moyen de stockage par rapport aux taux de rotation et R_i pour le modèle M1. | 108 |
| Figure 6.14 : Temps moyen de déstockage par rapport aux taux de rotation et R_i pour le modèle M2. | 109 |
| Figure 6.15 : Temps moyen de stockage par rapport aux taux de rotation et R_i pour le modèle M2. | 109 |
| Figure 6.16 : Temps moyen de déstockage par rapport aux taux de rotation et R_i pour le modèle M3. | 110 |
| Figure 6.17 : Temps moyen de stockage par rapport aux taux de rotation et R_i pour le modèle M3. | 111 |
| Figure 6.18 : Temps moyen de déstockage par rapport aux taux de rotation et R_i pour le modèle M4. | 111 |
| Figure 6.19 : Temps moyen de stockage par rapport aux taux de rotation et R_i pour le modèle M4. | 112 |
| Figure 6.20 : Temps moyen de déstockage par rapport à R_i pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers, pour un taux de rotation de 20%/60% | 113 |
| Figure 6.21 : Temps moyen de déstockage par rapport à R_i pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers, pour un taux de rotation de 20%/90% | 113 |
| Figure 6.22 : Temps moyen de stockage par rapport à R_i pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers, pour un taux de rotation de 20%/60% | 114 |
| Figure 6.23 : Temps moyen de stockage par rapport à R_i pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers, pour un taux de rotation de 20%/90% | 114 |
| Figure 6.24 : Modèle M1. | 116 |
| Figure 6.25 : Modèle M2. | 116 |
| Figure 6.26 : Modèle M3. | 116 |
| Tableau 1 : Coefficients de (Hausman et al., 1976) | 102 |
| Tableau 2 : Influence du taux de rotation et de la taille des classes sur le temps moyen de déstockage (Modèles M1, M2 et M3) | 117 |
| Tableau 3 : Influence du taux de rotation et de la taille des classes sur le temps moyen de déstockage (Modèles M1, M3 et M4) | 117 |

Chapitre 7

Impact des positions des stations de dépôt/livraison et du convoyeur de restockage sur les temps de transport d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel 120

| | |
|--|-----|
| Figure 7.1 : Temps moyen de déstockage par rapport à Ri pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers, pour un taux de rotation de 20%/60% | 122 |
| Figure 7.2 : Temps moyen de déstockage par unité par rapport à Ri pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers, pour un taux de rotation de 20%/60% | 123 |
| Figure 7.3 : Temps moyen de déstockage par unité par rapport à Ri pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers. | 125 |
| Figure 7.4 : Temps moyen de stockage par unité par rapport à Ri pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers. | 126 |
| Figure 7.5 : Temps moyen de déstockage par unité par rapport à Ri pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers. | 127 |
| Figure 7.6 : Temps moyen de stockage par rapport à Ri pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers. | 128 |
| Tableau 1 : Les quatre modèles considérés (Modèles M1, M2, M3 et M4) | 121 |
| Tableau 2 : Les cinq modèles considérés (Modèles M1, M2, M3, M4 et M5) | 124 |

Chapitre 8

Adaptation de l'Heuristique de stockage/déstockage au stockage par classe 130

| | |
|--|-----|
| Figure 8.1 : Face déstockage de l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels. | 135 |
| Figure 8.2 : Temps moyen de déstockage par rapport à Ri pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 625 casiers à 10 couches, pour un taux de rotation de 20%/60% | 136 |
| Figure 8.3 : Temps moyen de déstockage par unité par rapport aux variations du nombre de type de produits pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel de 6250 emplacements. | 138 |
| Tableau 1 : Le temps moyen de déstockage pour l'heuristique de stockage/déstockage par classe en fonction du nombre de type de références et R | 137 |

Résumé :

Notre travail consiste à implémenter un modèle d'AS/RS à convoyeur gravitationnel à stockage par classe dans un programme de simulation, en utilisant le logiciel de simulation des systèmes de production Arena/SIMAN, afin de traiter les points suivants :

- L'impact du stockage par classe sur les performances de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel ;
- L'impact des positions des stations de dépôt/livraison et du convoyeur de restockage sur les temps de transport d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel ;
- L'adaptation de l'Heuristique de stockage/déstockage au stockage par classe.

Le stockage par classe a permis une grande amélioration du temps de cycle de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel, ainsi ses performances globales sont devenues supérieures à celles de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel utilisant le stockage aléatoire.

Mot clés :

Système automatisé de stockage/déstockage, AS/RS à convoyeur gravitationnel, stockage par classe, simulation, Arena, heuristique, performance.

Abstract:

Our work is to implement a model of the flow rack AS/RS with class-based storage in a simulation program, by using ARENA/SIMAN, to address the following points:

- The impact of class-based storage on the performance of the flow rack AS/RS;
- The impact of the positions of deposit/delivery stations and restoring conveyor on transport time of a flow rack AS/RS;
- The adaptation of the Heuristics of storage/retrieval per class-based storage.

The class-based storage allowed a great improvement of the cycle time of the flow rack AS/RS, thus its total performances became higher than those of the flow rack AS/RS using random storage.

Keywords:

AS/RS, flow rack AS/RS, class-based storage, simulation, Arena, heuristic, performance.

ملخص:

يقتضي عملنا تصميم نموذج لنظام آلي للشحن والتفريغ ذو ناقل جاذبي للتخزين حسب الأقسام في برنامج محاكاة باستعمال برمجيات المحاكاة ARENA/SIMAN بهدف معالجة النقاط التالية:

- تأثير التخزين بالأقسام على أداء النظام الآلي للتخزين والتفريغ ذو الناقل الجاذبي.
- تأثير وضعيات محطات الإيداع والتسليم وناقل إعادة التخزين على أزمدة النقل الخاصة بالنظام الآلي للتخزين والتفريغ ذو الناقل الجاذبي.
- تكييف فوقية الاستدلال الخاصة بالتخزين والتفريغ لتتوافق مع التخزين حسب الأقسام.

التخزين حسب الأقسام سمح بتحسين زمن الدورة الواحدة للنظام الآلي للتخزين والتفريغ ذو الناقل الجاذبي، بالإضافة لهذا فإن الأداء العام صار أفضل من ذلك الذي لدى النظام الآلي للتخزين والتفريغ ذو الناقل الجاذبي حيث يكون التخزين عشوائياً.

كلمات مفتاحية:

نظام آلي للشحن والتفريغ، نظام آلي للشحن والتفريغ ذو ناقل جاذبي، التخزين حسب الأقسام، المحاكاة، Arena، فوقية الاستدلال، أداء.