



Université d'Oran 2
Institut de Maintenance et de sécurité Industrielle

THESE

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat « L.M.D »
En Electromécanique

Contribution à l'évaluation des performances d'un flow-rack AS/RS
à chute libre

Présentée et soutenue publiquement par :

M. METAHRI Dhiyaeddine

Le 31/01/2019

Devant le jury composé de :

Noureddine rachid	Maître de conférences A	Université d'Oran 2	Président
Hachemi khalid	Professeur	Université d'Oran 2	Rapporteur
Zebirate soraya	Professeur	Université d'Oran 2	Examinatrice
Lebbah Yahia	Professeur	Université d'Oran 1	Examineur
Sari zaki	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur

Année. 2018/2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وقل زدني علماً

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier Dieu tout puissant de m'avoir donné la volonté, la santé et la patience durant mes années d'études et surtout pendant la réalisation de ce mémoire.

Ensuite, à notre prophète **MOHAMMED** que la prière et le salut **D'ALLAH** soient sur lui.

Je tiens à traduire ma respectueuse reconnaissance à mon directeur de thèse, Monsieur HACHEMI Khalid, d'avoir accepté de diriger ce travail. Qu'il soit remercié en premier pour sa grande disponibilité, son suivi continu, ses conseils constructifs et la qualité de ses idées qui m'ont permis d'atteindre la finalité de ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Monsieur NOUREDDINE Rachid, Maître de conférences A, à l'université d'Oran 2, Algérie, pour avoir accepté de présider le jury d'évaluation et pour ses conseils et son soutien.

Ma reconnaissance va également à Madame ZEBIRATE Soraya, Professeur, à l'université d'Oran 2, Algérie, pour le plaisir qu'elle m'a fait en acceptant d'examiner ce travail et l'intérêt qu'elle y a porté.

Je tiens également à remercier Monsieur LEBBAH Yahia, Professeur, à l'université d'Oran 1, Algérie, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'évaluer ce travail.

Mes meilleurs remerciements vont aussi à Monsieur SARI Zaki, Professeur, à l'université de Tlemcen, Algérie, pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse. C'est un honneur pour moi de l'avoir comme évaluateur de mon travail.

C'est le moment aussi de dire un grand merci à tous ceux qui m'ont aidé pour arriver à terminer mes études supérieures par leurs encouragements et soutien. Je cite surtout mon père, ma mère, mes frères et tous mes amis. J'exprime mes plus sincères gratitude à toutes ces personnes, qui étaient toujours présentes, avec leur humour, leur charme et leur chaleur.

Enfin un remerciement très particulier à ceux qui m'ont donné le courage pour surmonter les moments difficiles durant cette thèse, pour leur soutien et leur confiance ; je citerai toute la famille METAHRI, SAF, MEZAOUROU, à M. MAHDJOUR Tahar, Mme. BOUZID Melha, Mme. ALTENDJI Belkiss, Mme. ZAMRA Hayet, M. ABDERRAHMANE Abdelkader, M. BENAYED Ahmed, M. HADJ-HAMOU Khaled.

À toutes et à tous, un grand merci !

Table des matières

Introduction générale	7
Chapitre 1. Introduction aux systèmes automatisés de stockage/déstockage	
1.1 Introduction.....	11
1.2 Système automatisé de stockage/déstockage AS/RS.....	12
1.2.1 Définition	12
1.2.2 Composition	12
1.2.3 Fonctionnement.....	14
1.2.4 Utilité et inconvénients.....	14
1.3 Types d'AS/RS	15
1.3.1 L'AS/RS à charge unitaire	15
1.3.2 L'AS/RS multi allées	16
1.3.3 L'AS/RS à racks glissants	16
1.3.4 L'AS/RS à mini charge	17
1.3.5 L'AS/RS à carrousel.....	18
1.3.6 L'AS/RS à personne embarquée	18
1.3.7 L'AS/RS à étagères profondes	19
1.3.8 L'AS/RS à convoyeur gravitationnel	20
1.4 Politiques de stockage.....	20
1.4.1 Le stockage dédié	21
1.4.2 Le stockage aléatoire	21
1.4.3 Le stockage aléatoire ouvert.....	21
1.4.4 La politique de stockage Full-turnover	21
1.4.5 Le stockage par classe	22
1.5 Politiques d'ordonnancement	22
1.6 Etat de l'art.....	24
1.6.1 Conception d'un AS/RS et configuration des racks	24
1.6.2 Politiques de stockage	31
1.6.3 Ordonnancement des demandes de stockage/déstockage	33
1.6.4 Temps de cycle.....	36
1.7 Conclusion	41
Chapitre 2. Flow-rack AS/RS à chute libre	
2.1 Introduction.....	43
2.2 Flow-rack AS/RS à chute libre	43

2.2.1 Présentation	43
2.2.2 Composition	44
2.2.3 Fonctionnement	45
2.2.4 Avantages et inconvénients	46
2.2.5 Modélisation discrète du temps moyen de déstockage	46
2.3 Etude comparative entre le flow-rack classique et le flow-rack à chute libre	48
2.3.1 Comparaison des performances	49
2.4 Evaluation des temps de dispensation manuel et automatique des médicaments.....	53
2.5 Conclusion	56
Chapitre 3. Modélisation analytique et validation du temps moyen de déstockage dans le flow-rack AS/RS à chute libre	
3.1 Introduction.....	58
3.2 Modélisation mathématique du temps moyen de déstockage d'un flow-rack AS/RS à chute libre	58
3.3 Validation.....	66
3.4 Conclusion	72
Chapitre 4. Optimisation des dimensions d'un flow-rack AS/RS à chute libre	
4.1 Introduction.....	74
4.2 Formulation du Problème	74
4.2.1 Technique d'énumération.....	76
4.2.2 Optimisation discrète (méthode exacte de résolution).....	80
4.3 Comparaison entre les deux méthodes de résolution.....	83
4.4 Conclusion	84
Conclusion générale.....	85
Références Bibliographiques	87

Abréviations

AS/RS	: Automated Storage/Retrieval Systems
FF-flow-rack AS/RS	: Free Fall flow-rack AS/RS
S/D	: Stockage/Déstockage
D/L	: Dépôt/Livraison
SC	: Simple cycle
DC	: Double cycle
COI	: Cube-per-order index
SKU	: <i>stock keeping unit</i>

Liste des figures

Figure 1.1. Configuration typique d'un AS/RS.

Figure 1.2. AS/RS à charge unitaire.

Figure 1.3. AS/RS multi allées (vue dessus).

Figure 1.4. AS/RS à racks glissants.

Figure 1.5 AS/ RS à mini charge.

Figure 1.6. AS/RS à carrousel.

Figure 1.7. AS/RS à personne embarquée.

Figure 1.8. AS/RS à étagères profondes.

Figure 1.9. AS/RS à convoyeur gravitationnel.

Figure 1.10. Stockage par classe.

Figure 1.11. Les facteurs influençant le débit du système.

Figure 2.1 : Photo réelle d'un flow-rack AS/RS à chute libre « APOTEKA ».

Figure 2.2 : Constitution typique d'un flow-rack AS/RS à chute libre

Figure 2.3 : Fonctionnement du système d'éjection des produits dans un flow-rack AS/RS à chute libre

Figure 2.4 : Représentation des mouvements du produit dans la face de déstockage (face discrète)

Figure 2.5 : Organigramme de l'algorithme de simulation

Figure 2.6 : Comparaison entre les résultats du flow-rack classique AS/RS et du flow-rack AS/RS à chute libre

Figure 2.7 : La déviation entre le temps moyen de déstockage d'un flow-rack classique et le flow-rack à chute libre

Figure 2.8 : Comparaison entre les résultats du temps total d'une demande client donnés par le flow-rack classique AS/RS et ceux donnés par le flow-rack AS/RS à chute

Figure 2.9 : La déviation entre le temps total d'une demande client d'un flow-rack classique et le flow-rack à chute libre

Figure 2.10 : Comparaison entre le débit donné par le flow-rack classique AS/RS et par le flow-rack AS/RS à chute libre

Figure 2.11 : L'organigramme de simulation

Figure 2.12 : La déviation moyenne pour les trois demandes

Figure 3.1 Représentation des mouvements du produit dans la face de déstockage (face continue).

Figure. 3.2 Organigramme de l'algorithme de la simulation

Figure 3.3 Comparaison entre les résultats donnés par le modèle continu et la simulation pour les trois valeurs de V_c

Figure 3.4 La déviation entre le modèle continu et la simulation pour les trois valeurs de V_c

Figure 4.1 Représentation des dimensions admissibles et possibles du rack

Figure 4.2 Organigramme d'algorithme d'optimisation (technique d'énumération).

Figure 4.3 Organigramme d'algorithme d'optimisation discrète.

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Terminologies des AS/RS

Table 3.1 Comparaison entre les résultats donnés par le modèle continu et la simulation pour les trois valeurs de $V_c = 1$ m/s

Table 3.2 Comparaison entre les résultats donnés par le modèle continu et la simulation pour les trois valeurs de $V_c = 2$ m/s.

Table 3.3 Comparaison entre les résultats donnés par le modèle continu et la simulation pour les trois valeurs de $V_c = 3$ m/s.

Tableau 4.1 Dimensions optimales du rack pour une capacité de stockage $N = 100$

Tableau 4.2 Dimensions optimales du rack pour différentes capacités de stockage

Tableau 4.3 Configurations optimales pour différentes capacité de stockage

Introduction générale

Au cours des dernières années, de nombreuses entreprises ont investi intensivement dans des systèmes de stockage automatiques afin de maintenir leurs activités logistiques plus flexibles et efficaces. Les systèmes automatisés de stockage et de déstockage, appelés AS / RS en anglais, ont été largement utilisés dans différentes applications logistiques, de la fabrication à l'entreposage.

Un AS/RS est un système de stockage dans lequel une machine S/D exécute des activités de manutention des produits, sur des trajets fixes dans les allées à l'intérieur des racks de stockage, sans l'intervention humaine directe, et est donc complètement automatisé. Généralement, un AS/RS est constitué des composants suivants : des racks, des machines de stockage/déstockage, des allées, des stations de dépôt/livraison.

Selon la définition de la **Materials Handling Institute**, les systèmes automatisés de stockage et déstockage sont une variété des systèmes de manutention et de contrôle qui prend en charge, stocke et déstocke des produits avec précision, exactitude et célérité.

Les avantages majeurs des AS/RS incluent l'amélioration du débit de sortie, la capacité, la gestion et le contrôle des stocks et la sécurité. Mais, d'un autre côté, ils nécessitent un investissement initial très élevé avec une configuration inflexible.

Une technique moderne pour la manutention automatisée des produits, consiste en un flow rack AS/RS à chute libre (appelés Free Fall flow-rack AS/RS ou, FF-flow-rack AS/RS). Ce système est une nouvelle variante du flow-rack AS/RS, qui utilise un opérateur où une seule machine S/D pour les opérations de stockage, et utilise une combinaison entre le mouvement de chute libre et un convoyeur de transport pour les opérations de déstockage.

Ce nouveau type de système introduit par MEKAPHARM, **MEKAPHARM. (2016)**, est utilisé pour l'automatisation de la distribution des médicaments dans les pharmacies, il est connu par le nom commercial « APOTEKA ». Ce système automatique a été mis en place afin de permettre aux pharmacies de gagner du temps dans la préparation des ordonnances et de venir chercher les commandes par la suite. Aussi il présente également l'avantage de donner aux pharmaciens plus de temps à consacrer aux conseils pour l'usage et la prise des médicaments prescrits.

Afin d'évaluer les performances d'un AS/RS, plusieurs indicateurs de performance peuvent être utilisées, comme : capacité et densité de stockage, accessibilité et temps d'attente des machines S/D et le débit du système (l'inverse du temps moyen de transport de tous les produits),

ce dernier est considéré comme l'un des paramètres les plus importants pour mesurer la performance d'un AS/RS (Han et al. 1987). Ce paramètre représente le temps nécessaire pour une opération de stockage (le temps de déplacement de la machine S/R de son point de repos à l'emplacement désiré) ou de déstockage (le temps de retour à la station de dépôt/livraison). Il comprend les deux temps : le temps de déplacement de la machine S/R et le temps nécessaire pour récupérer/déposer un produit dans une cellule. Ce dernier est généralement indépendant de la forme des racks et de la vitesse de la machine S/R. (**Hausman et al. (1976); Bozer et al. (1984); Hu et al. (2005); Sari et al. (2005)**).

Nous nous intéressons dans ce travail à la modélisation mathématique (continue et discrète) du temps moyen de déstockage d'un flow-rack AS/RS à chute libre.

Le modèle proposé (continu) est capable de fournir un outil pratique et rapide pour estimer le temps moyen de déstockage dans un flow-rack AS/RS à chute libre, évaluer différentes techniques de stockage et optimiser les dimensions du rack.

Cette thèse est composée de quatre chapitres :

- Introduction aux systèmes automatisés de stockage/déstockage.
- Flow-rack AS/RS à chute libre.
- Modélisation analytique et validation du temps moyen de déstockage dans le flow-rack AS/RS à chute libre.
- Optimisation des dimensions d'un flow-rack AS/RS à chute libre.

Le premier chapitre représente des généralités sur les systèmes automatisés de stockage/déstockage AS/RS. Nous commencerons par la définition, composition, fonctionnement, utilité & inconvénients d'un AS/RS. Ensuite, nous exposons les différents types d'AS/RS, politiques de stockage et les politiques d'ordonnancement. Finalement, nous présenterons un aperçu sur les problématiques étudiées dans la littérature des AS/RS.

Le deuxième chapitre se compose de deux grandes parties. Nous réservons la première partie à la présentation générale du flow-rack AS/S à chute libre. Tout d'abord nous commençons par la composition, fonctionnement, avantages et inconvénients de ce système. Ensuite, nous développerons son modèle discret du temps moyen de déstockage. La deuxième partie est consacrée à la présentation des avantages du FF-flow-rack AS/RS. Pour ce faire nous allons effectuer deux études comparatives entre ce système et :

- 1- Le flow-rack classique.
- 2- La dispensation manuelle des médicaments.

Le troisième chapitre, constitue la contribution majeure de cette thèse, il est réservé à la modélisation mathématique du temps moyen de transport d'un flow-rack AS/RS à chute libre. Nous allons développer une expression analytique continue pour le calcul du temps moyen de transport lors d'une opération de déstockage. Par la suite, nous validons le modèle développé (continu) à travers une comparaison entre les résultats donnés par ce modèle avec ceux donnés par la simulation. Le quatrième chapitre est consacré à l'optimisation des dimensions du FF-flow-rack AS/RS. Ce chapitre contient deux parties principales, la première est consacrée à présenter les résultats d'optimisation en utilisant une technique d'énumération pour déterminer la configuration optimale du rack.

Dans la seconde partie nous allons faire la même chose mais avec une méthode d'optimisation discrète (méthode exacte de résolution). Nous allons formuler le problème comme un problème d'optimisation non linéaire en nombres entiers (PNLNE). Où, la fonction objective à minimiser est l'expression continue du temps moyen de déstockage.

Nous allons effectuer cette étude afin de formuler une recommandation concernant la conception du flow-rack AS/RS à chute libre, qui peut aider les concepteurs d'AS/RS.

Enfin nous présentons une conclusion générale où nous résumons les résultats obtenus et les perspectives possibles.

Chapitre 1. Introduction aux systèmes automatisés de stockage/déstockage

1.1 Introduction

1.2 Système automatisé de stockage/déstockage AS/RS

1.2.1 Définition

1.2.2 Composition

1.2.3 Fonctionnement

1.2.4 Utilité et inconvénients

1.3 Types d'AS/RS

1.4 Politiques de stockage

1.5 Politiques d'ordonnancement

1.6 Etat de l'art

1.7 Conclusion

1.1 Introduction

Au cours des dernières années, de nombreuses entreprises ont investi intensément dans les systèmes de stockage automatiques pour maintenir leurs activités logistiques plus flexibles et efficaces. Les systèmes automatisés de stockage et déstockage (Automated Storage and Retrieval Systems, AS/RS, en anglais) ont été largement utilisés dans les centres de production et de distribution, pour la manutention des produits et la gestion des stocks. Les AS/RS ont été adoptés non seulement comme des alternatives aux entrepôts traditionnels, mais aussi comme une partie des systèmes industriels avancés (Lee, 1997). Les avantages majeurs des AS/RS incluent l'amélioration du débit de sortie, la capacité, la gestion et le contrôle des stocks et la sécurité. Mais, d'un autre côté, sachant que l'investissement initial est très élevé, il est primordial de bien évaluer les performances d'un AS/RS avant son installation, car les modifications à posteriori sont plus difficiles et coûteuses.

Un AS/RS est un système de stockage, où une machine effectue des activités de manutention, sur des chemins fixes dans les allées à l'intérieur des racks de stockage, sans l'interférence d'un opérateur, il est donc complètement automatisé. Généralement, un AS / RS est constitué des composants suivants : rack de stockage, machines de stockage et déstockage, convoyeurs et de stations de dépôt/livraison. On distingue plusieurs types d'AS/RS, suivant leur structure et leurs applications. Ainsi on peut citer : les AS/RS à charge unitaire, les AS/RS multi-allées, les AS/RS à racks glissants, les AS/RS à mini-charge, les AS/RS à carrousel, les AS/RS à personne embarqué, les AS/RS à étagère profonde, les AS/RS à convoyeur gravitationnel ou flow-rack AS/RS.

L'objet de ce premier chapitre est de présenter le cadre théorique et méthodologique sur lequel s'appuie cette thèse : celui des systèmes automatisés de stockage/déstockage. Nous commencerons par la définition, composition, fonctionnement, et utilité & inconvénients d'un AS/RS. Ensuite, nous exposons les différents types d'AS/RS, politiques de stockage et les politiques d'ordonnement. Finalement, nous présenterons un aperçu sur les problématiques étudiées dans la littérature des AS/RS.

1.2 Système automatisé de stockage/déstockage AS/RS

1.2.1 Définition

Selon la définition de la **Materials Handling Institute**, les systèmes automatisés de stockage et déstockage sont une variété des systèmes de manutention et de contrôle qui prend en charge, stocke et déstocke des produits avec précision, exactitude et célérité.

Pratiquement, un AS/RS est une combinaison d'équipements géré par un système de contrôle pour la manutention des produits (transporter, déstocker, stocker,..) sans l'intervention humaine directe.

1.2.2 Composition

Généralement, un système automatisé de stockage/déstockage inclut les principaux composants suivants :

- Des étagères de stockage (Racks).
- Des allées donnant accès aux racks.
- Des machines de stockage/déstockage (S/D).
- Des points d'entrées/sorties.
- Un système de contrôle gérant le tout.

La figure. 1.1 illustre la configuration typique d'un AS/RS.

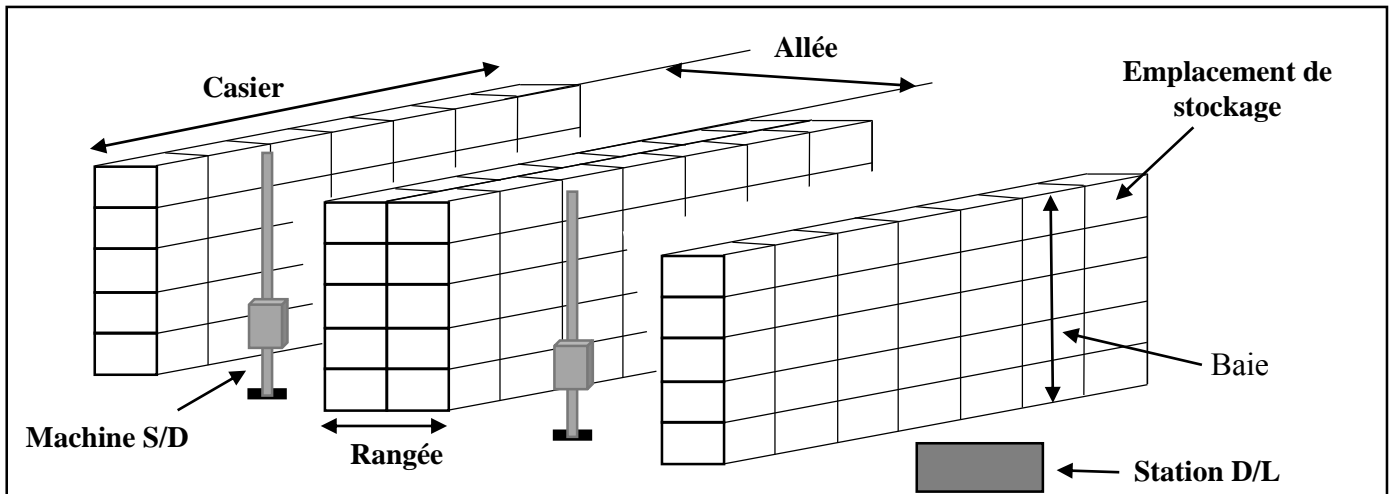


Figure 1.1. Configuration typique d'un AS/RS.

Dans le **tableau 1.1**, nous allons présenter les différentes terminologies utilisées dans la littérature des AS/RS.

Tableau 1.1. Terminologies des AS/RS

Terminologie	Appellation en anglais	Définition
Emplacement de stockage	Storage segments	C'est l'unité de stockage unitaire et nécessaire pour le stockage d'un ou plusieurs produits.
Casier	Storage bin	C'est l'ensemble des emplacements de stockages placés les uns à la suite des autres en allant en profondeur.
Baie	Bay	C'est l'ensemble des casiers placés les uns à la suite des autres qui forment une colonne.
Rangée	Row	C'est l'ensemble des casiers placés les uns à la suite des autres qui forment une ligne.
Etagère	Rack	C'est une structure métallique tridimensionnelle formée de plusieurs casiers de stockage.
Allée	Aisle	C'est l'espace entre les étagères où circule la machine S/D.
Machine de stockage/déstockage (S/D)	Storage/Retrieval machine (S/R)	C'est une grue automatique pour le stockage/déstockage des produits, elle se déplace à la fois horizontalement et verticalement.
Module de stockage	Pallets or container	Sont des formes standard (des bacs, des boîtes de carton,..) placés dans les casiers, manipulés par les machines S/D.
Station (D/L) Dépôt /Livraison	Pick up/drop-off station (P/D)	C'est le point intermédiaire pour le transfert des produits entre l'AS/RS et l'environnement extérieur.

1.2.3 Fonctionnement

Pour le stockage ou le déstockage d'un produit, la machine S/D se déplace à la fois verticalement et horizontalement vers le produit désiré, qui a été sélectionné par un opérateur, où cette sélection est transmise à la machine S/D via le système de contrôle.

On distingue deux opérations :

- a- L'opération de stockage : c'est de transporter un produit de la station D/L vers le casier déterminé.
- b- L'opération de déstockage : c'est de récupérer un produit du casier sélectionné et le transporter vers la station D/L.

Il y a deux modes de fonctionnement de la machine S/D :

- 1- Fonctionnement en simple cycle (SC) : la machine S/D visite un seul casier, c'est-à-dire, elle effectue une seule opération (stockage ou déstockage).
- 2- Fonctionnement en double cycle (DC) : la machine S/D visite deux casiers, elle commence par une opération de stockage puis elle passe directement vers une opération de déstockage.

1.2.4 Utilité et inconvénients

a- Utilité :

Parmi les facteurs importants qui conduisent à implémenter les AS/RS dans les entreprises et les centres de distribution selon (**Zollinger, 1999**), on peut citer :

- 1- L'économisation de l'espace :
 - Diminution de l'espace nécessaire pour le stockage (permet d'exploiter la hauteur).
 - Augmentation de la capacité de stockage.
- 2- Gestion de stock :
 - Identification de la qualité et la quantité des produits stockés.
 - Amélioration de la traçabilité.
- 3- Optimisation de la production :
 - L'ordonnancement de la production.
 - Réduction des temps de localisation et livraison des produits.
 - Augmentation du rendement de la production.
 - Meilleure flexibilité.

- 4- Les contraintes socio-économiques :
- Réduction des vols.
 - Réduction de la main-d'oeuvre.
 - Réduction des risques de détérioration des produits.

b- Inconvénients

Malgré les nombreux avantages offerts par les AS/RS, ils présentent certains inconvénients tels que :

- Une configuration inflexible et une capacité fixe, une fois les AS/RS sont installées.
- les AS/RS nécessitent un investissement très élevé.

1.3 Types d'AS/RS

Les structures d'AS/RS sont conçues en fonction de la taille, poids et le volume des produits à manipuler, ainsi que les caractéristiques de l'entrepôt et leurs applications. Ces différentes structures comprennent :

- L'AS/RS à charge unitaire,
- L'AS/RS multi allées,
- L'AS/RS à racks glissants,
- L'AS/RS à mini charge
- L'AS/RS à carrousel,
- L'AS/RS à personne embarquée,
- L'AS/RS à étagères profondes,
- L'AS/RS à convoyeur gravitationnel.

1.3.1 L'AS/RS à charge unitaire

L'AS/RS à charge unitaire est le système basique des autres types. Il est constitué de racks parallèles, fixes et ont une profondeur unitaire (un casier contient une seule charge). Les racks sont séparés par des allées, chaque allée est équipée d'une machine de stockage/déstockage, conçue pour la manutention des produits, elle se déplace verticalement et horizontalement et guidée par des rails au sol. (voir figure. 1.2).

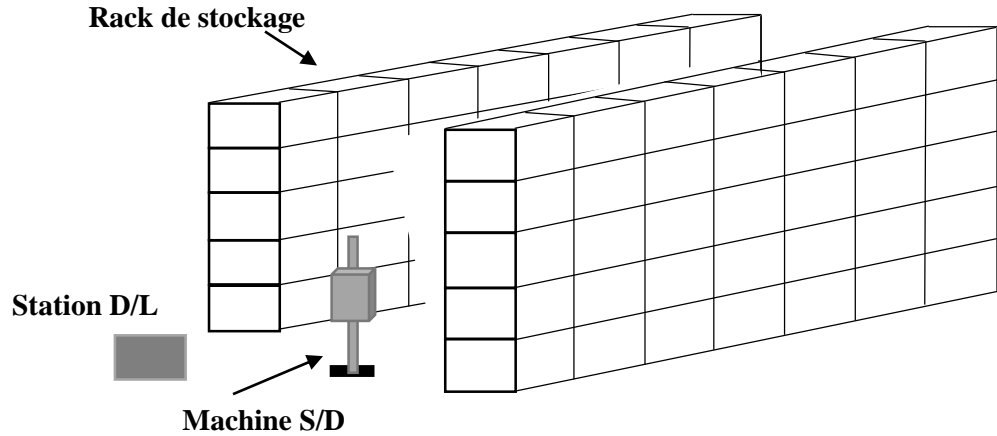


Figure 1.2. AS/RS à charge unitaire.

1.3.2 L'AS/RS multi allées

L'AS/RS multi allées est une variation de l'AS/RS à charge unitaire sauf qu'il est équipé, en plus d'une allée commune reliant toutes les allées. Ce système a une seule machine qui peut servir plusieurs allées à la fois, cette machine S/D se déplace verticalement le long des colonnes formant les racks, horizontalement le long des allées de desserte et le long de l'allée commune dont l'une des extrémités est équipée d'une station de dépôt/livraison (D/L). (Voir figure. 1.3.).

La particularité de ce système est son coût réduit par rapport aux autres types, et son faible débit à cause l'utilisation d'une seule machine S/D.

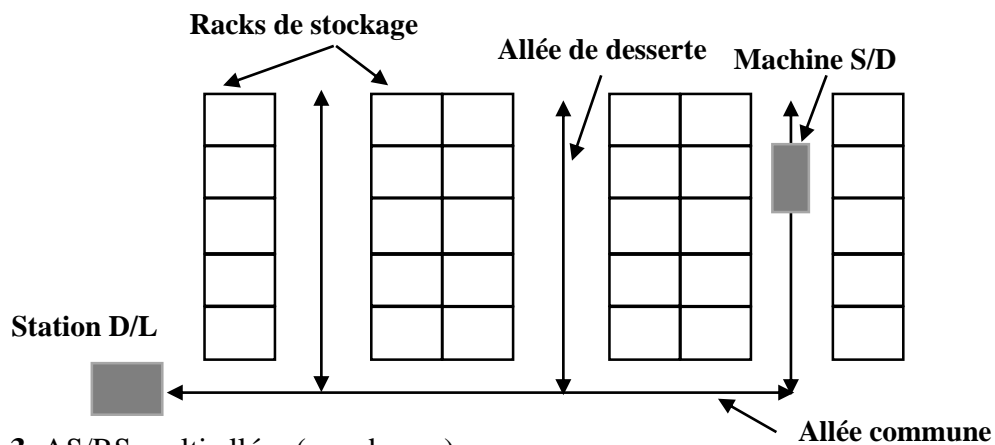


Figure 1.3. AS/RS multi allées (vue dessus).

1.3.3 L'AS/RS à racks glissants

Ce système est une variation des AS/RS multi allées. Dans ce système il y a une seule allée de service qui n'apparaît que pendant une opération de stockage ou déstockage. Cette allée est formée

par le glissement latéral de deux racks mitoyens, par un mécanisme, sur des rails. (voir figure. 1.4.). Ce système permet d'optimiser la capacité de l'entrepôt.

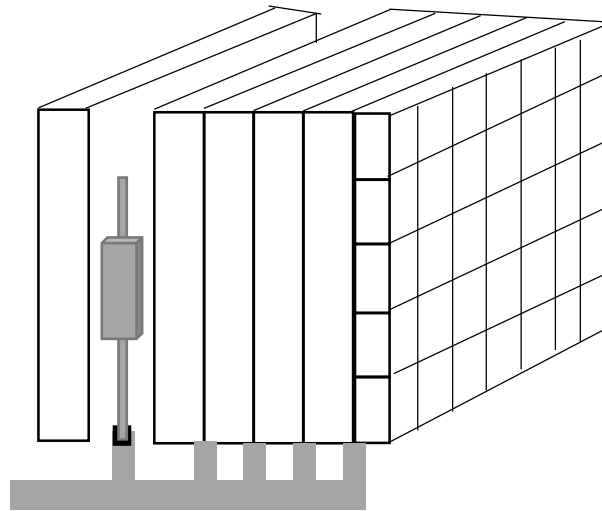


Figure 1.4. AS/RS à racks glissants.

1.3.4 L'AS/RS à mini charge

L'AS/RS à mini charge est conçu pour manipuler des petites charges contenues dans des bacs (le poids de charge variant entre 45 et 225 Kg). Un casier peut contenir plusieurs produits, ce qui permet de stocker plus de matériel en moins d'espace. (Voir figure. 1.5.).

Pour le déstockage d'un produit, la machine S/D déstocke le casier concerné en entier et le transfère vers la station D/P où il y a un opérateur qui retire le produit désiré.

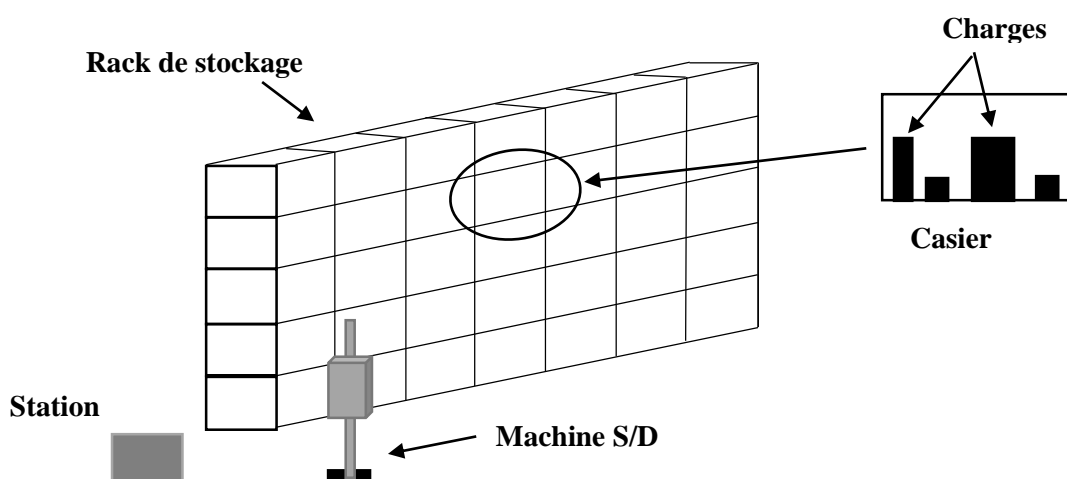


Figure 1.5. AS/RS à mini charge.

1.3.5 L'AS/RS à carrousel

Le système consiste en un ensemble de casiers montés sur des convoyeurs qui tourne horizontalement ou verticalement sur des rails ovales. On trouve deux types : carrousel horizontal et carrousel vertical.

Dans ces systèmes ce sont les casiers qui se déplacent vers l'extrémité du rack où un opérateur stocke ou déstocke les produits, ce qui représente une bonne alternative au système à mini charge. (voir figure. 1.6.).

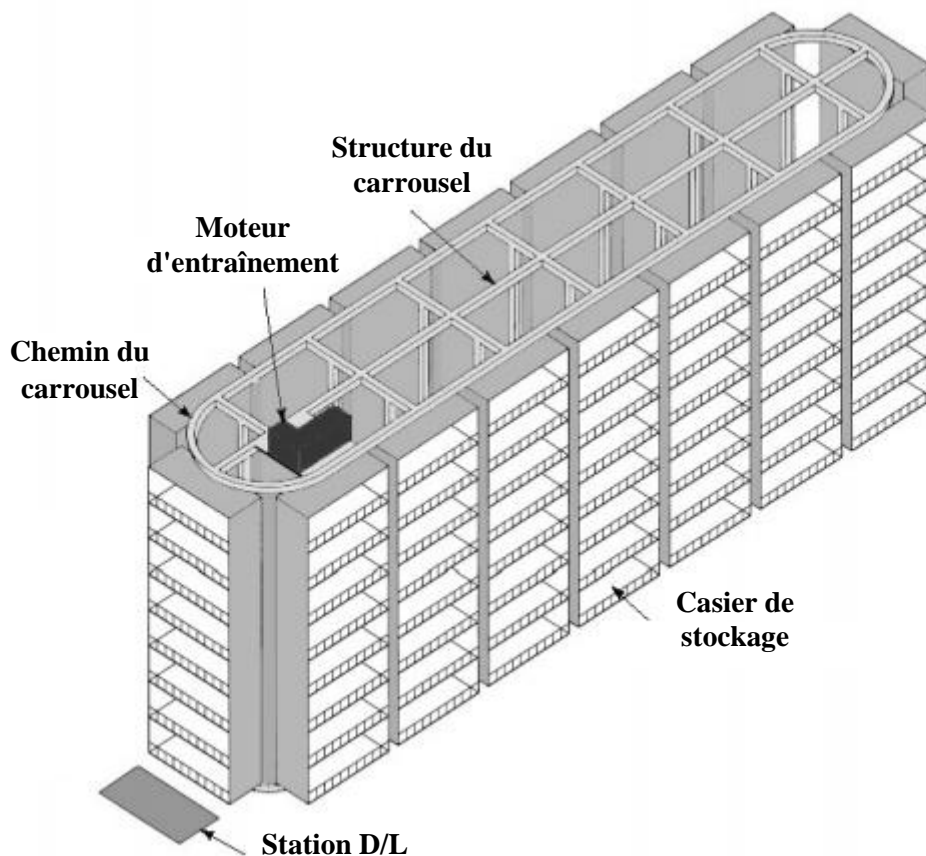


Figure 1.6. AS/RS à carrousel.

1.3.6 L'AS/RS à personne embarquée

L'AS/RS à personne embarquée permet de stocker plusieurs produits dans chaque casier. Le stockage/déstockage des produits se fait en une seule opération à l'aide d'un opérateur montée sur une plate-forme mobile, ce qui permet d'augmenter le débit du système. Les produits sont transportés vers la station D/L par la machine S/D. la plateforme est équipée de système automatique pour la manutention des produits lourds. (voir figure. 1.7.).

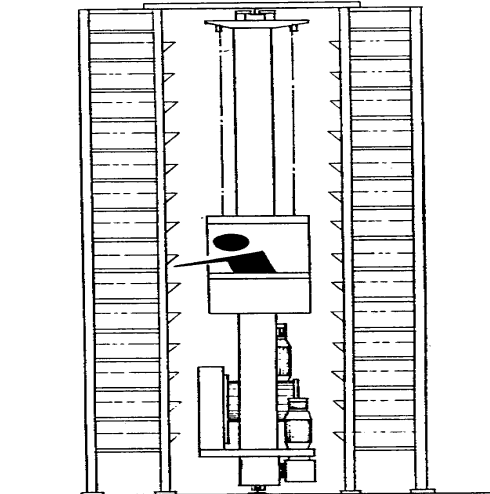


Figure 1.7. AS/RS à personne embarquée.

1.3.7 L'AS/RS à étagères profondes

Il s'agit d'un système de stockage de charge unitaire à haute densité approprié pour stocker une grande quantité de charges unitaires. Dans chaque casier il est possible de stocker jusqu'à 10 produits l'un derrière l'autre (en multi couches). Les charges peuvent se déplacer horizontalement à l'intérieur du casier. Ils sont stockés d'un côté du casier et déstockés de l'autre côté. (voir figure. 1.8.).

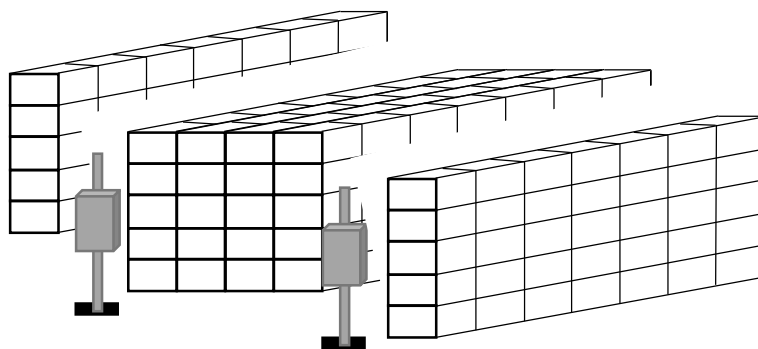


Figure 1.8. AS/RS à étagères profondes.

1.3.8 L'AS/RS à convoyeur gravitationnel

L'AS/RS à convoyeur gravitationnel est une variation des AS/RS à étagère profondes. Il est composé d'un rack profond constitué d'un ensemble de casiers inclinés. Chaque casier est équipé d'un convoyeur gravitationnel pour permettre le glissement des produits d'un bout à l'autre du casier. Le stockage des produits se fait sur une face par la machine de stockage et le déstockage se fait sur l'autre face par la machine de déstockage, où ces deux machines S/D sont liées par un convoyeur de restockage permettant à la machine S/D d'accéder aux produits pour les restocker. (voir figure. 1.9.).

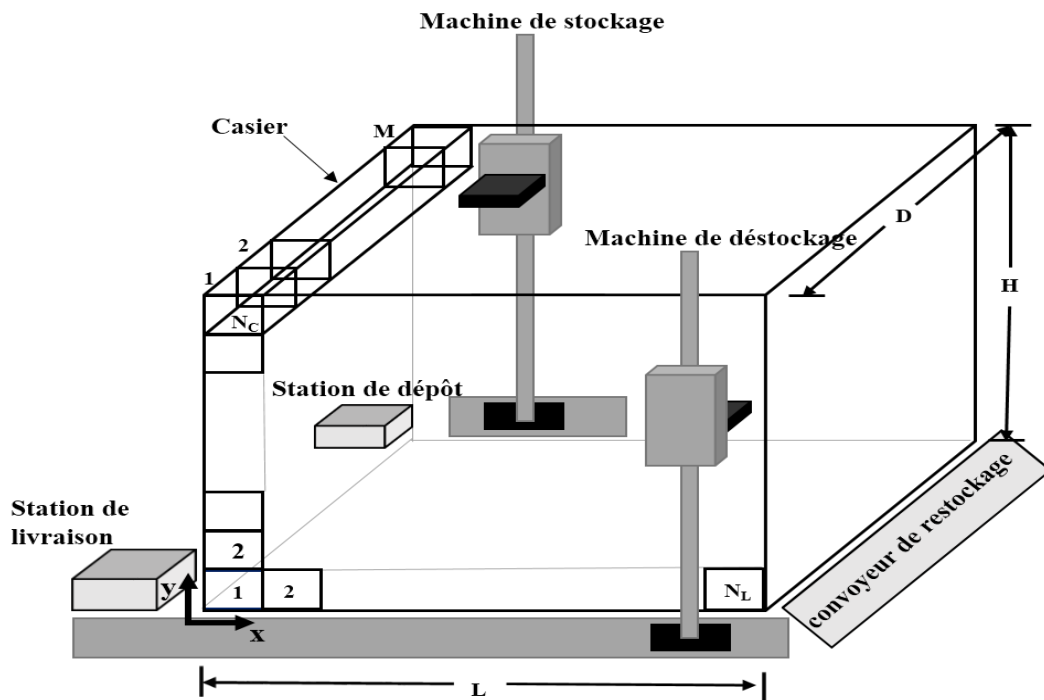


Figure 1.9. AS/RS à convoyeur gravitationnel.

1.4 Politiques de stockage

La politique du stockage tente de trouver un moyen efficace de localiser les produits dans un entrepôt en vue d'améliorer l'efficacité opérationnelle de la préparation de commande. Elle influence sur presque tous les indicateurs clés de performances d'un entrepôt comme le temps et le coût de préparation de commandes (Muppani et Adil. 2008a).

La politique du stockage est considérée comme optimale si elle minimise le temps moyen nécessaire pour stocker et déstocker un produit tout en satisfaisant les différentes contraintes imposées par le système. (Goetschalckx et Ratliff. 1990).

Il existe plusieurs méthodes pour attribuer les produits vers les casiers de stockage dans les racks. Les cinq principales politiques de stockage abordées dans les littératures sont : le stockage dédié, le

stockage aléatoire, le stockage aléatoire ouvert (closest open location storage), le stockage à base de pleine-rotation (full-turnover based storage) et le stockage par classes. (**Hausman et al. (1976)**; **Graves et al. (1977)**; **Schwarz et al. (1978)**; **Goetschalckx Ratliff (1990)**; **Van den Berg (1999)**; **Roodbergen et Vis (2009)**).

1.4.1 Le stockage dédié

Avec cette politique de stockage, l'espace de stockage est partagé en blocs, chacun est utilisé pour stocker un produit déterminé. Ces blocs peuvent être déterminés par l'activité et les niveaux de stocks ou par la taille de stock (**Lee et Schaefer, 1997**).

1.4.2 Le stockage aléatoire

Pour cette méthode, n'importe quel produit peut être stocké dans n'importe quel casier. C'est la plus simple entre différentes stratégies de stockage et est largement appliqué dans la pratique puisqu'elle exige souvent moins d'espace que d'autres méthodes, et a pour résultat un meilleur niveau d'utilisation de tous les racks (**Petersen et Gerald. 2004**). Par conséquent, la politique de stockage aléatoire est souvent utilisée comme point de repère pour évaluer la performance des autres politiques.

1.4.3 Le stockage aléatoire ouvert

Le principe de cette méthode est d'utiliser le premier emplacement vide rencontré pour stocker les produits. Cela conduit généralement à un AS / RS où les racks sont pleins autour de la station D/L et progressivement plus vides vers l'arrière. (**Roodbergen et vis 2009**).

1.4.4 La politique de stockage Full-turnover

Le principe de la politique de stockage Full-turnover est de déterminer les emplacements de stockage pour les produits en fonction de leur demande ou leur fréquence de rotation, dans le but de réduire les temps moyens de simple ou double cycle en stockant des produits à forte demande dans des emplacements qui sont facilement accessibles (près de la station D/L). Par contre les produits à faible rotation sont stockés plus loin de la station D/L. Une hypothèse importante de cette règle est que les fréquences de rotation doivent être connues à l'avance.

Heskett. (1964) a présenté la règle cube-per-order index (COI), qui sera utilisé par **Van den Berg et Gademann. (1999)** pour estimer la demande d'un produit. La règle (COI) représente le rapport

entre l'espace de stockage et le nombre des demandes du produit dans une période. Cette règle attribue le produit avec la plus faible COI aux emplacements plus proches du point D/L.

1.4.5 Le stockage par classe

Pour des raisons pratiques, il est plus facile si une politique de stockage Full-turnover est combinée avec un stockage dédié. Afin de réduire les besoins en espace et repositionnement périodiques des produits, la politique de stockage par classe peut être utilisée. Cette stratégie de stockage consiste à subdiviser les casiers en classes (voir figure. 1.10.). Chaque produit est par la suite affecté à l'une des zones, en fonction de leur fréquence d'entrée/sortie, et stocké de façon aléatoire dans les classes respectives.

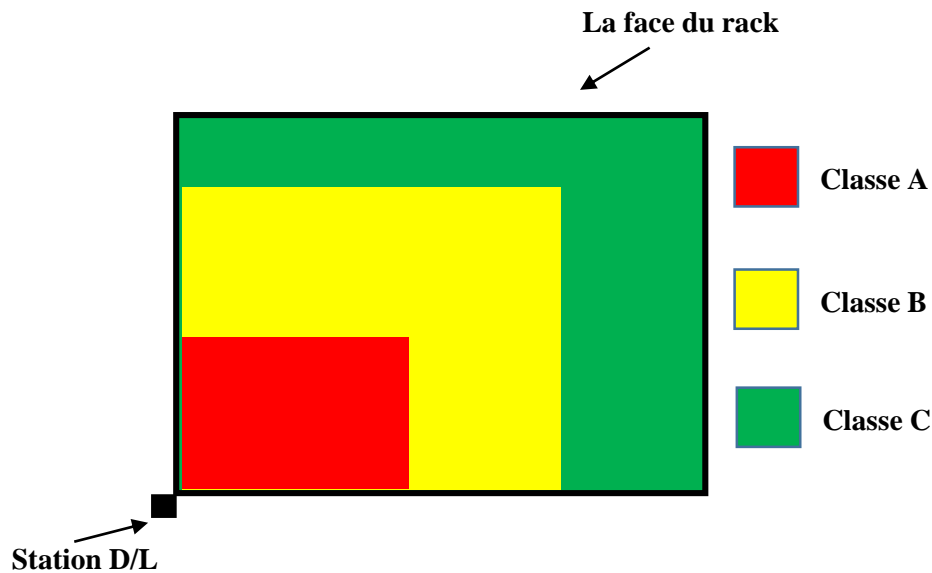


Figure 1.10. Stockage par classe.

1.5 Politiques d'ordonnement

Lorsqu'un AS/RS a été physiquement mis en œuvre, les limites de ses capacités d'exploitation sont fixes. Toutefois, atteindre le plein potentiel du système dépend de la façon dont le système est contrôlé. Les stratégies de contrôle sont les règles qui déterminent les actions exécutées par les machines S/R de l'AS/RS afin de réduire au minimum le temps de déplacement. Une séquence optimale contient le nombre maximal de cycles combinés. (Pohjalainen, A. 2015).

La liste des ordres de déstockage est variable à chaque instant. Les demandes effectuées sont supprimées de la liste et les nouvelles demandes sont ajoutées. Il y a deux façons de régler ce problème.

a- séquençage statique ou par bloc : c'est de sélectionner un bloc de demandes le plus urgent, et les séquencer. Quand ils sont terminés, sélectionner le bloc suivant et ainsi de suite. L'avantage de séquençage statique est qu'il nécessite moins de calcul, car l'ordre des tâches déjà séquencées n'est pas changé. (**Roodbergen et al. 2009**).

b- Séquençage dynamique : reséquence toute la liste de demandes chaque fois qu'une nouvelle demande est ajoutée (**Han et al. 1987**). Le séquençage dynamique a un avantage sur le séquençage statique car il utilise les nouvelles informations qui viennent de mettre à jour le bloc des demandes à séquencer et l'ensemble des emplacements ouverts.

Divers algorithmes et heuristiques peuvent être utilisés pour ordonner les demandes de stockage/déstockage. Nous pouvons citer les méthodes suivantes :

- Premier arrivé, premier servi (FCFS) : les demandes de déstockage seront programmés par ordre de leur apparition.
- le plus proche voisin (Nearest-neighbour), (**Han et al. 1987**) : c'est de sélectionner une paire de demandes (stockage, déstockage), telles que la distance entre les deux emplacements est minimale.
- Le plus court temps d'accomplissement (Shortest completion time) : les demandes de déstockage avec le plus court délai d'achèvement seront les premiers servis.
- (distance supplémentaire minimale) Shortest leg (**Han et al. 1987**) : l'emplacement de stockage est sélectionné de tel sorte que la distance supplémentaire parcourue pour effectuer la demande de stockage soit minimale lors d'un déplacement vers l'emplacement de déstockage.
- En ligne asymétrique TSP (**Ascheuer et al. 1999**) est une approche qui inclut une heuristique et une méthode optimale de branch-and-bound pour déterminer les séquences de tous les produits connus.

D'autres approches pour trouver des solutions au problème du séquençage comprennent les réseaux de neurones (**Wang et Yih. 1997**), systèmes experts (**Linn et Wysk. 1990 a, b**), l'intelligence artificielle (**Seidmann. 1988**), les algorithmes génétiques (**Krishnaiah et al. 2003**) et la méthode Taguchi (**Lim et al. 1996**). Ces méthodes peuvent être appliquées dans des situations à peu d'informations. En outre, ces méthodes sont capables d'apprendre et de s'adapter aux changements. (**Roodbergen et al. 2009**).

1.6 Etat de l'art

Le problème d'évaluation des performances des AS/RS a fait l'objet de nombreuses études. La littérature qui lui est relative est assez importante, plusieurs revues ont déjà été réalisées.

Le débit du système (le nombre de produits déstockés par unité de temps) est considéré comme la plus importante performance des AS/RS par (Han et al. 1987). L'amélioration du débit de sortie d'un AS/RS dépend de leur conception et divers aspects de contrôle, tels que les politiques de stockage, le positionnement du point de repos de la machine S/R, l'ordonnancement des demandes de stockage/déstockage et la modélisation du temps de transport de la machine S/R (figure. 1.11.). Pour cela, nous présentons une revue générale des travaux de recherche précédents concernant les critères de performances des AS/RSs. Nous concluons cette partie par une un positionnement des contributions de cette thèse.

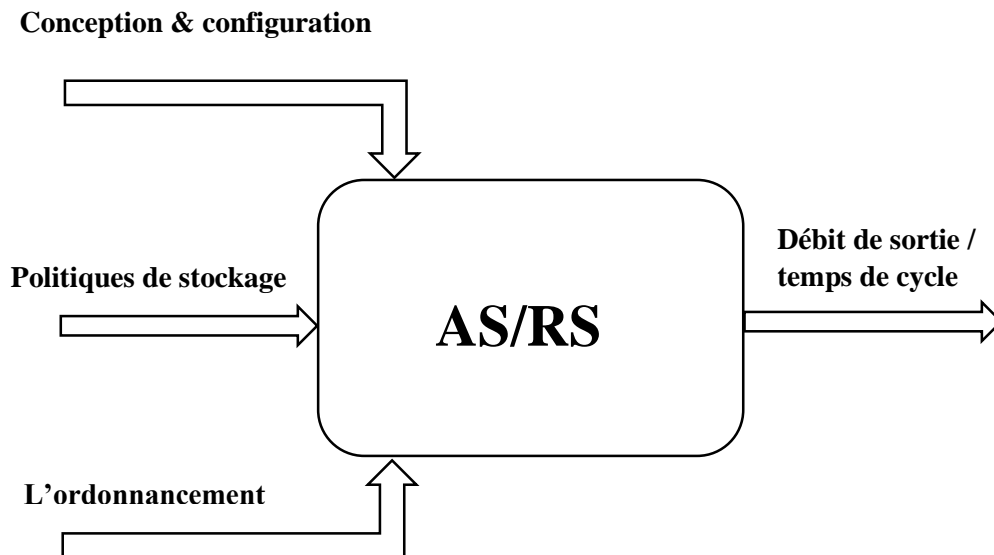


Figure 1.11. Les facteurs influençant le débit du système.

1.6.1 Conception d'un AS/RS et configuration des racks

Le temps de réponse d'un système de stockage est principalement influencé par sa forme (configuration), la position des points de repos de la machine S/R, et l'emplacement des points d'entrée/sortie (I/O). (Yang et al. 2015).

Il est nécessaire de concevoir un AS/RS de telle manière qu'il peut traiter efficacement les demandes actuelles et prochaines tout en évitant les blocages et la capacité limitée, en raison de l'inflexibilité de la disposition physique des AS/RSs qu'ont des investissements très coûteux. La conception d'un AS/RS passe en premier lieu par la détermination de sa configuration physique.

Elle comprend deux aspects. Tout d'abord, le type de l'AS/RS. Deuxièmement, le système choisi doit être configuré, par exemple, en décidant sur du nombre, longueur, hauteur des allées et la capacité de stockage, nombre d'emplacements, la capacité tampon des stations D/L, le nombre de machines S/D, leur vitesse horizontale/verticale, et l'emplacement du point de repos. (**Roodbergen et al. 2009**).

La configuration pour une capacité déjà définie est considérée optimale si elle minimise le coût et le temps moyen de stockage/déstockage. Un nombre considérable d'articles ont exploré comment concevoir un système efficace de stockage/déstockage. **Ashayeri et al. (1985)** ont présenté un modèle mathématique pour le calcul du nombre optimal de racks et de la largeur et la longueur optimale du magasin. Ce modèle permet de déterminer les principales caractéristiques de construction d'un magasin de stockage. L'objectif du modèle était de minimiser l'investissement et les coûts d'exploitation sur la durée de vie du projet. **Park et Webster. (1989)** ont élaboré une procédure d'optimisation pour faciliter la conception des AS/RSs. **Bozer et al. (1990)** ont évalué les performances d'une approche géométrique, aussi ils ont développé un algorithme de conception en se concentrant sur un AS/RS à charge réduite. L'objectif de l'algorithme de conception était la réduction du nombre des allées dans le magasin soumis à deux types de contraintes de capacité : l'espace de stockage et le débit. Dans un autre papier, **Bozer et al. (1996)** ont présenté un algorithme de conception pour déterminer le nombre quasi-minimum des ramasseurs nécessaires dans un même AS/RS à charge réduite. L'algorithme est basé sur un modèle analytique approximatif, pour estimer l'utilisation des ramasseurs et l'utilisation de la machine S/R. **Derks (1993)** a montrer que l'approche holistique dans la conception des systèmes est beaucoup plus performante que l'approche réductionniste conventionnelle. **Trevino et al. (1994)** ont développé une approche pour aider les ingénieurs à obtenir une conception d'un AS/RS à carrousel qui répond aux besoins de stockage, contraintes d'espace et exigences de débit en minimisant le coût. **Lee et al. (2000)** ont démontré l'intérêt d'un AS/RS à cellule modulable 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. (2000) a étudié la conception et modélisation d'AS/RS à double navette. **Inman. (2003)** a étudié l'utilisation de AS / RSs dans l'industrie automobile. L'auteur a présenté un modèle basé sur le nombre d'emplois qui doivent être reportés pour déterminer la capacité de l'AS/RS. En conséquence, la conception de l'AS/RS est complètement subordonnée à des processus d'assemblage dans l'installation. **Hwang et al. (2002)** ont étudié la conception d'un AS/RS à charge réduite en combinaison avec des AGV (véhicules guidés automatisés). Ils ont déterminé le

nombre optimal de charges à transférer par chaque AGV aux différentes machines, à l'aide des modèles non linéaires et des heuristiques en combinaison avec une conception optimale de l'AS/RS. **Parc et Webster. (1989 a)** ont abordé la conception d'entrepôts en proposant une approche qui simultanément sélectionne les équipements de stockage utilisé (AS/RS), la taille globale et la forme de la zone de stockage. **Le-Duc et al. (2006)** et **De Koster et al. (2006)** ont étudié la conception optimale d'un AS/RS profond sous plusieurs stratégies de stockage (stockage aléatoire, stockage par classes et stockage full-turnover). Pour optimiser la conception du rack, toutes ces recherches ont supposé que la vitesse de la machine S/R est constante et ignoré l'accélération/décélération. **Yang et al. (2015)** ont étendu les travaux précédents par la considération des caractéristiques réelles de fonctionnement de la machine S/R pour obtenir la conception optimale. **Kuo et al. (2007)** ont proposé des modèles de calcul de conceptions efficaces pour les AS/RS à charge unitaire basée sur la technique de véhicule autonome (AVS/RS). Les véhicules, le temps de cycle et la distribution de probabilité pour douze scénarios sous des hypothèses d'exploitation réalistes ont été formulés et utilisés pour générer le temps de transaction attendu. **Malmborg. (2001)** a présenté des outils de conception analytiques d'un AS/RS à véhicules autonomes, pour la modélisation des performances liées aux attributs clés du système tel que la capacité de stockage, la configuration du rack et le nombre de véhicules.

Koeing. (1980) a recherché les configurations optimales d'A/RS sachant que certaines grandeurs de conception sont connues. **Bassan et al. (1980)** ont comparé deux configurations de racks en tenant compte des coûts de manutention ainsi que les coûts associés à la zone de stockage. Ils ont analysé les dimensions optimales magasin, en considérant le volume choisi du magasin en fonction des différentes stratégies de stockage. **Van Oudheusden et Zhu. (1992)** ont présenté une méthodologie pour concevoir la configuration d'un rack de stockage lorsque les commandes récurrentes de déstockage représentent un pourcentage élevé. **Malmborg (2001)** a présenté une nouvelle règle d'évaluation de la configuration des racks dans un AS/RS afin d'éviter l'utilisation de deux hypothèses nécessaires pour les règles précédentes : la proportion des cycles utilisés dans l'exploitation d'un système de préparation des commandes ainsi que les exigences de capacité de stockage totale sous une politique de stockage aléatoire.

Le coût des AS/RS a trouvé un certain intérêt, **Roberts et Reed. (1972)** ont développé une méthodologie pour déterminer la configuration d'un magasin qui minimise les coûts de manutention et de construction sous un stockage aléatoire. **Zollinger. (1975)** a développé un paquet de conception pour les AS/RSs basées sur un modèle de coût. Ce modèle a été utilisé par **Bozer et White (1980)** qui ont développé une méthode de conception basée sur des techniques

analytiques. **Karasawa et al. (1980)** ont développé un modèle de conception pour un AS/RS, Le problème est formulé sous forme d'un programme non linéaire en nombres entiers dans laquelle le coût du système est réduit au minimum. **Rosenblatt et Roll. (1984)** ont appliqué des techniques d'optimisation pour déterminer le coût total de conception d'un AS/RS avec deux variables de décision : la capacité d'AS/RS et la politique de stockage. Dans un autre travail, **Rosenblatt et al. (1993)** ont développé l'étude des AS/RSs selon deux axes : minimiser le coût et explorer le comportement dynamique du système. **Hwang et Ko. (1988)** ont étudié les AS/RSs multi-allée. Les résultats montrent que MASS permet effectivement de réduire les coûts d'installation initiaux, à condition que les demandes en palettes soient relativement basses.

Afin de faire face à une ou plusieurs questions de conception pour les AS/RSs, des méthodes de simulation ont été proposées dans la littérature.

Les modèles de simulation peuvent être développés pour tester, non seulement la configuration finale du système, mais aussi chaque phase de l'installation (**Raghunath et al. 1986**). **Perry et al. (1984)** ont développé une approche optimale pour améliorer l'efficacité des modèles de simulation qui peuvent être utilisés comme aide à la conception des AS/RSs.

Rosenblatt et al. (1993) ont essayé de surmonter l'inconvénient des modèles de simulation existant par l'utilisation alternative de la simulation et l'optimisation afin d'obtenir la meilleure conception possible. À partir de plusieurs expériences les auteurs ont conclu qu'une conception optimale nécessite moins de machine S/R que les allées. **West. (1993)** a élaboré un modèle de simulation pour aider à la sélection des systèmes de manutention lors de la conception de l'AS/RS. **Lee et al. (1996)** Ont utilisé un modèle de simulation sous le logiciel ARENA pour étudier un AS/RS à allées étroites. L'objectif de la simulation est d'analyser la logique opérationnelle du système, ce qui permet de déterminer le nombre optimal de machines de stockage/déstockage pour un rendement maximal. **Manzini et al. (2006)** ont présenté un modèle de simulation afin de mesurer l'impact des conceptions et le fonctionnement des configurations sur les performances du système attendu et d'identifier les facteurs les plus critiques qui influent sur la réponse du système. **Bafna et Reed (1972)** ont proposé un programme de simulation pour évaluer la conception alternative des systèmes automatisés de stockage de grande hauteur, où la configuration optimale est déterminée. **Randhawa et Shroff (1995)** ont utilisé SIMAN pour simuler l'effet des différentes règles d'ordonnancement sur six configurations dans un AS/RS à charge unitaire. Les résultats ont été comparés à l'aide de débit du système.

En général la force de la simulation pourrait être mieux exploitée, pour comparer de nombreux modèles, tout en prenant en compte plus l'aspect de conception, en particulier en le combinant avec les politiques de contrôle. (**Roodbergen et Vis 2009**).

Position de la station D/L

Peu de recherches ont été proposées pour déterminer les emplacements de la station D/L. Un AS/RS peut avoir plus d'une station D/L par allée, qui peut être située à l'avant, au milieu et/ou l'arrière d'une allée. (**Roodbergen et Vis. 2009**).

Bozer et al. (1984) ont développé le temps de cycle moyen pour quatre configurations alternatives de la station D/L suivantes :

- 1- La station D/L aux extrémités opposées de l'allée.
- 2- La station D/L à la même extrémité de l'allée, mais à des hauteurs différentes.
- 3- La station D/L à la même hauteur, mais à un point central dans l'allée.
- 4- La station D/L élevée à la fin de l'allée.

Randhawa et al. (1991) ont développé un modèle de simulation pour analyser et comparer l'effet du nombre de stations D/L sur les performances de l'AS/RS à charge unitaire (sur le temps d'attente moyen, le temps d'attente maximum et le début). Le papier de **Randhawa et Shroff (1995)** est une extension du travail proposé par **Randhawa et al. (1991)** à travers un modèle de simulation très étendu. Ils ont évalué et analysé six configurations différentes avec une seule station D/L en utilisant trois politiques différentes de contrôle, afin de déterminer leurs impacts sur les performances du système. **Ashayer et al. (2002)** présentent un modèle géométrique pour aider les concepteurs à évaluer les configurations des AS/RSs en tenant compte du temps de cycle et le débit. Ils ont évalué le système avec une seule station D/L, de capacité double ou multiple. **Vasil et al. (2008)** ont analysé le temps moyen en double cycle (DC) dans un système (SP-AS/RS) pour une nouvelle configuration de la station D/L qui se situe au centre du rack. Ils ont utilisé une simulation Monté Carlo pour valider les résultats obtenus. Les comparaisons montrent que cette nouvelle configuration est préférable à celles qui sont introduites par **Chen et al. (2003)** et **Hu et al. (2005)**.

Emplacement du point de repos de la machine S/R

La politique du point de repos est celle qui décide où le transstockeur restera quand il devient inactif (**Hu et al. 2005**). **Van den Berg. (1999)** a démontré que le point de repos est choisi de

telle sorte que le temps d'atteindre la position de la première transaction après une période de repos est réduit au minimum. La sélection de la politique des points de repos dans les AS/RSs a été largement discutée dans la littérature. **Graves et al. (1977)** a adopté la station D/L comme point de repos de la machine S/R. Dans leur travail, ils ont aussi introduit beaucoup de nouveaux sujets de recherche liés à la conception, la planification et le contrôle des AS/RS. **Bozer et al. (1984)** ont étudié quatre politiques statiques de positionnement du point de repos, mais ils n'ont fourni aucune comparaison quantitative de leurs performances. Ce qui peut être décrit comme suit :

- 1- Retour à la station D/L à l'issue d'un simple cycle de stockage, rester au niveau de la station D/L après l'achèvement d'un déstockage soit dans un simple ou double cycle.
- 2- Rester à l'emplacement de stockage à l'issue d'un simple cycle de stockage, rester au niveau de la station D/L après l'achèvement d'un déstockage soit dans un simple ou double cycle.
- 3- Se déplacer au centre du rack à l'issue de chaque cycle.
- 4- Retour à la station D/L après la fin de chaque cycle.

Park. (1991) a montré que la station D/L est considérée comme un point de repos optimal si la probabilité, que la première requête après une période d'inactivité est une demande de stockage, est au moins 1/2. **Egbelu. (1991)** a présenté une méthode de programmation linéaire pour étudier le problème du positionnement du point de repos de la machine S/R. Il développa des formulations pour minimiser le temps de cycle moyen et maximum, qui ont été utilisé par **Hwang et Lim. (1993)** pour un problème du positionnement unique en utilisant les distances de Tchebyshev pour la première règle et le minimax de Tchebyshev pour la seconde, afin de réduire le temps de calcul par deux ordres de grandeur. **Egbelu et Wu. (1993)** ont présenté une comparaison de six règles de point de repos sous des politiques de stockage dédiées et aléatoires au moyen de la simulation. Quatre de ces règles ont été développées par **Bozer et White (1984)**, les deux autres étant celles qui sont présentées par **Egbelu. (1991)**. Afin de déterminer les emplacements optimaux des points de repos pour la machine S/R, **Peters et al. (1996)** ont proposé des modèles analytiques au problème du positionnement du point de repos de la machine S/R, en utilisant une approximation continue du rack pour déterminer les emplacements optimaux d'un point de repos pour la machine S/R. **Chang et Egbelu (1997 a,b)** ont présenté des algorithmes pour déterminer le point de repos optimal de la machine S/R en vue de minimiser le temps de réponse du système. Au cours de la même année, les auteurs ont tenté de minimiser le temps de réponse du système au maximum pour les AS/RSs multi allées. **Park. (1999)** a développé une politique pour déterminer le point de repos optimal dans un rack carré en temps avec un stockage dédié. Après cela **Park. (2001)** a proposé

une stratégie basée sur la probabilité que la prochaine opération soit un stockage ou un déstockage, pour la détermination du point de repos optimal pour des racks à distribution non uniforme. **Van den Berg (2002)** a présenté une méthode analytique pour déterminer le point de repos optimal en vue de minimiser le temps moyen entre le point de repos et la position de la première opération après le repos. **Ventura et Lee. (2003)** ont proposé un algorithme polynomial exact, ils ont montré que le débit peut être minimisé dans un système de véhicule automatiquement guidé (AGV), par le placement des points de repos à certains endroits de la station D/L. **Ekren et al. (2010)** ont présenté un modèle de simulation pour analyser l'impact des politiques du point de repos sur le débit de l'AS/RS. **Roy et al. (2015)** ont développé un nouveau modèle de réseau de file d'attente personnalisé pour analyser l'effet de la politique de point de repos et l'emplacement de l'allée de transit sur les performances du système AVS/R.

Hale et al. (2008) ont développé un modèle avec une forme fermée pour les emplacements des points de repos dans les AS/RSs à carrousel tandis que, **Hale et al. (2009b)** ont présenté une méthodologie pour déterminer les emplacements optimaux du point de repos pour un pont roulant afin de minimiser le temps de réponse attendue. **Hale et al. (2009a)** ont présenté une méthodologie générale pour trouver l'emplacement du point de repos pour n serveur dans l'AS/RS avec un seule allée. Par contre, **Hale et al. (2015)** ont présenté une méthodologie pour déterminer l'emplacement du point de repos optimal pour un serveur dans un AS/RS multi allées.

Vasili et al. (2006) ont étendu l'étude de **Hu et al. (2005)** et ont développé deux modèles de temps de cycle fiables pour les SPAS/RS sous deux politiques de point de repos : (1) retour au milieu et (2) retour à la station D/L. les auteurs comparent ces deux modèles avec le modèle de temps de cycle sous une politique de point de repos d'arrêt. Les résultats montrent que la politique de point de repos d'arrêt surpasse les autres politiques.

Meller et Mungwattana (2005) ont utilisé la simulation pour évaluer les avantages des diverses politiques du point de repos en relation avec l'utilisation du système. Les résultats montrent que la politique du point de repos a une incidence négligeable sur les temps de réponse du système (entre 2 et 5 %) lorsque l'AS/RS a une forte utilisation. Selon **(Roodbergen et Vis 2009)**, des règles de base, expressions analytiques exactes, des approches mathématiques de programmation et méthode de simulation ont été formulées, pour déterminer la position optimale du point de repos de la machine S/R.

Seulement quelques articles portent sur la conception d'AS/RS en combinaison avec d'autres systèmes de manutention. La plupart de ces documents examinent les environnements de production. (**Roodbergen et Vis 2009**).

Toutes les conceptions des AS / RS sont difficiles parce que ces systèmes évoluent dans des environnements hautement dynamiques. Pour cela, une bonne procédure de conception devrait être en combinaison avec les politiques de contrôle. (**Fohn et al. 1994**); (**Terry et al. 1988**).

1.6.2 Politiques de stockage

La politique du stockage dans les AS/RSs a suscité un certain intérêt des chercheurs. **Hausman et al. (1976)** ont été parmi les premiers à considérer le problème du stockage basé sur des classes dans un AS/RS à charge unitaire avec un simple cycle à l'aide de la courbe ABC. Ils ont proposé une comparaison analytique entre les trois politiques de stockage (aléatoire, par classe, full turnover), pour plusieurs distributions de la demande du produit. Après cela, **Schwarz et al. (1978)** ont utilisé un modèle de simulation pour valider les résultats d'analyse de (**Hausman et al. 1976**). En outre, **Graves et al. (1977)** ont montré par la simulation que les différentes zones en forme de " L " pour le stockage par classes ne sont pas nécessairement optimales pour un rack carré. **Guenov et Raeside (1992)** ont comparé trois configurations pour la forme des zones dans un AS/RS à charge unitaire. Ils ont conclu que la configuration des zones pour le stockage par classe dépend de la position du point de dépôt/livraison d'un AS/RS.

Ashayeri et al. (2002) ont utilisé une approche géométrique pour calculer le temps de cycle pour un stockage aléatoire. **Jarvis (1991)**, **Tang (1997)**, **Chew et al. (1999)** ont estimé le temps de cycle moyen dans un entrepôt utilisant un stockage par classes. **Van den Berg. (1996)** a proposé un algorithme d'un programme dynamique qui assigne à chaque référence de produits sa classe. **Caron et al. (1998)** ; **Caron. (2000)** proposent un modèle de temps de cycle pour un entrepôt à 2-blocks avec un stockage COI-par classes (cube-order-index, COI).

Plusieurs auteurs ont abordé le problème du nombre optimal de classes à utiliser dans le contexte de stockage pour les AS/RS. **Rosenblatt et Eynan. (1989)** et **Eynan et Rosenblatt. (1994)** ont cherché à déterminer le nombre optimal de classes pour un AS/RS en utilisant la méthode de **Hausman et al. (1976)**. Ils ont conclu qu'il est préférable d'utiliser des AS/RSs à charge unitaire avec un facteur de forme de $b \geq 0,6$ avec moins de sept classes. **Ashayeri et al. (2002)** ont élaboré une approche heuristique pour déterminer le nombre de classes et l'emplacement des zones de stockage dans un AS/RS. L'algorithme détermine la taille et le nombre de zones, et leur disposition

sur l'AS/RS. **Ha et Hwang. (1994)** ont montré que la politique de stockage par classe a deux classes réduit considérablement le temps stockage et déstockage des deux commandes simple et double par rapport à un stockage aléatoire pour un AS/RS à carrousel. **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. Ils ont suggéré d'utiliser leur procédure avec la procédure proposée par **Rosenblatt et Enyan. (1989)** pour obtenir de bons résultats pour une politique générale de stockage à N-classe.

Muppani et Adil. (2008a) ont mis au point un algorithme pour résoudre un modèle de programmation en nombres entiers pour la formation de la classe et la politique de stockage en tenant compte de toutes les combinaisons de produits possibles, le coût de l'espace de stockage et le coût de préparation de commande. Par la suite, **Muppani et Adil. (2008b)** ont également proposé un modèle non linéaire de programmation en nombres entiers et un algorithme du type Branch-and-Bound pour la formation de classes de stockage, et démontré qu'il existe d'importantes économies en utilisant la stratégie de stockage basé sur des classes. **Kováks et al. (2011)** proposent un modèle de programme entier mixte pour trouver une stratégie de stockage par classes qui minimise le temps de cycle, l'effort moyen de prélèvement, ou une combinaison linéaire de ces deux critères dans un entrepôt caractérisé par la multi-commande de prélèvement. **Glock et Grosse. (2012)** proposent différents politiques de stockage pour une commande de prélèvement, où le rack est divisé en zones avec étagères disposés en forme de U dans chaque zone. **Kuo et al. (2016)** ont développé une métaheuristique PSO et un algorithme génétique GA pour l'affectation des produits à leur zone de stockage, puis les comparer avec les algorithmes existants.

Gaouar et al. (2005), Gaouar et al. (2006) ont élaboré une heuristique de stockage/déstockage pour réduire le temps de déstockage dans un AS/RS à convoyeur gravitationnel. L'heuristique a été développée afin de stocker des produits de la même référence dans le même emplacement plus près de la station D/L. Cette heuristique à entraîner une grande amélioration dans la durée de déstockage prévu. Dans le même type de système, **Cardin et al. (2012)** ont développé une nouvelle méthode de stockage/déstockage, appelée In-Deep Storage class. L'idée est de stocker les produits les plus demandés dans les premières couches de chaque emplacement, afin de réduire le temps moyen de déstockage. Deux algorithmes ont été développés pour prouver la faisabilité de la mise en œuvre de cette méthode. Cette étude a démontré une réduction de plus de 60% du temps moyen de déstockage par rapport à un stockage aléatoire.

Ouhoud et al. (2015) ont présenté deux approches (discrète et continue) pour la modélisation du temps de simple cycle d'un AS/RS multi-allées, en tenant compte des deux méthodes de stockage : le stockage aléatoire et le stockage par classe. Les auteurs ont développé des modèles de simulation pour valider le temps de cycle. Les résultats obtenus indiquent que le stockage par classe est plus efficace que le stockage aléatoire, (une différence du temps entre les deux politiques est auteure du 35%).

En résumé, dans la littérature divers politiques de stockage ont été élaborées et ont été comparées à la fois par la simulation et des méthodes d'analyse, et ont été résumés par **(Roodbergen et vis 2009)**. Le stockage par classe est le plus populaire dans les AS/RSs, car il requiert moins d'espace de stockage et permet une réduction considérable en temps de déstockage que l'utilisation de stockage dédié ou de stockage aléatoire, et, en outre, minimiser le temps de stockage/déstockage. **(Eldemir et al. 2004)**.

1.6.3 Ordonnancement des demandes de stockage/déstockage

Le séquençage des demandes de stockage/déstockage dans un AS / RS a suscité beaucoup d'attention dans la littérature. Dans le papier de **White. (1990)**, et **Roodbergen. (2009)** ils ont présenté un état de l'art des travaux précédents sur l'ordonnancement dans les AS/RSs. **Han et al. (1987)** ont étudié les méthodes de séquençage pour un AS/RS à charge unitaire. Ils ont montré que le débit peut être amélioré par l'utilisation de la politique « plus proche voisin » au lieu du « premier arrivé-premier servi » (FCFS). **Eben-Chaïme. (1992)** a utilisé la règle d'affectation du voisin le plus proche pour répondre au problème du séquençement par blocs qui a un effet négatif sur le temps d'attente et la longueur des files d'attente dans un environnement non déterministe. **Eynan et Rosenblatt. (1993)** ont conclu que des réductions très importantes en temps inter-emplacements peuvent être obtenues en combinant la règle plus proche voisin avec la politique de stockage par classe. **Mahajan et al. (1998)** ont se sont basé sur l'heuristique du plus proche voisin, pour augmenter le rendement d'un AS/RS à mini charge. Ils ont évalué les performances de cette règle par la simulation.

Elsayed et al. (1993) ont exposé le problème de séquençement et de mise en lot pour minimiser les pénalités de retard lorsque les ordres de déstockage doivent être satisfaits à dates précises. Dans **Lee et al. (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 réduire le temps total de transport de la machine S/R. Cet algorithme permet d'obtenir des solutions optimales ou quasi -optimales.

Dans **Van den Berg et al. (1999)**, pour réduire le temps de réponse du système, les auteurs se sont intéressés à l'ordonnancement des opérations de stockage/déstockage en utilisant l'approche d'ordonnancement par bloc avec un stockage dédié. L'objectif était de trouver un chemin avec un temps total de transport minimum. Le problème d'ordonnancement d'une liste de demande de déstockage, est équivalent à celui 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.

Hackman et al. (1990) ont développé une heuristique permettant de déterminer les types et quantités de produits à stocker dans un AS/RS lorsque la capacité de celui-ci est inférieure à la quantité de produits à stocker. **Lee et al. (1995)** ont proposé quatre heuristiques basées sur deux étapes, la constitution des doubles cycles puis leur ordonnancement optimisé, afin de minimiser les pénalités d'avance ou de retard dans un AS/RS à charge unitaire sous un environnement juste à temps. Une solution optimale du problème fut proposée en utilisant la programmation en nombres entiers.

Chetty et Reddy. (2003) ont été parmi les premiers à appliquer les algorithmes génétiques (GA) au séquençage des AS/RSs. Les auteurs ont comparé les résultats de (GA) avec les trois heuristiques de séquençage (FCFS, aléatoire, plus proche voisin). **Chung et Lee. (2008)** ont utilisé un algorithme génétique pour le séquençage d'un AS/RS avec une seule navette en mode double cycle et une stratégie de stockage aléatoire. Le problème consistait en un ensemble d'emplacements vides et un ensemble de produits doit être déstocké. L'algorithme proposé permettant de déterminer le séquençage et l'emplacement des tâches simultanément. **Jawahar et al. (1998)** ont proposé des heuristiques et des algorithmes génétiques pour l'amélioration des performances d'un AS/RS, et l'ordonnancement de la production du FMS desservi par celui-ci.

Certaines recherches ont été intéressées par l'ordonnancement des demandes de stockage/déstockage pour les autres types d'AS/RSs. **Van Oudheusden et al. (1988)**, **Goetschalckx et Ratliff. (1988)** proposent une heuristique pour le problème de séquençage d'un AS/RS à personne on bord. **Abdel-Malek et Tang. (1994)** étudient le problème de séquençage pour un AS/RS carrousel.

Dans **Chen et al. (2015)**, les auteurs ont étudié un problème d'ordonnancement des demandes de stockage/déstockage dans un flow-rack AS/RS. Ils ont développé une heuristique appelée la méthode regroupement-(matching) filtrage permettant de réduire le temps total de transport de la machine S/R. Cette méthode a été évaluée par un modèle de simulation. **Yu et De Koster. (2011)**

ont élaboré une heuristique pour optimiser les performances d'ordonnancement des demandes de déstockage dans un rack profond. Ils ont montré que les performances du système peuvent être améliorées par l'utilisation de cette heuristique au lieu du premier arrivé-premier servi (FCFS).

Gagliardi et al. (2015) ont présenté deux approches de séquençage d'un AS/RS multi-allées, et évalué leurs performances lorsque toutes les allées sont gérées indépendamment et ensuite d'une manière globale. **Homayouni et al. (2014)** ont développé un algorithme génétique pour résoudre le problème d'ordonnancement intégré des véhicules guidés automatiquement et SP-AS/RS.

L'ordonnancement des opérations de stockage/déstockage dans un AS/RS à multi navettes deviennent plus complexes. **Sarker et al. (1991)** et **Kaserla et Peters. (1994)** ont présenté des heuristiques d'ordonnancement pour le déstockage dans un AS/RS à double navette, afin de minimiser le temps de cycle quadruple. **Sarker et al. (1994)** ont présenté une technique d'ordonnancement pour l'AS/RS à double navette, fonctionnant en stockage par deux classes. Le modèle considéré présente une grande réduction dans les temps de transport par rapport au modèle du plus proche voisin. **Meller et al. (1997)** ont étudié un problème d'ordonnancement dans un AS/RS à multi-navettes. Ils ont développé un modèle analytique avec les trois règles suivantes : (FCFS, plus proche voisin et plus proche voisin inversé). **Popović et al. (2012)** ont utilisé un algorithme génétique pour l'ordonnancement d'un AS/RS avec de triples navettes et une stratégie de stockage par classe. Les auteurs ont comparé les résultats de (GA) avec les trois heuristiques de séquençage (FCFS, aléatoire, plus proche voisin inversé).

Yang et al. (2013) proposent un modèle d'optimisation basé sur un algorithme de recherche tabou et une heuristique, pour optimiser les stratégies de stockage et le problème d'ordonnancement dans un AS/RS à multi-navettes. L'objectif du modèle est de résoudre le problème d'effectuer une seule opération ou plusieurs cycles. Dans **Yang et al. (2015)** les auteurs ont reproché aux travaux précédents, le fait qu'ils utilisent le modèle d'optimisation sous un stockage partagé (emplacement utilisé actuellement pour le déstockage sera immédiatement utilisé pour stocker l'élément suivant), c'est parce que stockage partagé est plus efficace et adapté au fonctionnement réaliste.

Les réseaux de Pétri ont trouvé certains intérêts pour l'ordonnancement des AS/RS. **Amato et al. (2005)** ont utilisé les réseaux de petri colorés pour modéliser deux algorithmes de commande d'un AS/RS. Ils ont introduit un système d'optimisation en temps réel, afin de simplifier le niveau de contrôle et améliorer le débit du système. **Dotoli et al. (2005)** proposent un modèle à l'aide des réseaux de Petri colorés temporisés pour tester plusieurs politiques de contrôle et de gestion d'un AS/RS à charge unitaire multi-allées, servi par des véhicules guidés par rails.

Dans l'article de **Hachemi et al. (2008)**, les auteurs ont proposé une structure de pilotage d'un système automatisé de stockage/déstockage (AS/RS) à convoyeur gravitationnel basé sur un modèle réseau de Petri Coloré (RdPC). L'objectif de la méthode d'optimisation proposée est de trouver les meilleurs emplacements à déstocker dans le rack pour un lot de demande de clients et ceci en minimisant le nombre de cycles de déstockage et par conséquent d'améliorer le débit de sortie du système.

Une nouvelle méthode de contrôle des AS/RSs à l'aide du réseau son fil (wifi) et le microcontrôleur (PIC) a été présenté par **(Rashid et al. 2011)**. Dans leur papier, ils ont utilisé le PIC pour contrôler le mouvement et la rotation du moteur. La communication entre le contrôleur PIC et l'ordinateur fait par la technique sans fil. D'autres méthodes de contrôle basées sur les réseaux de neurones ont été présenté par **(Wang et al. 1997)**. Afin de supporter des variations dans la configuration de l'AS/RS ainsi que différentes exigences dans les performances, les réseaux de neurones artificiels sont utilisés pour l'apprentissage du contrôle.

Selon **(Roodbergen et al. 2009)** différentes méthodes sont décrites dans la littérature pour planifier les demandes de stockage/déstockage, de telle sorte que la distance totale parcourue par la machine S/R soit minimisée. La forme du problème du séquençage change de façon significative avec la configuration du système et les stratégies de stockage. La majorité des recherches portent sur les AS/RS à charge unitaire avec une allée et une station D/L (problème d'ordonnancement basique).

1.6.4 Temps de cycle

Dans un AS/RS (Automated Storage/Retrieval System), le temps de cycle de la machine de stockage/déstockage est un des paramètres les plus importants du système, qui représente le temps nécessaire pour une opération de stockage (le temps de déplacement de la machine S/R de son point de repos à l'emplacement désiré) ou de déstockage (le temps de retour à la station de dépôt/livraison). Il comprend les deux temps : le temps de déplacement de la machine S/R et le temps nécessaire pour récupérer/déposer un produit dans une cellule. Ce dernier est généralement indépendant de la forme des racks et de la vitesse de la machine S/R. **(Hausman et al. (1976); Bozer et al. (1984); Hu et al. (2005); Sari et al. (2005))**

Depuis 1976 la modélisation du temps de cycle pour la machine S/R représente l'objectif de plusieurs travaux de recherche. D'abord nous discutons des modèles de temps de transport pour les AS/RSs à charge unitaire (unit-load), ensuite nous en discutons pour d'autres types d'AS/RSs.

Pour les AS/RSs à charge unitaire (unit load), **Hausman et al. (1976)** sont parmi les premiers à avoir modélisé le temps de simple cycle par des expressions analytiques continues pour différentes stratégies de stockage. Ces travaux ont été étendus par **Graves et al. (1977)** en introduisant le temps de double cycle pour le même type de système et avec les mêmes hypothèses.

Bozer et al. (1984) ont utilisé une approximation continue du rack de stockage pour développer une expression mathématique permettant de calculer le temps de simple et double cycle, les AS/RS considérés sont à charge unitaire, le rack est rectangulaire et la stratégie de stockage est aléatoire. Par ailleurs, ils ont étudié plusieurs positions du point d'entrée/sortie. **Han et al. (1987)** ont développé une expression mathématique estimant le temps du double cycle, sous la règle « plus proche voisin » (nearest-neighbor). Sous cette règle, les requêtes de stockage et les requêtes de déstockage les plus proches sont appariées pour minimiser le temps de double cycle.

Presque tous les papiers mentionnés ont jusqu'ici supposé que les caractéristiques opérationnelles d'un AS/RS pourraient être ignorées. **Hwang et Lee. (1990)** ont présenté des modèles qui ont intégré les caractéristiques de fonctionnement de la machine S / R, utilisant une stratégie d'attribution aléatoire, les temps de déplacement sont déterminés à la fois pour le SC et DC. Ils ont défini le taux d'accélération/décélération et les vitesses maximales dans les directions horizontales et verticales comme trois éléments importants dans le modèle de temps de cycle. **Chang et al. (1995)** continuent le travail de **Bozer et White. (1984)** par l'inclusion de l'accélération et la décélération au lieu d'assumer des vitesses constantes. **Chang et Wen. (1997)** ont étudié l'impact de la configuration du rack sur le temps de transport de la machine S/R. **Wen et al. (2001)** ont prolongé le travail de **Chang et al. (1995)** en considérant les stratégies de stockages par classe et full-turnover.

D'autres chercheurs continuent le travail de **Hausman et al. (1976)** ; **Graves et al. (1977)** ; **Bozer et White. (1984)** en étudiant les différentes politiques de contrôle, configuration et les caractéristiques opérationnelles d'AS/RSs. **Rosenblatt et Eynan. (1989)**; **Eynan et Rosenblatt. (1994)** et **Kim et Seidmann. (1990)**; **Kouvelis et Papanicolaou. (1995)** étudient le stockage par classe et le stockage full turnover.

Un AS/RS multi allées est une variation de l'AS/RS à charge unitaire. Il est composé d'une seule machine S/R pouvant servir plusieurs allées à la fois. La modélisation du temps de cycle pour ce type d'AS/RS est basée sur le modèle de **Bozer et al. (1984)**. Des études des AS/RS multi allées desservies par une seule machine S/R ont été présentées par **Hwang et Ko. (1988)** ils ont considéré chaque rack comme une face continue et pour chaque rack, ils ont développé une

expression analytique du temps de cycle dont la vitesse de la machine S/R est supposée constante. Ils examinent aussi le problème du stockage par classes pour minimiser le nombre des machines S/R. **Potrc et al. (2004)** ont proposé un modèle avec heuristique pour le temps de cycle dans le cas d'un stockage aléatoire pour les AS/RS à charge unitaire et pour les AS/RS multi allées. **Lerher et al. (2005)** ont développé un modèle analytique du temps de cycle d'un AS/RS multi-allées à condition que les opérations de stockage/déstockage puissent se produire uniquement dans le même couloir de prélèvement. Dans ce modèle, les auteurs ont pris en considération l'accélération et la décélération de la machine S/R. Ces travaux ont été étendus par **Lerher et al (2010)**, en modélisent le temps de transport pour le (SC) et le (DC), dans l'hypothèse que les processus de stockage/déstockage peuvent se produire dans deux allées aléatoirement choisies. Aussi ils ont effectué une comparaison entre les résultats du modèle théorique avec celles obtenues par la simulation. **Ghomri et al. (2008)** ont développé un modèle analytique continue permettant un calcul approximatif du temps de simple cycle d'un AS/RS multi allées. Une expression analytique discrète de temps de simple cycle est utilisée pour valider l'expression continue. Dans ce travail les auteurs ont discuté une méthode pour le calcul du temps de double cycle. **Kouloughli et al. (2009), (2010)** ont utilisé les résultats de ce travail pour trouver les dimensions optimales du même système pour un temps de simple et double cycle minimal. Dans **Kouloughli et al. (2011)**, les auteurs ont supposé que l'une des trois dimensions du système multi-allées était fixe. Ils ont donc déterminé les deux dimensions optimales restantes. **Kouloughli et al. (2015)**, ont étendu ces travaux précédents en considérant les trois dimensions du système comme variables.

Ouhoud et al. (2015) ont validé les expressions analytiques du temps de simple cycle de la machine S/R pour les AS/RSs multi allées avec une stratégie de stockage par classe à travers la simulation. En 2008, **Sari. (2008)** a établi les expressions analytiques discrètes pour les AS/RS multi allées et pour les AS/RS à racks glissants. Par la suite, **Guezzen et al (2011a, 2011b)** ont effectué deux travaux différents sur les AS/RS à racks glissants. Ils ont développé deux modèles analytiques continus permettant un calcul du temps moyen de simple cycle. Dans le premier modèle les auteurs considèrent le cas où le temps de glissement des racks est inférieur au temps de déplacement le long de l'allée principale. Dans le deuxième modèle, ils ont considéré le cas où le temps de glissement des racks est supérieur au temps de déplacement le long de l'allée principale. Les auteurs ont ensuite validé les résultats par une comparaison avec les résultats des modèles discrets développés par **Sari. (2008)**. En 2014, **Guezzen et al. (2014)** ont développé plusieurs modèles analytiques continus et ont présenté l'ensemble des cas possibles dans la modélisation d'un AS/RS à racks glissants.

Les AS/RS multi navettes ont été développées pour augmenter le débit de la sortie du système, plusieurs chercheurs ont étudié ce type d'AS/RS. **Sarker et al. (1991)** ont étudié les performances de l'AS/RS à double navette. Par l'utilisation des formules de **Bozer. (1984)**, ils ont introduit une heuristique d'ordonnancement pour le déstockage. Le même type d'AS/Rs fut analysé par **Keserla et Peters. (1994)** qui ont étudié et comparé les performances d'un AS/RS avec seule et double navette. Ils ont développé une heuristique d'ordonnancement afin de minimiser le temps du cycle quadruple. **Meller et Mungwattana. (1997)** ont estimé le temps de cycle pour le double et triple navette avec différents politiques de stockage/déstockage. **De Puy. (2007)** a étendu ce travail et a proposé un modèle du temps de cycle en tenant compte de l'accélération/décélération de la machine S/R. **Azzi et Battini. (2011)** ont modélisé le temps de transport d'un AS/RS à double navette. En se basant sur l'extension du modèle développé par **F.E.M. (2001)**, (Prend en considérations 'accélération et d'accélération de la machine S/D), ils ont conclu que le nouveau modèle est plus précis que les autres modèles qui se basant sur les formules de **Bozer. (1984)**, avec une erreur <1%, garce à la considération de l'accélération /d'accélération dans le calcul. **Eben-Chaime. (1997)** ont étudié un AS/RS multi-machines S/R dans sa globalité, contrairement aux travaux précédents qui ne considèrent qu'une seule machine S/R à la fois. Il y a eu des documents analysant les performances des AS/RS à mini charge (mini-load). **Foley et Frazelle (1991)** considèrent un AS/RS à mini charge carré en temps fonctionnant sous une politique d'ordonnancement du premier arrivé, premier servi FCFS (First Come First Served), et le stockage aléatoire, pour la modélisation du temps de cycle. Aussi **(Park et al, 2003, 2006)** ont estimé le temps de cycle pour un AS/RS avec un et deux classes de stockage.

Les AS/RSs à carrousel sont une bonne alternative aux systèmes à mini charge. **Sarker et Babu. (1995); Han et McGinnis. (1987)** ont estimé le temps de simple et double cycle d'un AS/RS à carrousel, en utilisant la règle du plus proche voisin pour le séquençage des opérations de déstockage. **Han et al. (1988)** ont modélisé le temps de cycle d'un AS/RS à carrousel, où les multiples niveaux du rack de stockage peuvent tourner indépendamment l'un de l'autre. **Hwang et Ha. (1991)** ont développé un modèle de temps de cycle pour un AS/RS à double carrousel, dans lequel les deux carrousels tournants indépendamment l'un sur l'autre. **Park. (2008)** a déterminé le temps de cycle d'un système de carrousel qui exécute des opérations séquentielles de déstockage, arrivant selon une distribution de Poisson. Aussi il a déterminé le temps d'attente de déstockage, dans le cas d'un système de carrousel est relié avec la station de livraison via un convoyeur. Récemment **Pazour et Meller. (2013)** ont analysé les performances du début de sortie d'un AS/RS à carrousel horizontal desservi par machine S/R, utilisant stratégie de traitement par lots.

Les AS/RS à personne embarquée généralement traitent plusieurs emplacements dans une tour. Les auteurs **Elsayed et Unal. (1989)**; **Guenov et Raeside. (1992)**; **Chiang et al. (1994)** ont dérivé les expressions analytiques pour les temps de déplacements en fonction du nombre d'emplacements à visiter.

Sari et al. (2005) ont développé deux modèles du temps de cycle pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel à deux machines S/R, un modèle exact et un autre approché du temps de stockage et du temps de déstockage. Le modèle approché est basé sur le calcul de **Bozer et al. (1984)** utilisant une approche continue, où le rack est supposé continu. Le modèle exact est basé sur une approche discrète pour faire une comparaison avec l'approche continue via la simulation. Dans ces deux modèles, les auteurs ont pris en considération le temps des dispositifs de remplissage (t_c) pour plus de précisions dans le calcul du temps de cycle. Après cela, **Sari et al. (2007)** ont étudié l'impact des points de repos de la machine S/R et le convoyeur de récupération sur le temps de cycle pour un AS/RS à convoyeur gravitationnel. Ils ont classifié les positions optimales qui minimisent le temps de cycle. **Gaouar. (2004)** a développé une heuristique de stockage/déstockage qui consiste à stocker les produits de mêmes références dans un même casier au plus près de la station de livraison pour l'AS/RS à convoyeur gravitationnel, en vue de réduire son temps de cycle. **Bensenouci et al. (2010)** ont étendu ce travail et ont développé deux métaheuristiques (la recherche taboue et le recuit simulé), afin de minimiser le temps de cycle de déstockage. **Sari. (2010)** a effectué une étude comparative entre le flow rack et l'AS/RS à charge unitaire. Il a considéré deux paramètres de comparaison : l'espace d'utilisation et le temps de cycle. **Sari et al. (2012)** ont modélisé le temps de cycle d'un nouveau type de flow rack AS/RS à convoyeur gravitationnel, contrairement au flow rack classique, qui utilise une seule machine pour des opérations de stockage et déstockage. Ceci pourrait être possible en changeant la forme de l'emplacement d'une forme parallélépipède, à une forme en U qui permet d'avoir seulement une face pour les opérations de S/D. Ce travail a été étendu par **Hamzaoui et al. (2015)** qui ont trouvé les dimensions optimales de l'AS/RS minimisant le temps moyen de transport de la machine S/D. les auteurs ont effectué une simulation à l'aide d'un programme JAVA par le développement d'un nouveau modèle mathématique général du temps de cycle.

Il y a beaucoup de nouveaux modèles d'AS / RS, parmi lesquels les systèmes à véhicules autonomes de stockage/déstockage (AVR/S) et (split-platform AS/RS) (SP-AS/RS). Les AVS/RS sont une variation des AS/RSs classiques, qui utilisent des véhicules autonomes pour le stockage et le déstockage. L'étude des AVS/RS dans la littérature est plus récente.

La première étude sur les performances d'un AVS/RS a été proposée par **Malmborg. (2002)**, qui a modélisé le temps de cycle d'un AVS/RS en fonction du nombre des allées, niveaux, véhicules et des ascenseurs. En considérant une politique de stockage aléatoire, et une configuration (tier to tier). **Marchet et al. (2012)** ont reproché aux travaux cités précédemment le fait qu'ils considèrent le temps d'attente de l'ascenseur dans le calcul du temps de cycle, et ont effectué une simulation pour vérifier l'exactitude des résultats obtenus. **Manzini et al. (2016)** ont présenté une expression mathématique calculant le temps de simple et double cycle d'un AVS/RSs à voie profonde avec une configuration alternative. Les auteurs ont ensuite validé ces résultats via la simulation et donné un exemple avec une étude de cas réel d'entrepôt. **Hu et al. (2005)** ont modélisé le temps de transport pour le simple cycle (SC) d'un nouveau type d'AS/RS, (split-platform SP-AS/RS) ou AS/RS à plateforme partagée. Celui-ci est basé sur des mouvements horizontaux et verticaux séparés de la machine S/R pour gérer des charges lourdes. Ils ont ensuite analysé la sensibilité du facteur de forme b et α (probabilité que la dernière opération est une opération de stockage) sur le temps de cycle. Ces travaux ont été étendus par **Tian Liu et al. (2015)** en introduisant le temps de double cycle pour le même type de système et avec les mêmes hypothèses, sous une politique de point de repos et station D/L. et ils ont validé son exactitude par la simulation.

La plupart des recherches concernant la modélisation du temps de transport de la machine S/D, est basée sur le calcul de **Bozer et al. (1984)**. Nous remarquons que l'AS/RS à charge unitaire est le plus étudié.

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les systèmes automatisés de stockage/déstockage ainsi que leurs différents types. Ce chapitre a pour objectif de montrer les avantages apportés par les AS/RS tel que la meilleure gestion du stock et la réduction des temps de localisation et livraison des produits.

Nous avons présenté un état de l'art détaillé, afin d'exposer les différentes études traitées et les axes de recherche sur les systèmes automatisés de stockage/déstockage. Nous avons remarqué qu'il n'a été accordé aucune attention au flow rack AS/RS à chute libre. De ce fait, la motivation de notre travail de recherche est d'évaluer les performances de ce type d'AS/RS, pour cela, nous consacrerons le prochain chapitre à une présentation générale sur le flow rack AS/RS à chute libre.

Chapitre 2. Flow-rack AS/RS à chute libre

2.1 Introduction

2.2 Flow-rack AS/RS à chute libre

2.2.1 Présentation

2.2.2 Composants

2.2.3 Fonctionnement

2.2.4 Avantages et inconvénients

2.2.5 Modélisation discrète du temps moyen de déstockage

2.3 Etude comparative entre le flow-rack classique et le flow-rack à chute libre

2.4 Evaluation des temps de dispensation manuel et automatique des médicaments

2.5 Conclusion

2.1 Introduction

Dans les années récentes, l'automatisation de la dispensation des médicaments est devenue un défi pour répondre aux besoins croissants des pharmacies. C'est alors que plusieurs solutions technologiques sont apparues, parmi elles le système automatisé « APOTEKA », lequel est une variation des systèmes automatisés de stockage et déstockage. Nous avons nommé ce système le Flow-rack AS/RS à chute libre ou bien FF-flow-rack AS/RS, ceci est relatif au mouvement de chute libre des produits qui le caractérise.

Dans le présent chapitre nous présentons le FF-flow-rack AS/RS (Composition, fonctionnement, avantages et inconvénients), ainsi nous développerons son temps moyen de déstockage par un modèle discret. Afin de montrer les avantages du FF-flow-rack AS/RS nous allons effectuer deux études comparatives entre ce système et :

- Le flow-rack classique.
- La dispensation manuelle des médicaments.

2.2 Flow-rack AS/RS à chute libre

2.2.1 Présentation

Ce nouveau type de système introduit par MEKAPHARM, **MEKAPHARM. (2016)**, est utilisé pour l'automatisation de la distribution des médicaments dans les pharmacies, il est connu par le nom commercial « APOTEKA ». (Figure 2.1). Ce système automatique a été mis en place afin de permettre aux pharmacies de gagner du temps dans la préparation des ordonnances et de venir chercher les commandes par la suite. Aussi il présente également l'avantage de donner aux pharmaciens plus de temps à consacrer aux conseils pour l'usage et la prise des médicaments prescrits.



Figure 2.1. Photo réelle d'un flow-rack AS/RS à chute libre « APOTEKA ».

2.2.2 Composition

La solution APOTEKA consiste en un flow-rack AS/RS à chute libre, composé d'un rack profond regroupant plusieurs casiers inclinés de façon à permettre le glissement des produits (médicaments) d'un bout à l'autre du casier. Chaque casier regroupant un ensemble d'emplacements pouvant contenir plusieurs produits identiques placés les uns à la suite des autres (Les mêmes SKU: Stock Keeping Unit). Une station de dépôt située sur la face de stockage, et une station de livraison située sur la face de déstockage. La Figure 2.2 présente la constitution détaillée d'un flow-rack AS/RS à chute libre.

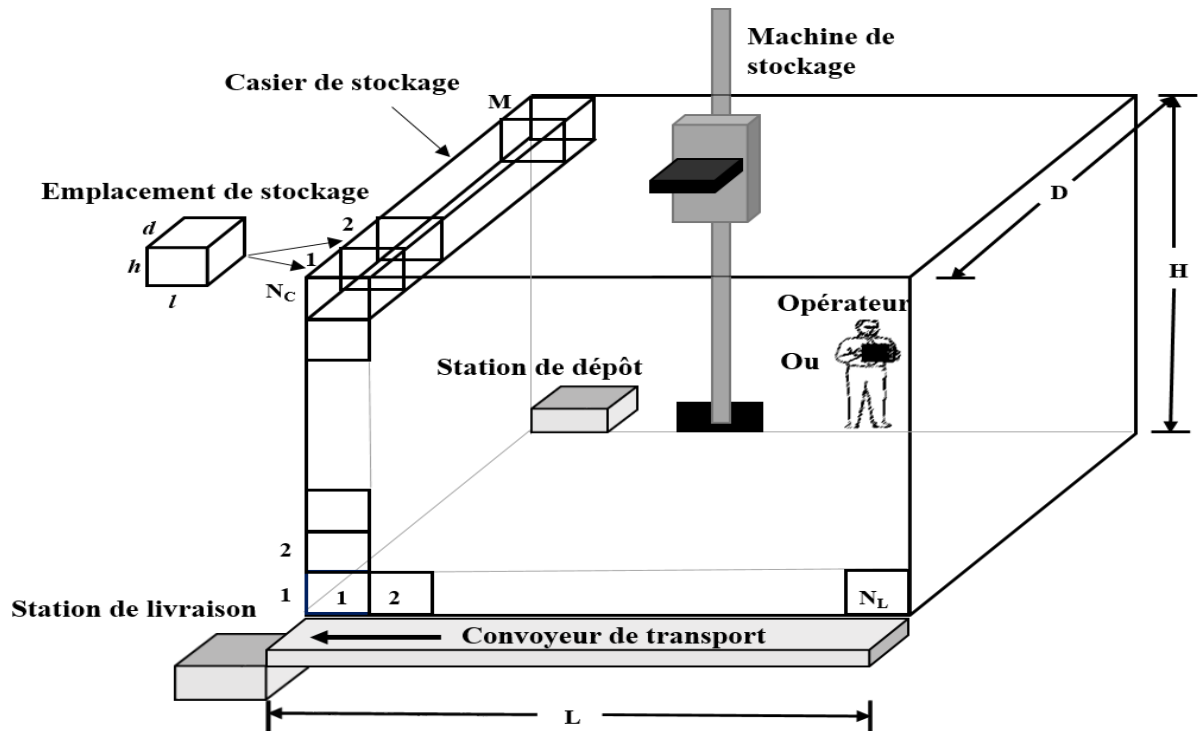


Figure 2.2. Constitution typique d'un flow-rack AS/RS à chute libre

2.2.3 Fonctionnement

Pour le chargement (stockage) d'un produit, l'opérateur prend le produit de la station de dépôt pour le stocker dans le casier adéquat, cette opération peut se faire également par une machine de stockage. Concernant le déstockage, l'éjection se fait par l'excitation de l'électro-aimant du casier contenant le produit demandé. Ceci provoque la descente en chute libre du produit. Ensuite le convoyeur peut transporter le produit vers la station de livraison. La sortie d'un produit va induire le glissement progressif par gravité de tous les autres produits dans le casier. L'électro-aimant revient à sa position initiale à chaque éjection. Il est à noter, que la détection d'éjection du produit peut se faire à l'aide d'un capteur de sortie, comme indique la (Figure 2.3).

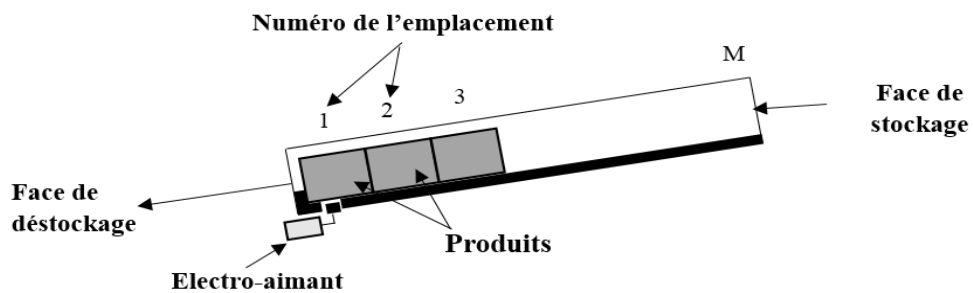


Figure 2.3. Fonctionnement du système d'éjection des produits dans un flow-rack AS/RS à chute libre.

2.2.4 Avantages et inconvénients

En plus des divers avantages offerts par les AS/RS tels que : l'amélioration du débit de sortie, la capacité, la gestion et le contrôle des stocks et la sécurité. Le FF-flow-rack AS/RS a des avantages spéciaux tels que :

- la possibilité de déstockage simultané de plusieurs produits.
- Réduction du temps d'attente des clients.
- Réduction de la taille des files d'attente en officine, ce qui laisse plus de temps pour les pharmaciens de conseiller leurs clients.
- Réduction des erreurs de distribution.
- Élimination des mouvements d'aller-retour des pharmaciens (de 2 à 3 heures par jour).

Pour les inconvénients de ce système, l'utilisation du flow-rack AS/RS à chute libre n'est pas adéquate dans le cas de produits volumineux et/ou fragile, car la chute libre du produit peut les endommager.

2.2.5 Modélisation discrète du temps moyen de déstockage

Cette partie présente une contribution originale de ce travail en matière d'évaluation du temps de transport du flow-rack AS/RS à chute libre. Nous allons nous intéresser à l'opération de déstockage. Pour ce faire nous allons développer une expression discrète du temps moyen de déstockage dans un flow-rack AS/RS à chute libre. Par la suite, cette expression nous aidera à faire des études comparatives avec d'autres types d'AS/RS et de valider le modèle continu du temps moyen de déstockage qui va être développé dans le chapitre 3.

Le déplacement d'un produit dans un flow-rack à chute libre est différent du déplacement d'une machine de stockage/déstockage. En effet, le déplacement résulte d'un déplacement vertical occasionné par la chute commandée du produit, et d'un déplacement horizontal effectué par un convoyeur de transport (Voir Figure 2.4). La vitesse de déplacement du convoyeur est supposée constante. En revanche le déplacement vertical n'est pas un mouvement uniforme mais un mouvement uniformément accéléré.

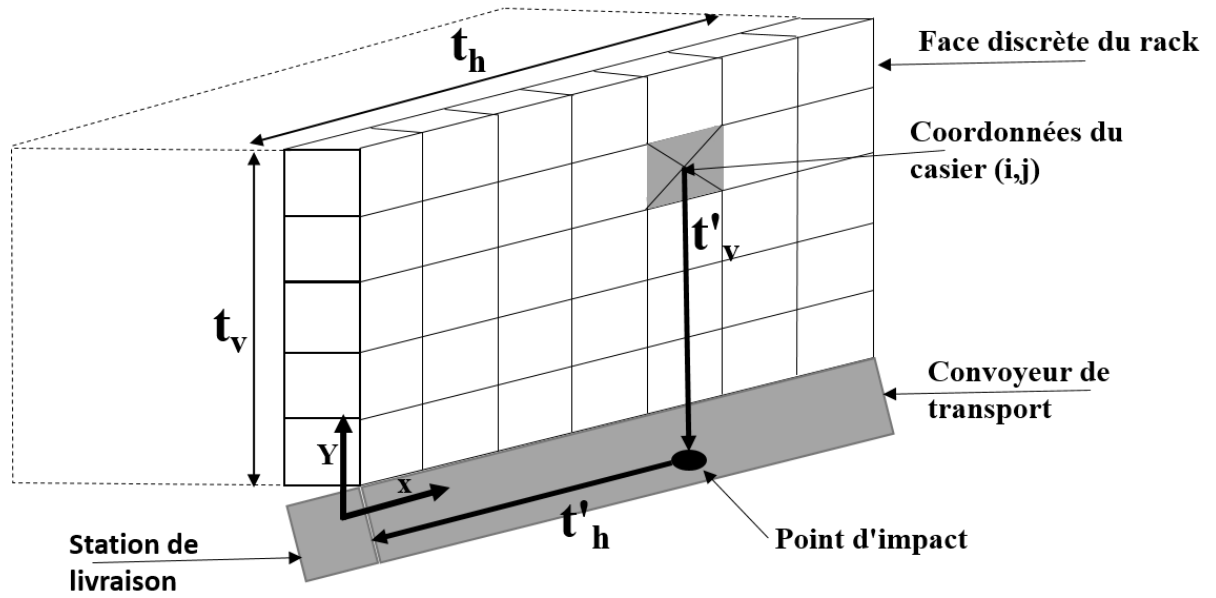


Figure 2.4. Représentation des mouvements du produit dans la face de déstockage (face discrète).

Nous utiliserons les notations suivantes :

N_V : Nombre de casiers par ligne.

N_H : Nombre de casiers par colonne.

N : Nombre total de casiers. $N = N_V * N_H$

g : L'accélération de la pesanteur. $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

V_c : La vitesse du convoyeur.

t_v : Le temps de déplacement vertical

t_h : Le temps de déplacement horizontal

t_g : Le temps de déplacement global

A_1 : Temps moyen de transport (Moyenne arithmétique).

Le temps global de déstockage d'un produit est le temps nécessaire pour aller du casier de déstockage vers la station de livraison. C'est-à-dire la somme du temps vertical (noté t_v) et du temps de déplacement horizontal (noté t_h).

Considérons le casier de coordonnées (i, j) . Le temps vertical (t_v) que met le produit durant sa chute libre, pour atteindre le convoyeur peut être calculé de l'équation du mouvement de chute libre suivante :

$$j = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t_v^2 \quad (2.1)$$

D'où :

$$t_v = \sqrt{j \cdot \frac{2}{g}} \quad (2.2)$$

Le temps horizontal (t_h) nécessaire au convoyeur pour transporter ensuite le produit vers la station de livraison est :

$$t_h = \frac{i}{v_c} \quad (2.3)$$

Le temps global de déstockage d'un produit est la somme du temps de déplacement horizontal (t_h) et du temps vertical (t_v).

$$t_g = \frac{i}{v_c} + \sqrt{j \cdot \frac{2}{g}} \quad (2.4)$$

Si on veut calculer un temps moyen de déstockage pour tous les casiers, on obtient l'expression discrète suivante :

$$A_1 = \frac{1}{N_H \cdot N_V} \sum_{i=1}^{N_H} \sum_{j=1}^{N_V} \left[\left(\frac{i}{v_c} \right) + \sqrt{j \cdot \frac{2}{g}} \right] \quad (2.5)$$

Pour les deux études de la section 2.3 et 2.4 nous avons reproduit et simulé le fonctionnement réel des AS/RS par la génération aléatoire des casiers de déstockage pour plusieurs scénarios.

2.3 Etude comparative entre le flow-rack classique et le flow-rack à chute libre

Afin de positionner le FF-flow-rack AS/RS parmi les différentes variations des Flow-rack AS/RS, nous allons présenter dans cette partie une étude comparative entre le FF-flow-rack AS/RS et le flow-rack classique étudié par Sari et al. (2005). Cette étude a fait l'objet d'une communication internationale (**Metahri et Hachemi, 2017a**).

L'objectif de cette étude est de faire une comparaison des performances entre le flow rack à chute libre et le flow-rack classique. Pour ce faire, nous utilisons trois critères de performance : le temps moyen de déstockage, le temps total d'une demande client et le débit de sortie.

L'expression du temps moyen de déstockage du FF flow-rack AS/RS a été développée dans la section 2.2.5 (voir Eq 2.5), par contre l'expression du temps moyen de déstockage du flow-rack AS/RS classique (A_2) a été développée par **Sari et al. (2005)** :

$$A_2 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N_H} \sum_{j=1}^{N_V} \text{Max}\left[\left(\frac{i}{V_h}\right), \left(\frac{j}{V_v}\right)\right] \quad (2.6)$$

Où :

V_h : La vitesse de déplacement horizontal de la machine de déstockage.

V_v La vitesse de déplacement vertical de la machine de déstockage.

2.3.1 Comparaison des performances

Pour réaliser cette étude comparative, des simulations sont effectuées pour l'évaluation de la performance de chaque système. La simulation est généralement utilisée dans la littérature pour étudier les AS/RS [(Bozer and white (1984); (Hu et al (2005); (Manzini et al (2016)].

Cette étude comparative est basée sur les hypothèses suivantes:

- Les deux systèmes (FF-Flow-rack AS/RS et le Flow rack AS/RS classique ont les mêmes dimensions et capacité du rack.
- Nous considérons trois paramètres de comparaison: le temps moyen de déstockage, le temps total et le débit d'une demande client.
- Les dimensions d'un emplacement de stockage ($l * h * d$) des deux les systèmes sont: ($15cm * 10cm * 10cm$).
- Chaque système a les mêmes vitesses, où: $V_c = V_v = V_h = 3m/s$.

La simulation est effectuée sous le logiciel MATLAB 2010a où l'organigramme de l'algorithme pour les simulations est montré à la figure. 2.5.

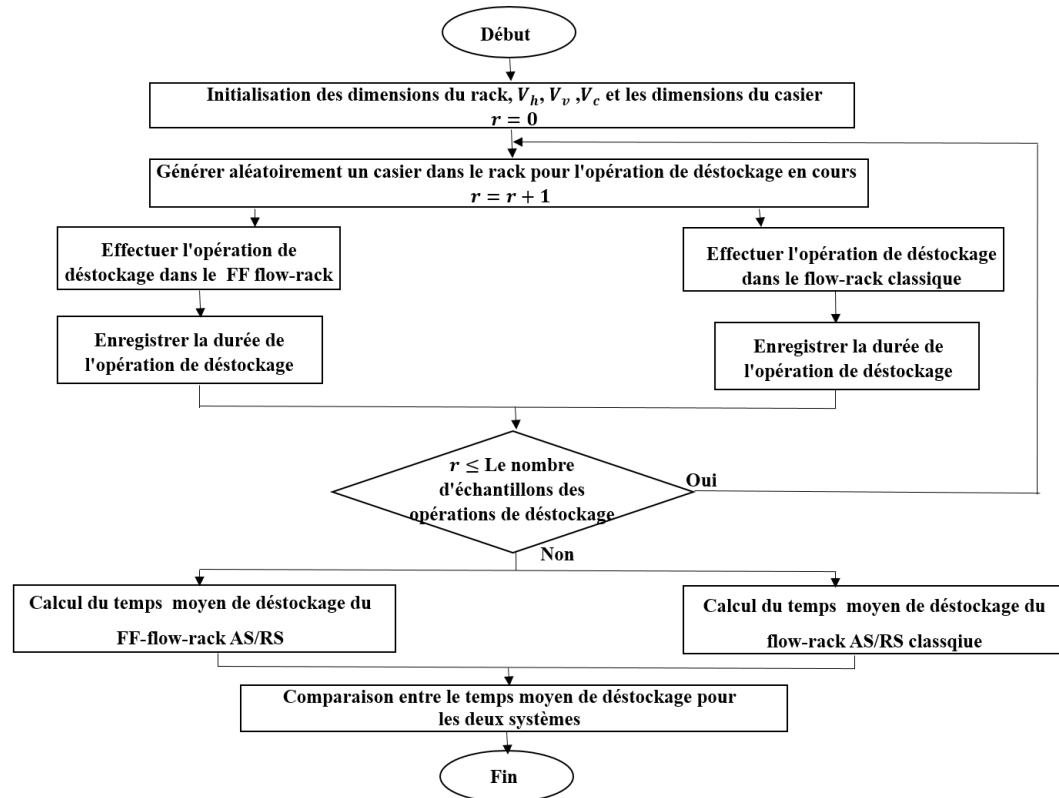


Figure 2.5. Organigramme de l'algorithme de simulation

Critère 1 : Temps moyen de déstockage

Une séquence d'un million d'opérations de déstockage ($r = 10^6$) est utilisée dans la simulation pour avoir une meilleure estimation du temps moyen de déstockage. Afin de reproduire le comportement dynamique réel de chaque système, les opérations de déstockage sont générées aléatoirement selon une loi uniforme, cela est dû au manque d'information préalable sur les demandes des clients.

Le temps moyen de déstockage du FF-flow rack et le flow-rack classique sont calculés par l'équation (2.5) et l'équation (2.6), respectivement. Ces deux équations représentent les modèles dynamiques des deux AS/RS (FF-flow-rack et classique). L'équation qui décrit l'écart de temps entre les deux systèmes est la suivante:

$$\text{Deviation}(\%) = 100 * \frac{A2-A1}{A2} \quad (2.7)$$

Les résultats de comparaisons de 20 configurations différentes des deux systèmes en fonction du temps moyen de déstockage sont schématisés sur la figure 2.6, et la figure 2.7.

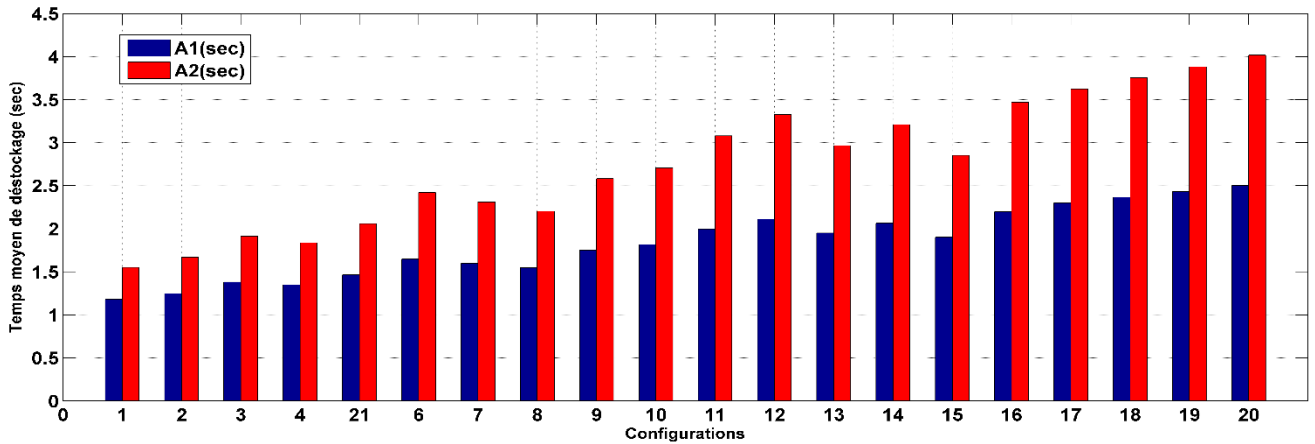


Figure 2.6. Comparaison entre les résultats du flow-rack classique AS/RS et du flow-rack AS/RS à chute libre.

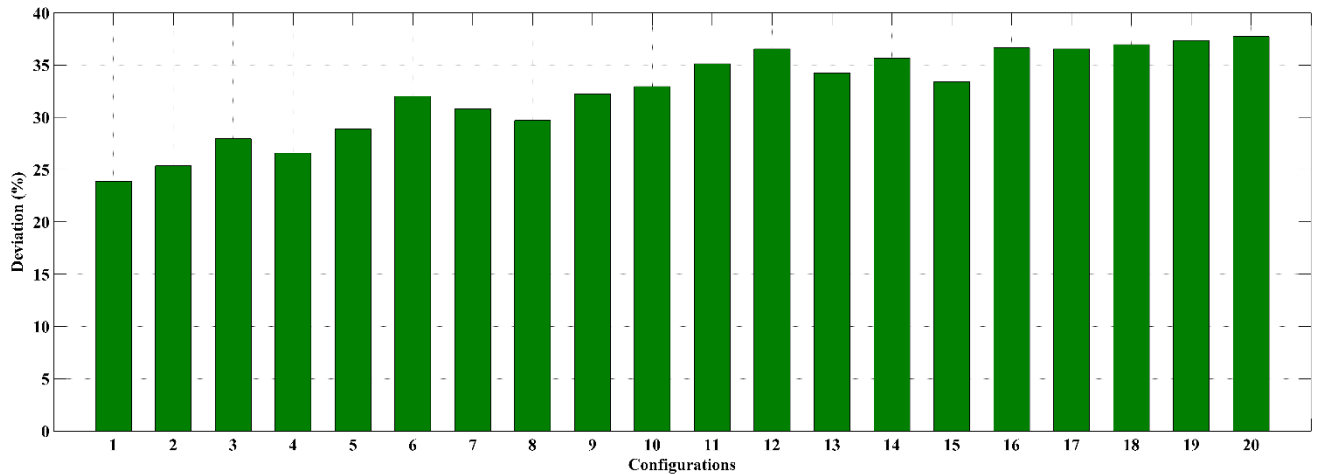


Figure 2.7. La déviation entre le temps moyen de déstockage d'un flow-rack classique et le flow-rack à chute libre.

Comme le montre la figure 2.7, la réduction du temps moyen de déstockage dans le flow-rack AS/RS à chute libre peut avoisiner les 40% par rapport au temps moyen de déstockage du flow-rack classique.

Pour le deuxième et troisième paramètre de comparaison (Temps total et débit d'une demande client), une demande client de 10 produits ($C_R = 10$) est effectuée pour les mêmes 20 configurations. Chaque demande a été générée de manière aléatoire pour 100000 itérations.

Critère 2 : Temps total d'une demande d'un client

Les résultats de cette simulation sont illustrés sur la figure 2.8, et figure 2.9.

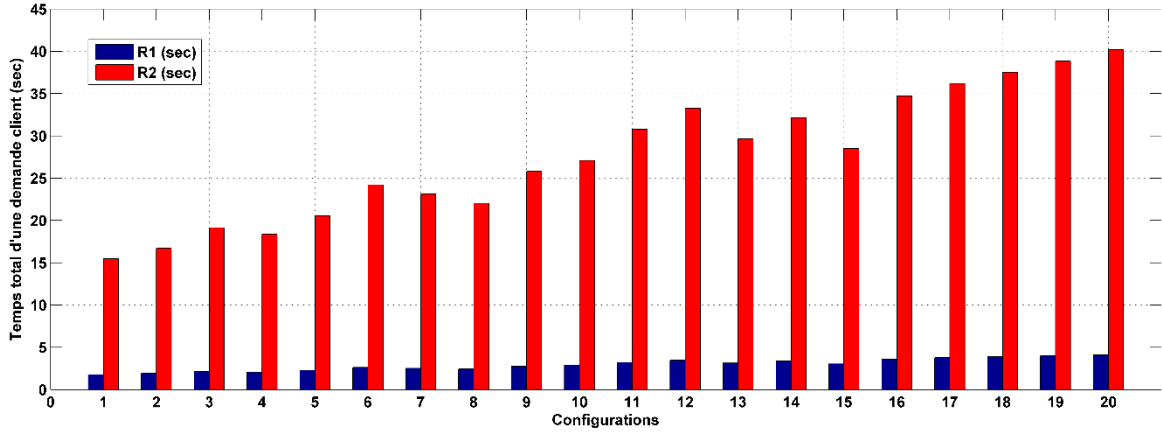


Figure 2.8. Comparaison entre les résultats du temps total d'une demande client donnés par le flow-rack classique AS/RS et ceux donnés par le flow-rack AS/RS à chute libre.

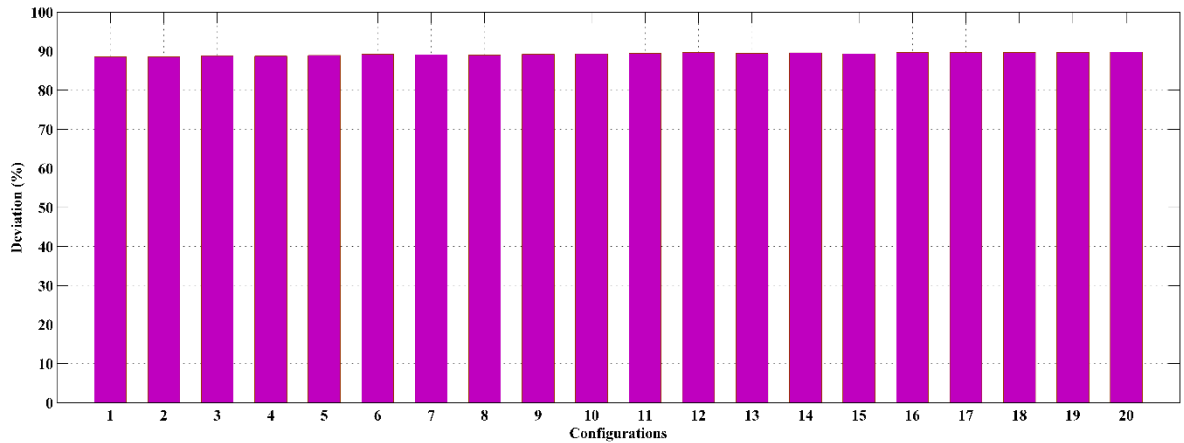


Figure 2.9. La déviation entre le temps total d'une demande client d'un flow-rack classique et le flow-rack à chute libre.

On peut voir sur la Figure 2.8 et la Figure 2.9 que la différence de performance entre le FF-flow-rack et le flow-rack classique peut atteindre 90%, si on prend en considération la possibilité du déstockage simultané de plusieurs produits (composant une demande client). Cette caractéristique n'existe pas dans le flow-rack classique à cause de la contrainte liée à la capacité de la machine de stockage/déstockage.

Soit $s'_g[k]$ le temps de transport du ($k^{\text{ème}}$) produit d'une demande client des, où $k \in [1, C_R]$. Les résultats les plus remarquables de cette étude sont:

- le temps total d'une demande client pour le FF-flow-rack R_1 est:

$$R_1 = \max_{k=1}^{C_R} (s'_g[k]) \quad (2.8)$$

- Le temps total d'une demande client pour le flow-rack classique R_2 est:

$$R_2 = \sum_k^{C_R} t'_g \quad (2.9)$$

Critère 3 : Débit de sortie

Le débit est calculé comme suit:

$$\text{Débit} = \frac{C_R}{\text{Temps total d'une demande client}} \quad (2.10)$$

Les résultats de comparaisons sont schématisés dans la figure 2.10

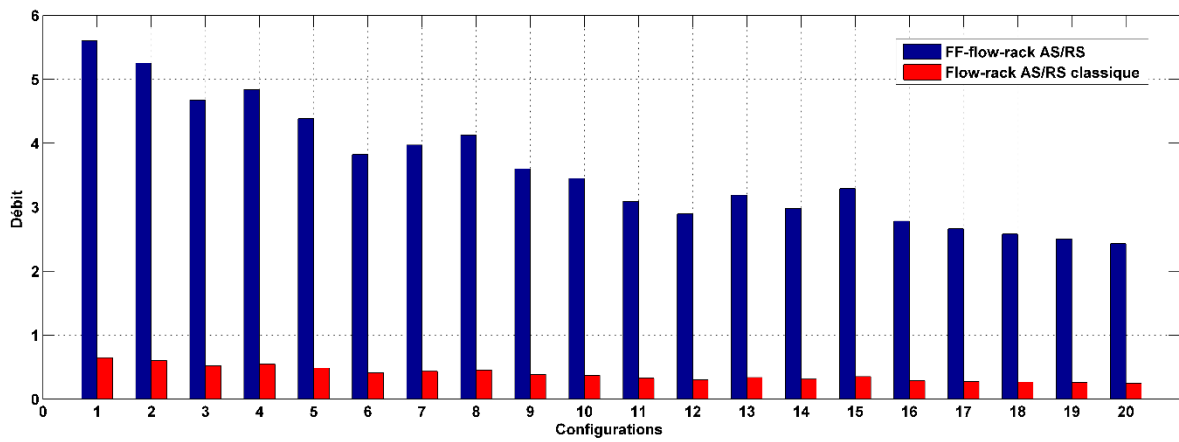


Figure 2.10. Comparaison entre le débit donné par le flow-rack classique AS/RS et par le flow-rack AS/RS à chute libre.

Nous remarquons que le débit de sortie dans le flow-rack à chute libre est largement supérieur à celui du flow-rack classique ; il est quasiment 10 fois plus important pour une commande client de 10 produits. Cela est dû au déstockage simultané dans le flow-rack à chute libre.

2.4 Evaluation des temps de dispensation manuel et automatique des médicaments

Pour montrer les avantages majeurs du FF-flow-rack AS/RS et pour attirer l'attention des pharmaciens pour automatiser leurs officines, nous allons effectuer une évaluation du temps de livraison d'une ordonnance par la dispensation manuelle (réalisé par une personne) et automatique (réalisé par le FF-flow-rack AS/RS). Le temps de dispensation automatique est calculé par simulation tandis qu'il est calculé par une étude empirique pour la dispensation manuelle. **Cette étude fait l'objet d'une communication internationale (Metahri et Hachemi, 2017b).**

Cette étude comparative est basée sur les notations et hypothèses suivantes :

Notations :

C_R Nombre de boîtes de médicament d'une ordonnance.

$R_1(t)$ Le temps de livraison total d'une ordonnance par la dispensation automatique (FF-Flow-Rack AS/RS)

$R_2(t)$ Le temps de livraison total d'une ordonnance par la dispensation manuelle. (Opérateur)

Hypothèses :

- 1- Les deux systèmes de distribution (distribution automatique et manuelle) ont les mêmes dimensions et capacité de rack.
- 2- Les dimensions du rack ($l * h * d$) des deux systèmes sont: (0.20m * 0.1m * 0.1m).
- 3- Vitesse constante du convoyeur de transport. Où: $V_c = 3\text{m/s}$.
- 4- Selon une étude sur le terrain dans les pharmacies, nous prenons des ordonnances avec $C_R = 3, 6$ et 9 boîtes de médicaments.

Pour la simulation, nous avons choisi d'utiliser le logiciel (MATLAB R2010a). L'organigramme de l'algorithme de la simulation est montré sur la figure 2.11.

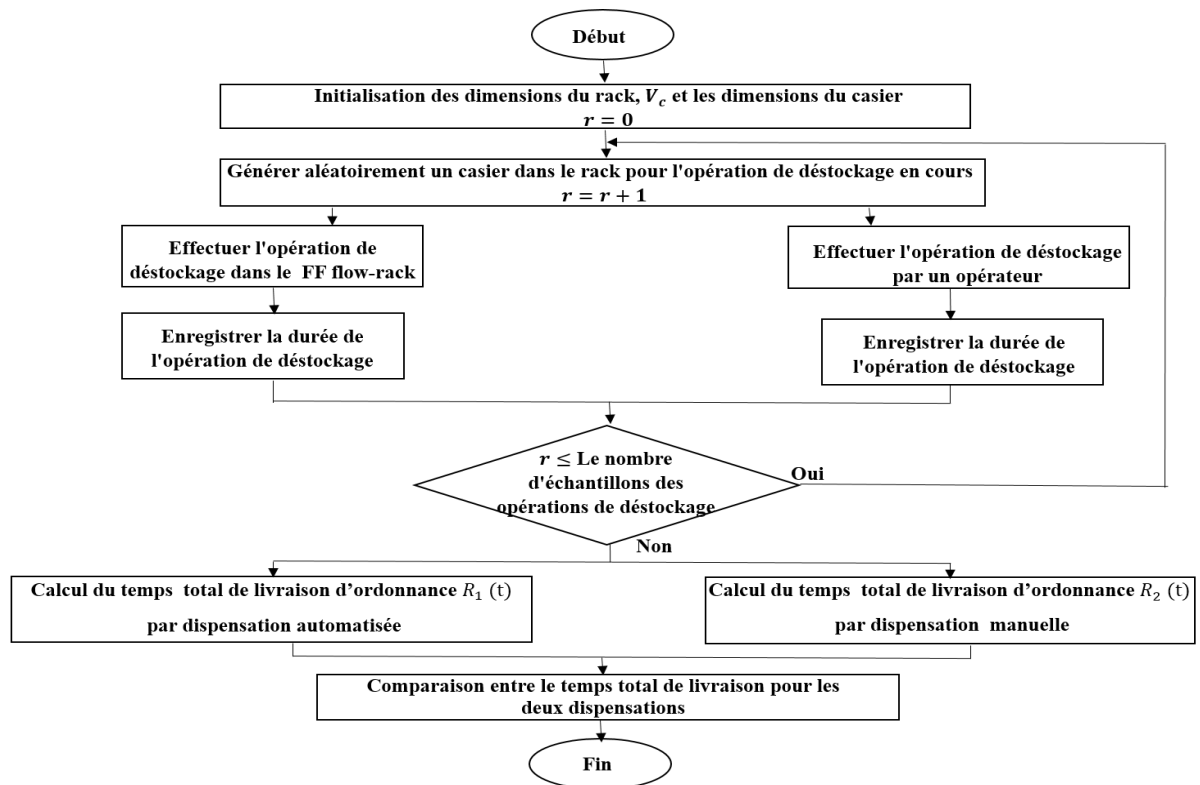


Figure 2.11. L'organigramme de simulation.

Le temps total de livraison de la dispensation automatique $R_1(t)$ est calculé par l'équation (2.6), tandis qu'il est calculé par un chronomètre pour le cas de dispensation manuelle $R_2(t)$ où l'opérateur se déplace vers les casiers pour déstocker les boîtes de médicament désirées.

Pour avoir des résultats fiables et simuler le comportement réel de la dispensation manuelle et automatique, dix scénarios pour chaque demande client ($C_R = 3, 6$ et 9 boîtes) ont été simulés afin de mesurer le temps total de dispensation.

L'équation qui décrit l'écart entre la dispensation automatique et manuelle est la suivante:

$$D\% = 100 * \frac{R_2(t) - R_1(t)}{R_2(t)} \quad (2.11)$$

L'équation qui décrit la déviation moyenne de chaque demande client (ordonnance) est la suivante :

$$D_{moy} = \frac{1}{10} \sum_{scenario=1}^{10} D\% \quad (2.12)$$

Les résultats de comparaisons d'une demande de client $C_R = 3, 6$ et 9 boîtes de médicaments, pour les deux systèmes en fonction du temps total de livraison sont schématisés dans la figure 2.12.

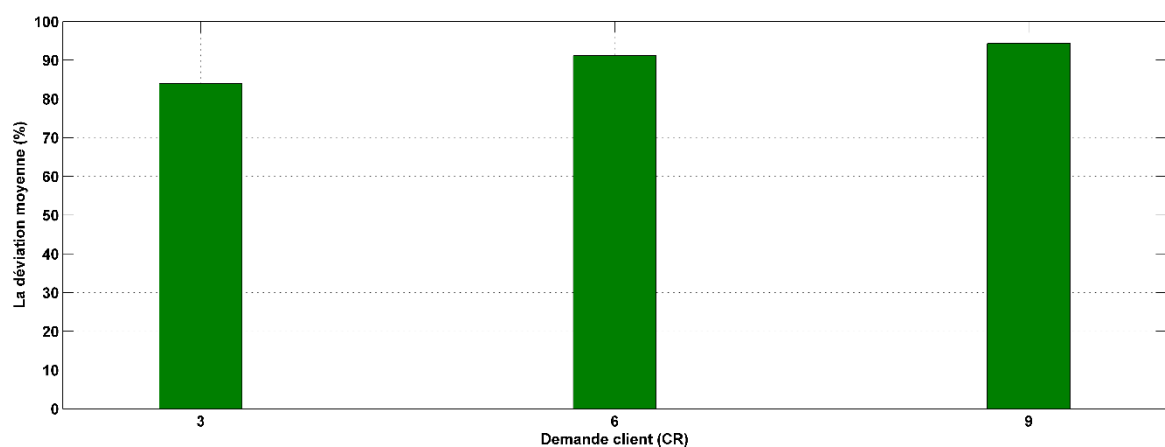


Figure 2.12. La déviation moyenne pour les trois demandes.

Comme l'illustre la figure 2.12, l'écart entre la dispensation automatique et manuelle peut atteindre 95%. Cet écart peut être augmenté lorsque :

- Les dimensions du rack augmentent.
- La vitesse du convoyeur de transport augmente.
- Le nombre de boîtes de médicament d'une ordonnance augmente.
- L'opérateur est peu familiarisé avec les emplacements des médicaments.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le flow-rack AS/RS à chute libre (FF-flow-rack AS/RS). Dans une première partie, nous avons commencé par une présentation générale sur la configuration, fonctionnement et le modèle discret du temps moyen de déstockage du FF-flow-rack AS/RS.

Par la suite, nous nous sommes intéressés à la présentation des avantages de ce système par rapport les autres types d'AS/RS. Dans un premier temps, nous avons effectué une étude comparative entre le FF-flow-rack AS/RS et le flow rack AS/RS classique, où les résultats obtenus par la simulation montrent une réduction significative du temps moyen de déstockage dans un flow-rack AS/RS à chute libre qui peut atteindre 40% et 92% pour le déstockage simultané de plusieurs produits. Ensuite, nous avons présenté une deuxième étude comparative entre la dispensation automatique (par le FF-flow-rack AS/RS) et manuelle (par un opérateur) des médicaments, les résultats de la simulation montrent que la réduction du temps moyen de dispensation par le flow-rack AS/RS à chute libre peut avoisiner les 95% par rapport au temps moyen de dispensation manuelle.

Le chapitre qui suivra porte sur la modélisation continue du temps moyen de déstockage d'un Flow-rack AS/RS à chute libre.

Chapitre 3. Modélisation analytique et validation du temps moyen de déstockage dans le flow-rack AS/RS à chute libre

3.1 Introduction

3.2 Modélisation mathématique du temps moyen de déstockage d'un flow-rack AS/RS à chute libre

3.3 Validation

3.4 Conclusion

3.1 Introduction

La modélisation du temps moyen de transport est l'un des plus importants critères de performances des systèmes automatisés de stockage/déstockage, car elle permet l'évaluation du débit du système, l'optimisation des dimensions du rack, et la comparaison entre les politiques de stockage. Dans ce chapitre, nous allons développer une expression analytique continue pour le calcul du temps moyen de transport lors d'une opération de déstockage. Par la suite, nous validons le modèle développé (continu) à travers une comparaison entre les résultats donnés par ce modèle avec ceux donné par la simulation.

3.2 Modélisation mathématique du temps moyen de déstockage d'un flow-rack AS/RS à chute libre

La contribution principale de cette partie consiste à présenter une expression mathématique continue permettant la modélisation du temps moyen de déstockage d'un flow-rack AS/RS à chute libre. **Cette étude fait l'objet d'une publication international (Metahri et Hachemi, 2018a).**

L'étude est construite sur les hypothèses suivantes :

- La face du rack est considérée comme étant une surface ne continue de points ; chaque point représente un emplacement dans lequel un produit peut être déstocké.
- La station de livraison est située en bas, à l'extrémité gauche de la face avant du rack.
- Le largeur, la hauteur et la profondeur du rack sont connus.
- La vitesse du convoyeur de transport est constante.
- Nous considérons uniquement les opérations de déstockage, car les contraintes de temps de réponse sont plus fortes sur les opérations de déstockage que celles sur les opérations de stockage, qui ne sont généralement pas critique en termes de temps. **(Roodbergen and Vis, 2009).**
- Selon la pratique en pharmacie, une politique de stockage dédiée est utilisée, ce qui signifie que chaque type de produit est affecté à un casier fixe. Cependant, nous avons supposé une politique de déstockage aléatoire, ce qui signifie que tous les produits dans la face de déstockage ont la même probabilité d'être déstockés. Donc, le stockage et le déstockage sont des opérations indépendantes.

- Le temps de glissement par la gravité du produit à l'intérieur du casier est généralement déterministe. Donc, il peut être ajouté après le calcul du temps moyen de déstockage, mais étant très faible, il peut être simplement négligé.
- Nous supposons des demandes de distributions uniformes ; c'est-à-dire que tous les produits ont la même fréquence de déstockage. Nous considérons la distribution uniforme pour ces raisons :
 - Étudier et explorer le comportement du système d'une manière générale.
 - Le manque d'informations préalables sur les demandes des clients.
 - Elle est généralement utilisée dans la littérature par plusieurs auteurs : **(Bozer and White 1984; Sari et al. 2005; Liu et al. 2016)**.

Les notations suivantes sont introduites:

L, H, D la largeur, la hauteur et la profondeur du rack

l, h, d la largeur, la hauteur et la profondeur du segment de stockage

N_L nombre de casiers par ligne

N_C nombre de casiers par colonne

N_{PF} nombre total de casiers dans la face de stockage. $N_{PF} = N_L * N_C$

M numéro de couche

N nombre total de casiers. $N = N_{PF} * M$

(i, j) les coordonnées du casier

V_c la vitesse du convoyeur.

g l'accélération de la pesanteur. $g = 9.81 \left(\frac{m}{s^2}\right)$.

t'_v le temps de déplacement vertical du casier au point d'impact sur le convoyeur de transport

t'_h le temps de déplacement horizontal du point d'impact à la station de livraison.

t'_g le temps de déplacement global

t_v le temps de déplacement vertical de la ligne la plus éloignée au point d'impact

t_h le temps de déplacement horizontal du point d'impact la plus éloignée à la station de livraison.

$E(T'_v)$ le temps moyen de déplacement vertical

$E(T'_h)$ le temps moyen de déplacement horizontal

$E(T'_g)$ le temps moyen de transport

Il convient de préciser que le temps moyen de transport de tous les articles N stockés dans le rack devient le temps moyen de transport des articles N_{PF} stockés uniquement dans la face de déstockage, car nous avons supposé qu'une politique de stockage dédié était utilisée, et les articles se déplacent automatiquement du côté de stockage au côté du déstockage du rack par gravité.

Calcul du temps moyen de déstockage $E(T'_g)$

Notre idée consiste à diviser le temps de transport d'un produit en deux temps (vertical et horizontal), où les coordonnées des produits (i, j) sont uniformément réparties. Par conséquent, le temps moyen de déstockage $E(T'_g)$ est la somme des valeurs moyennes de chaque temps de transport. Comme indiqué dans la partie hypothèse, la face de déstockage est supposée être un rectangle continu. Dans ce cas, les coordonnées discrètes des produits (i, j) deviennent des coordonnées continues notées (x, y) .

Comme illustré sur la figure 3.1, le déplacement d'un produit dans le FF-flow-rack AS/RS est différent du déplacement de la machine S/D dans le flow-rack AS/RS classique. Alors, le temps total de déplacement d'un produit du casier de stockage à la station de livraison est la somme de deux déplacements.

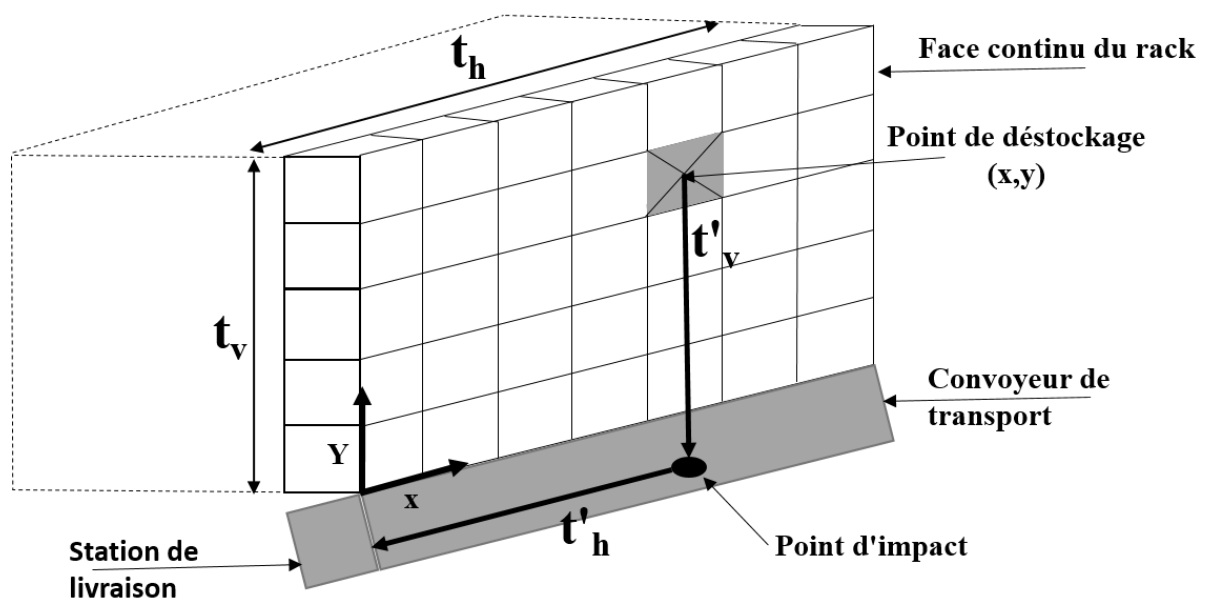


Figure 3.1. Représentation des mouvements du produit dans la face de déstockage (face continue).

Pour calculer le temps moyen de déstockage, on pose :

(t'_h, t'_v) : les coordonnées temporelles du point de déstockage (x, y) , où (x) et (y) sont générés indépendamment et uniformément distribué. Le temps total de transport t'_g de ce point (x, y) à la station de livraison est : $t'_g = t'_v + t'_h$.

T'_v : la variable aléatoire continue associée au temps de déplacement vertical t'_v . Où, $g(t) = g(T'_v = t)$ et $G(t) = P(T'_v \leq t)$ présentent la fonction de densité de probabilité et la fonction de répartition de la variable aléatoire T'_v , respectivement.

T'_h : la variable aléatoire continue associée au temps de déplacement horizontal t'_h . Où, $w(t) = w(T'_h = t)$ et $W(t) = P(T'_h \leq t)$ présentent la fonction de densité de probabilité et la fonction de répartition de la variable aléatoire T'_h , respectivement.

Calcul de l'espérance mathématique $E(T'_v)$

Le mouvement vertical est dû à la chute libre du produit désiré, donc ce n'est pas un mouvement uniforme mais un mouvement uniformément accéléré. La formule de la chute libre est :

$$y = \frac{1}{2}g(t'_v)^2 \tag{3.1}$$

Où: y représente la distance verticale entre le point de déstockage et le point d'impact dans le convoyeur.

On pose,

$$C = \sqrt{\frac{2}{g}} \tag{3.2}$$

Donc,

$$t'_v = C \sqrt{y} \tag{3.3}$$

Supposant que Y présente la variable aléatoire continue associée à la distance verticale y , et soit $f(y) = f(Y = y)$ et $F(y) = P(Y \leq y)$ représente la fonction de densité de probabilité et la fonction de répartition de la variable aléatoire Y , respectivement. Nous savons que Y est uniformément réparti entre 0 et H , alors que T'_v suit une loi de probabilité qui peut être déterminée comme suit :

Détermination de la fonction de répartition $G(t)$

On a : $G(t) = P(T'_v \leq t)$ et $T'_v = C\sqrt{Y}$

Donc,

$$G(t) = P(T'_v \leq t) = P(C\sqrt{Y} \leq t) \tag{3.4}$$

Alors,

$$G(t) = P(T'_v \leq t) = P\left(Y \leq \frac{t^2}{C^2}\right)$$

Rappelons que, $F(y) = P(Y \leq y)$ et de l'équation (3.3) on obtient: $y = \frac{1}{C^2}t^2$

Donc,

$$G(t) = P(T'_v \leq t) = F\left(Y \leq \frac{1}{C^2}t^2\right) \tag{3.5}$$

Détermination de la fonction de probabilité $g(t)$

Comme nous supposons que T'_v est une variable aléatoire continue, nous avons :

$$g(t) = \frac{dG(t)}{dt} = G'(t)$$

Par conséquent,

$$g(t) = G'(t) = F'\left(Y \leq \frac{1}{C^2}t^2\right) \tag{3.6}$$

Ainsi,

$$g(t) = \frac{2t}{C^2} F'\left(Y \leq \frac{t^2}{C^2}\right) \text{ Où : } f(y) = \frac{dF(y)}{dy} = F'(y) \tag{3.7}$$

Alors,

$$g(t) = \frac{2t}{C^2} f\left(Y = \frac{t^2}{C^2}\right) \tag{3.8}$$

Pour la politique de déstockage aléatoire, les coordonnées verticales des emplacements sont supposées uniformément distribuées. Ainsi, la fonction de densité de probabilité $f(y)$ de la

variable aléatoire continue Y peut-être représentée comme une loi uniforme entre 0 et H , comme suit:

$$f(y) = P(Y = y) = \begin{cases} \frac{1}{H} & \text{si } 0 \leq y \leq H \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.9)$$

Ainsi,

$$f\left(Y = \frac{t^2}{C^2}\right) = P\left(Y = \frac{t^2}{C^2}\right) = \begin{cases} \frac{1}{H} & \text{si } 0 \leq \frac{t^2}{C^2} \leq H \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Alors,

$$f\left(Y = \frac{t^2}{C^2}\right) = P\left(Y = \frac{t^2}{C^2}\right) = \begin{cases} \frac{1}{H} & \text{si } 0 \leq t \leq C\sqrt{H} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.10)$$

En remplaçant l'équation (3.10) dans l'équation (3.8), on obtient,

$$g(t) = P(T'_v = t) = \begin{cases} \frac{2}{H C^2} t & \text{si } 0 \leq t \leq C\sqrt{H} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.11)$$

Par conséquent,

$$G(t) = P(T'_v \leq t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t \leq 0 \\ \frac{2}{H C^2} t & \text{si } 0 \leq t \leq C\sqrt{H} \\ 1 & \text{si } t \geq C\sqrt{H} \end{cases} \quad (3.12)$$

L'espérance mathématique $E(T'_v)$ de la variable aléatoire continue T'_v est obtenue comme suit:

$$E(T'_v) = \int_{-\infty}^{+\infty} t g(t) dt \quad (3.13)$$

Alors,

$$E(T'_v) = \int_{-\infty}^0 t g(t) dt + \int_0^{C\sqrt{H}} t g(t) dt + \int_{C\sqrt{H}}^{+\infty} t g(t) dt$$

Puisque,

$$\int_{-\infty}^0 t g(t) dt + \int_{C\sqrt{H}}^{+\infty} t g(t) dt = 0$$

Alors, l'équation (3.13) peut être réduite à l'équation suivante:

$$E(T'_v) = \int_0^{C\sqrt{H}} t g(t) dt$$

Donc,

$$E(T'_v) = \frac{2}{3} C\sqrt{H} \quad (3.14)$$

Calcul de l'espérance mathématique $E(T'_h)$

Le mouvement horizontal est dû à la translation du produit désiré du point d'impact à la station de livraison par le convoyeur de transport, donc c'est un mouvement uniforme. Le temps de déplacement horizontal t'_h peut être calculé comme suit :

$$t'_h = \frac{x}{v_c} \quad (3.15)$$

Où : x représente la distance horizontale entre le point d'impact et la station de livraison.

Rappelons que la variable aléatoire T'_h est uniformément distribuée entre 0 et t_h , où : $t_h = \frac{L}{v_c}$

Pour la politique de déstockage aléatoire, les coordonnées horizontales des emplacements sont supposées uniformément distribuées. Ainsi, la fonction de densité de probabilité $w(t)$ de ce déplacement horizontal suit une loi uniforme entre 0 et t_h , où :

$$w(t) = P(T'_h = t) = \begin{cases} \frac{1}{t_h} & \text{si } 0 \leq t \leq t_h \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.16)$$

Par conséquent,

$$W(t) = P(T'_h \leq t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t \leq 0 \\ \frac{1}{t_h} & \text{si } 0 \leq t \leq t_h \\ 1 & \text{si } t \geq t_h \end{cases} \quad (3.17)$$

L'espérance mathématique $E(T'_h)$ de la variable aléatoire continue T'_h est obtenue comme suit:

$$E(T'_h) = \int_{-\infty}^{+\infty} t w(t) dt \quad (3.18)$$

Alors,

$$E(T'_h) = \int_{-\infty}^0 t w(t) dt + \int_0^{t_h} t w(t) dt + \int_{t_h}^{+\infty} t w(t) dt$$

Puisque,

$$\int_{-\infty}^0 t w(t) dt + \int_{t_h}^{+\infty} t w(t) dt = 0$$

Alors, l'équation (3.18) peut être réduite à l'équation suivante:

$$E(T'_h) = \int_0^{t_h} \frac{t}{t_h} dt$$

Donc,

$$E(T'_h) = \frac{1}{2} t_h \quad (3.19)$$

Rappelons que, $t_h = \frac{L}{v_c}$. Donc,

$$E(T'_h) = \frac{L}{2 v_c} \quad (3.20)$$

Le temps moyen de déstockage du flow-rack AS/RS à chute libre $E(T'_g)$ est obtenu comme suit :

Sachant que: T'_g est la variable aléatoire continue associée à t'_g .

$$E(T'_g) = E(T'_v + T'_h) = E(T'_v) + E(T'_h) \quad (3.21)$$

En remplaçant les expressions de l'équation (3.14) et l'équation (3.20) dans l'équation (3.21), on obtient :

$$E(T'_g) = \frac{2}{3} C \sqrt{H} + \frac{1}{2 v_c} L \quad (3.22)$$

3.3 Validation

Le modèle de temps moyen de déstockage présenté dans la section 3.2 fournit des valeurs approximatives puisqu'il est basé sur une approximation continue des lois de probabilité modélisant le déplacement des produits. Afin de valider l'exactitude de ce modèle, nous avons effectué une comparaison entre les résultats obtenus à partir du modèle continu et ceux obtenus à partir de la simulation qui est basée sur le modèle discret présenté dans la section 2.2.5 du 2^{ème} chapitre.

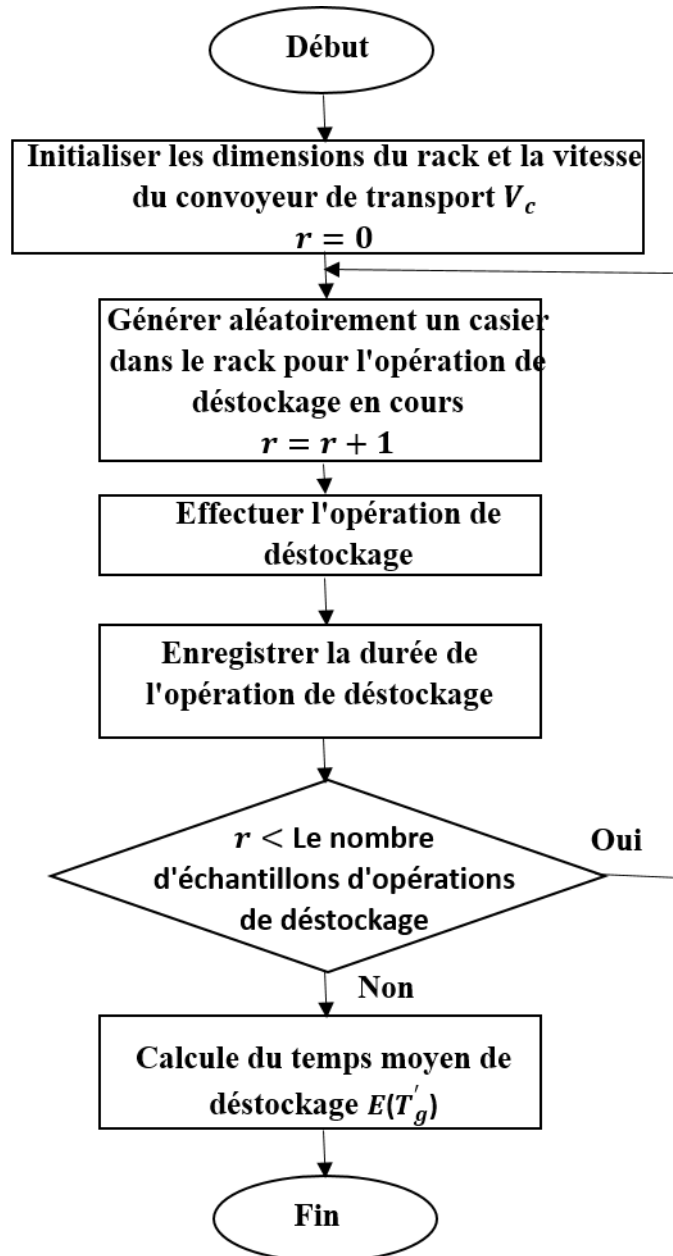


Figure 3.2. Organigramme de l'algorithme de la simulation.

La simulation est largement utilisée dans la littérature pour valider la précision des modèles développés par (Bozer et White 1984, Sari et al 2005, Hu et al 2005, Manzini et al. 2016) et les modèles de chaînes logistiques (Chiadamrong et Piyathanavong. 2017). Selon Rao et Naikan (2014), la simulation est utilisée pour représenter le comportement dynamique des systèmes dans le sens le plus réaliste. Dans notre cas, l'avantage de la simulation est de reproduire le comportement aléatoire des opérations de déstockage dans le FF-flow-rack AS / RS, et la détermination expérimentale du temps moyen de déstockage.

Le modèle discret est utilisé pour calculer le temps moyen de déstockage de chaque opération de déstockage. La simulation est développée à l'aide du logiciel (MATLAB R2010a) est illustrée à la figure 3.2.

Afin de calculer le temps moyen de déstockage par la simulation, une séquence d'un million d'opérations de déstockage a été effectuée ($r = 10^6$). 20 configurations différentes du FF-flow-rack AS/RS ont été simulées. Pour chaque configuration, on suppose que la largeur (l) et la hauteur (h) de chaque emplacement de stockage sont respectivement de 20 cm et 10 cm. De plus, nous allons faire varier la vitesse du convoyeur de transport (V_c).

Les résultats de la comparaison entre la simulation et le modèle continu $E(T'_g)$ sont résumés dans le tableau 3.1, le tableau 3.2 et le tableau 3.3. Les colonnes 2, 3 et 4 de ces tableaux représentent respectivement le nombre de casier par ligne (N_L), par colonne (N_c) et le nombre total de casier dans la face de déstockage (N_{PF}). Tandis que, les colonnes 5, 6 et 7 représentent respectivement le temps moyen de déstockage calculé par simulation, par le modèle continu $E(T'_g)$ et la déviation entre les deux modèles.

Ces résultats sont également schématisés dans la figure 3.3 et à la figure 3.4. La figure 3.3 représente une comparaison entre les résultats (temps moyen de déstockage) donnés par le modèle continu avec ceux donnés par la simulation, pour les 20 différentes configurations et trois vitesses du convoyeur de transport. Par ailleurs, la figure 3.4 montre la déviation (%) entre les résultats de la simulation et le modèle continu de chaque configuration, avec les trois valeurs de la vitesse du convoyeur de transport (V_c).

L'équation qui décrit la déviation en (%) entre les deux modèles est la suivante :

$$\text{Deviation}(\%) = \frac{(\text{simulation}) - (E(T'_g))}{(\text{simulation})} 100\% \quad (3.23)$$

Table 3.1. Comparaison entre les résultats donnés par le modèle continu et la simulation pour les trois valeurs de $V_c = 1$ m/s.

Configurations	N_L	N_C	N_{PF}	Simulation	$E(T'_g)$	Déviations (%)
1	20	24	480	2.5768	2.4663	4.2855
2	52	27	1404	5.8061	5.6946	1.9208
3	54	27	1458	6.0073	5.8946	1.8757
4	32	25	800	3.7886	3.6759	2.9723
5	36	26	936	4.1968	4.0854	2.6559
6	50	25	1250	5.5895	5.4759	2.0322
7	26	24	624	3.1793	3.0663	3.5518
8	48	24	1152	5.3812	5.2663	2.1348
9	28	25	700	3.3888	3.2759	3.3288
10	44	25	1100	4.9892	4.8759	2.2695
11	42	26	1092	4.7965	4.6854	2.3174
12	40	27	1080	4.6044	4.4946	2.3842
13	38	26	988	4.3990	4.2854	2.5822
14	56	27	1512	6.2059	6.0946	1.7929
15	34	24	816	3.9769	3.8663	2.7799
16	30	26	780	3.5993	3.4854	3.1651
17	22	24	528	2.7792	2.6663	4.0614
18	24	26	624	2.9993	2.8854	3.7986
19	46	25	1150	5.1934	5.0759	2.2620
20	58	27	1566	6.4117	6.2946	1.8268

Table 3.2. Comparaison entre les résultats donnés par le modèle continu et la simulation pour les trois valeurs de $V_c = 2$ m/s.

Configurations	N_L	N_C	N_{PF}	Simulation	$E(T'_g)$	Déviaton (%)
1	20	24	480	1.5289	1.4663	4.0931
2	52	27	1404	3.1555	3.0946	1.9284
3	54	27	1458	3.2563	3.1946	1.8954
4	32	25	800	2.1394	2.0759	2.9664
5	36	26	936	2.3473	2.2854	2.6390
6	50	25	1250	3.0404	2.9759	2.1205
7	26	24	624	1.8302	1.7663	3.4911
8	48	24	1152	2.9283	2.8663	2.1176
9	28	25	700	1.9393	1.8759	3.2691
10	44	25	1100	2.7406	2.6759	2.3573
11	42	26	1092	2.6508	2.5854	2.4672
12	40	27	1080	2.5567	2.4946	2.4276
13	38	26	988	2.4476	2.3854	2.5410
14	56	27	1512	3.3578	3.2946	1.8820
15	34	24	816	2.2290	2.1663	2.8103
16	30	26	780	2.0479	1.9854	3.0547
17	22	24	528	1.6301	1.5663	3.9115
18	24	26	624	1.7475	1.6854	3.5577
19	46	25	1150	2.8388	2.7759	2.2147
20	58	27	1566	3.4550	3.3946	1.7462

Table 3.3. Comparaison entre les résultats donnés par le modèle continu et la simulation pour les trois valeurs de $V_c = 3$ m/s.

Configurations	N_L	N_C	N_{PF}	Simulation	$E(T'_g)$	Déviations (%)
1	20	24	480	1.1791	1.1330	3.9115
2	52	27	1404	2.2752	2.2280	2.0782
3	54	27	1458	2.3405	2.2946	1.9615
4	32	25	800	1.5895	1.5426	2.9478
5	36	26	936	1.7318	1.6854	2.6831
6	50	25	1250	2.1882	2.1426	2.0824
7	26	24	624	1.3803	1.3330	3.4235
8	48	24	1152	2.1135	2.0663	2.2333
9	28	25	700	1.4558	1.4093	3.1937
10	44	25	1100	1.9886	1.9426	2.3135
11	42	26	1092	1.9312	1.8854	2.3732
12	40	27	1080	1.8755	1.8280	2.5329
13	38	26	988	1.7997	1.7520	2.6499
14	56	27	1512	2.4068	2.3613	1.8915
15	34	24	816	1.6456	1.5997	2.7939
16	30	26	780	1.5303	1.4854	2.9336
17	22	24	528	1.2453	1.1997	3.6683
18	24	26	624	1.3319	1.2854	3.4901
19	46	25	1150	2.0556	2.0093	2.2524
20	58	27	1566	2.4722	2.4280	1.7904

Nous observons à partir de la figure 3.3 que les résultats obtenus à la fois du modèle continu et de la simulation sont proches les uns des autres, ce qui prouve que notre expression analytique simule le comportement réel du FF-flow-rack AS/RS.

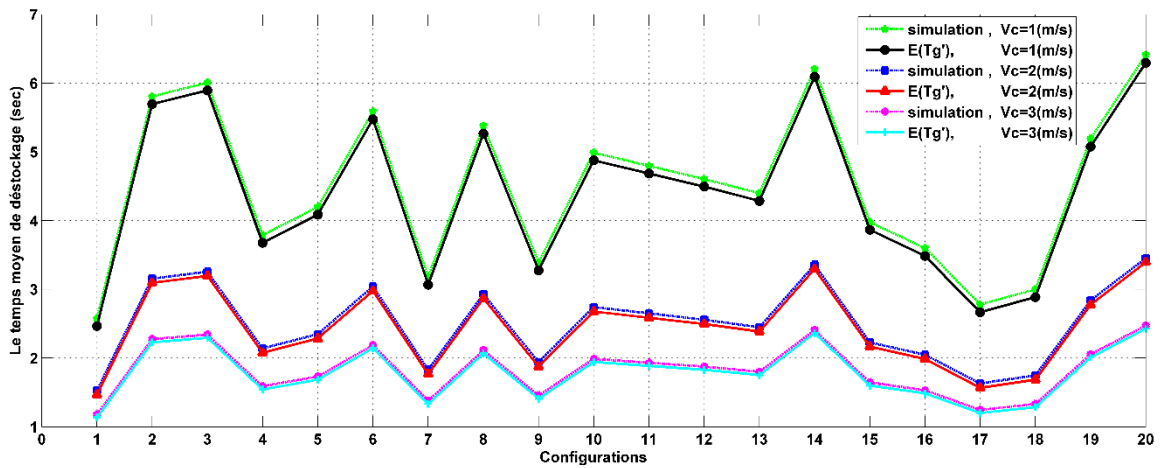


Figure 3.3. Comparaison entre les résultats donnés par le modèle continu et la simulation pour les trois valeurs de V_c .

De plus, comme l'illustre la figure 3.4, la déviation maximale est inférieure à 5%, ce qui montre que le modèle continu donne une très bonne approximation des résultats de simulation, qui sont plus proches de la nature réelle du rack. En raison du manque d'espace, seuls les résultats de simulation de 20 configurations du FF-flow-rack AS/RS ont été présentés. Cependant, le modèle proposé (modèle continu) peut estimer le temps moyen de déstockage d'une large gamme de configurations du système avec une très bonne précision.

Nous remarquons que l'expression analytique développée permet une évaluation rapide du temps moyen de déstockage, et que le modèle développé peut vraiment être utilisé pour guider le processus de prise de décision concernant la conception et le contrôle du FF-flow-rack AS / RS.

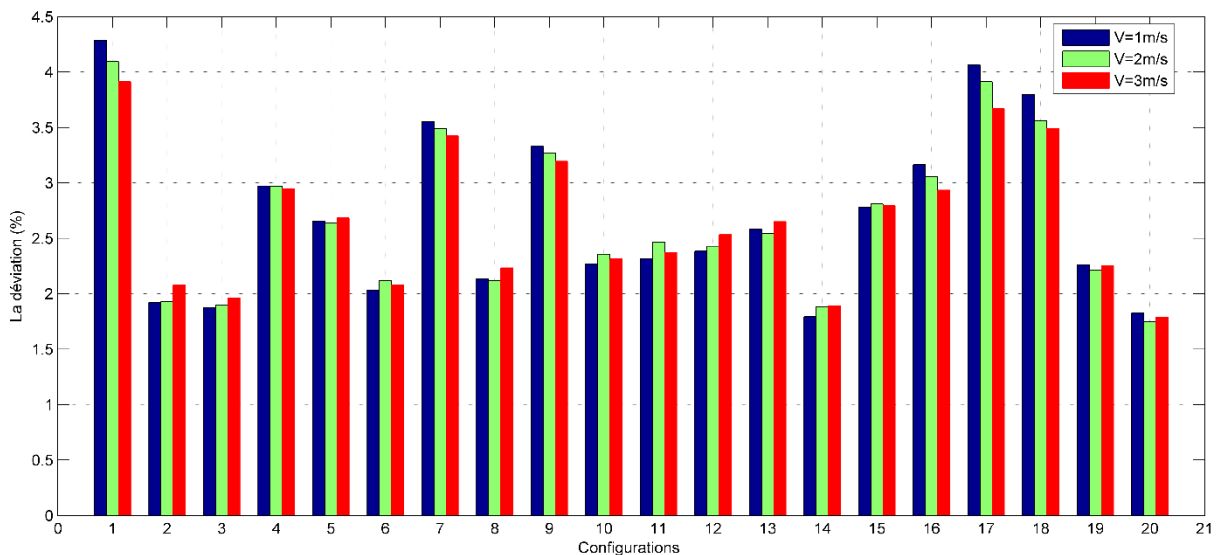


Figure 3.4. La déviation entre le modèle continu et la simulation pour les trois valeurs de V_c .

De plus, l'expression développée (Eq 3.22) offre plusieurs applications dans la gestion des AS / RS, comme :

- Evaluation du débit du FF-flow-rack AS/RS pour différentes configurations.
- Optimisation des dimensions du rack, où l'expression développée représente la fonction objective à minimiser.
- Comparaison entre différentes politiques de stockage.
- Comparaison des performances entre le FF-flow-rack AS/RS et les autres types d'AS/RS.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons calculé l'expression analytique pour le temps moyen de déstockage d'un flow-rack AS/RS à chute libre. Cette expression est déterminée en utilisant l'approche continue qui considère la face du rack comme un plan où le déstockage peut être réalisé à n'importe quel point.

Nous avons simulé le flow-rack AS/RS à chute libre pour différentes tailles et nous avons calculé le temps moyen de déstockage en utilisant l'expression analytique. Les résultats obtenus par la simulation étaient très proches des valeurs calculées par l'expression analytique. La plus grande déviation entre ces deux approches est de 5%.

Le chapitre suivant porte sur l'optimisation des dimensions du rack, dans le but de minimiser le temps moyen de déstockage d'un flow-rack AS/RS à chute libre.

Chapitre 4. Optimisation des dimensions d'un flow-rack AS/RS à chute libre

4.1 Introduction

4.2 Formulation du Problème

4.2.1 Technique d'énumération

4.2.2 Optimisation discrète (méthode exacte de résolution)

4.4 Conclusion

4.1 Introduction

Les AS/RS offrent plusieurs avantages, mais, d'un autre côté, ils présentent quelques inconvénients comme : investissement très élevé, disposition inflexible et une capacité de stockage fixe. Par conséquent, la conception de l'AS/RS représente une étape cruciale pendant la phase d'étude de faisabilité. Pour ces raisons, dans ce chapitre nous nous proposons de déterminer les dimensions optimales du rack d'un flow-rack AS/RS à chute libre en vue de minimiser le temps moyen de déstockage.

Nous allons résoudre le problème d'optimisation en utilisant deux méthodes ; à savoir la technique d'énumération et la méthode d'optimisation discrète.

Nous allons effectuer cette étude afin de formuler une recommandation concernant la conception du flow-rack AS/RS à chute libre, qui peut aider les concepteurs d'AS/RS.

Les résultats de ces travaux ont fait l'objet d'une communication en conférence (**Metahri et Hachemi (2017c)**), ainsi que d'un article soumis (**Metahri et Hachemi (2018b)**).

4.2 Formulation du Problème

La détermination des dimensions du rack est une clé pour l'amélioration des performances d'AS/RS. Cependant, les contraintes d'espace nécessitent que les dimensions du rack soient limitées aux valeurs admissibles (L_A, H_A, D_A) , la capacité de stockage est fixée à N emplacements de stockage, où les dimensions de chaque emplacement (l, h, d) sont fixés. Donc, il existe de nombreuses configurations possibles pour concevoir ce système (voir Figure 4.1), alors quelles sont les dimensions optimales du rack qui donnent le temps de déstockage minimal ?

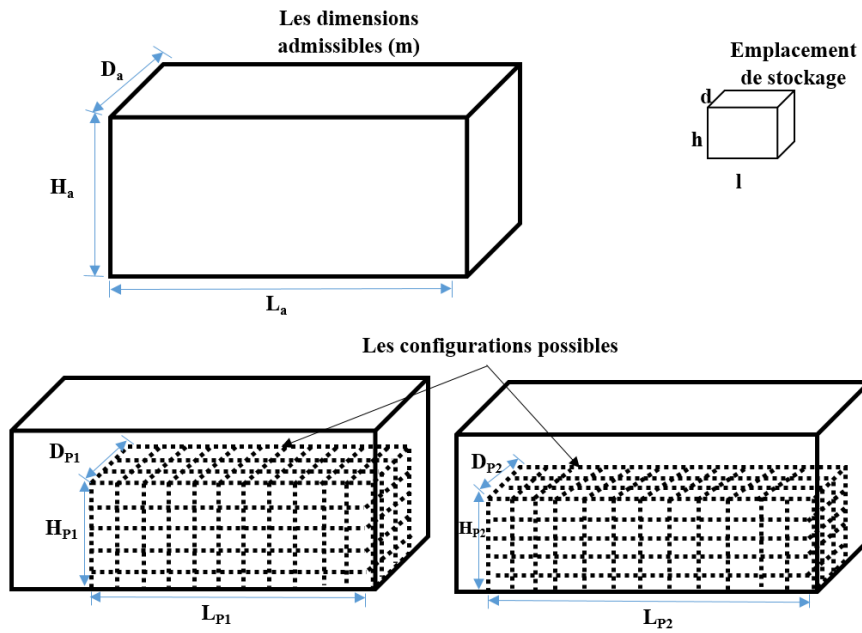


Figure 4.1. Représentation des dimensions admissibles et possibles du rack.

Afin de résoudre ce problème, nous allons proposer deux méthodes de résolution (technique d'énumération et optimisation discrète). Pour chacune des deux méthodes, nous avons considéré des capacités de stockage du rack variant de 100 à 27 000 casiers. Pour chaque capacité de stockage, le temps d'exécution de l'algorithme de chaque méthode est évalué. Nous avons supposé que les dimensions d'un emplacement de stockage sont $(l, h, d) = (15, 10, 10)(cm)$, et la vitesse du convoyeur de transport est $V_C = 3m/s$. De plus, l'algorithme d'optimisation de chaque méthode est programmé dans MATLAB et exécuté sur un PC avec un CPU 2,17 GHz et 2 Go de RAM.

Les notations suivantes sont introduites :

L_A, H_A, D_A	Les dimensions admissibles du rack
L_p, H_p, D_p	Les dimensions possibles du rack
L_o, H_o, D_o	Les dimensions optimales du rack
l, h, d	Les dimensions d'un emplacement de stockage.
N_L	Nombre de casier par ligne. $N_L = \frac{L}{l}$
N_C	Nombre de casier par colonne. $N_C = \frac{H}{h}$

M	Nombre de couche. $M = \frac{D}{d}$
N	Capacité de stockage. $N = N_L * N_C * M$

4.2.1 Technique d'énumération

C'est une méthode exploratoire qui fournit une solution exacte et optimale parmi toutes les solutions possibles. Dans notre cas, cette technique explore toutes les configurations possibles du rack, et sélectionne la configuration optimale associée au temps moyen de déstockage minimal.

Pour cela, comme indiqué dans la figure 4.2, nous allons proposer un organigramme d'optimisation qui peut se résumer comme suit :

- Initialisation des paramètres du système tel que la capacité de stockage (N), les dimensions admissibles du rack (L_A, H_A, D_A), les dimensions d'emplacement de stockage (l, h, d), et la vitesse du convoyeur de transport (V_C).
- Calcul de toutes les configurations possibles (N_L, N_C, M) de chaque capacité de stockage définie (N).
- Le temps moyen de déstockage (A_1) est calculé pour chaque configuration possible. Une séquence de 100 000 opérations de déstockage a été effectuée ($r = 10^5$), afin de calculer (A_1), où les opérations de déstockage sont générées de manière aléatoire pour reproduire le comportement réel du système. (A_1 : est l'expression du temps moyen de déstockage développé dans section 2.2.5 du 2^{ème} chapitre).
- La configuration optimale est celle correspondant au temps moyen de déstockage minimal.

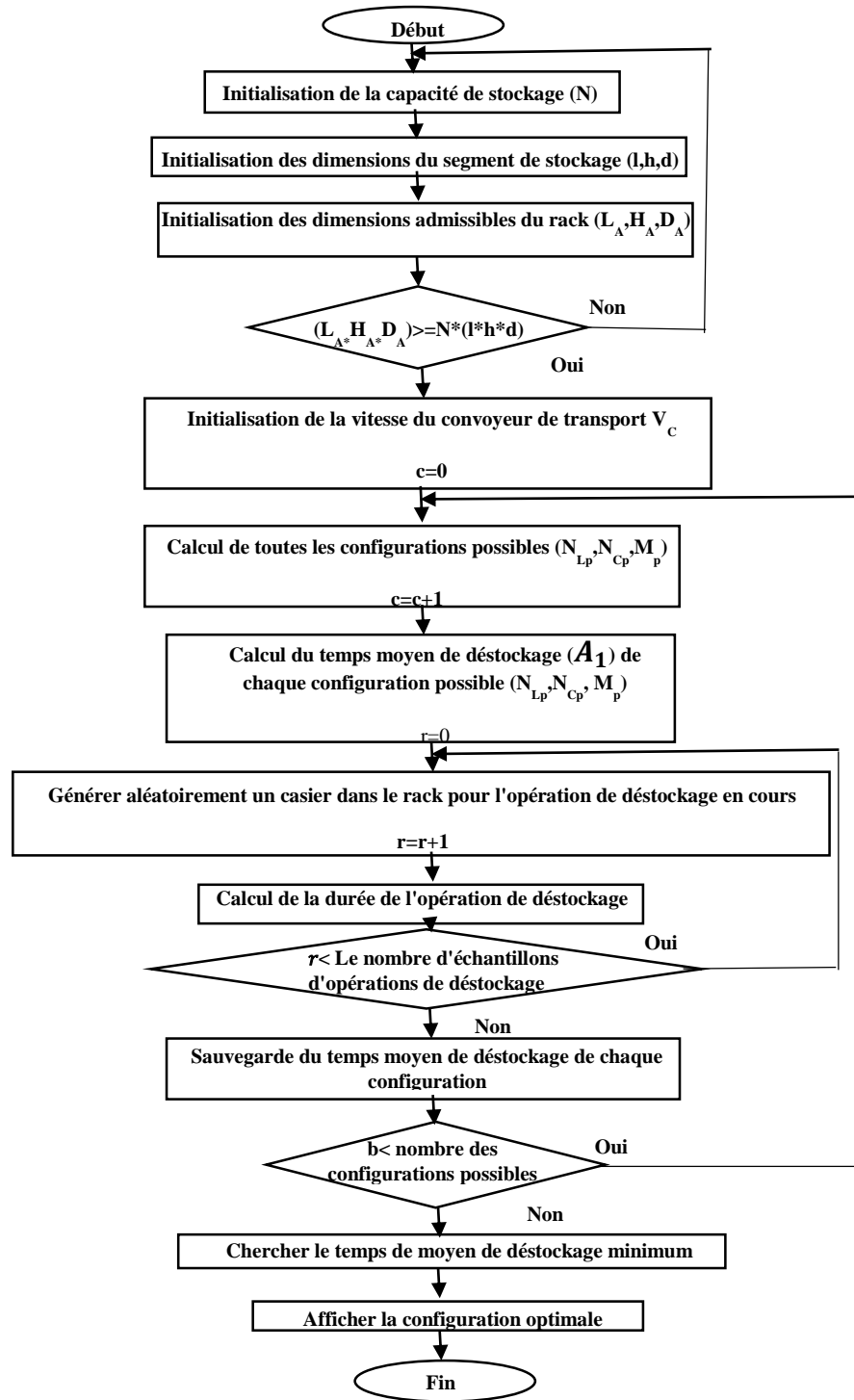


Figure 4.2. Organigramme d'algorithme d'optimisation (technique d'énumération).

Résultats et interprétations

Afin d'illustrer la procédure d'optimisation, le tableau 4.1 présente un exemple avec les résultats détaillés pour une capacité de stockage ($N = 100$). Les résultats obtenus des autres capacités de stockage sont résumés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.1. Dimensions optimales du rack pour une capacité de stockage $N = 100$.

Capacité de stockage N	Les dimensions admissibles (m)			Nombre de configurations possibles	Les configurations possibles			A_1 (s)	Le (A_1) minimal	La configuration optimale			Les dimensions optimales (m)			Temps d'exécution d'algorithme (mn)
	L_A	H_A	D_A		N_{Lp}	N_{Cp}	M_p			N_{Lo}	N_{Co}	M_o	L_o	H_o	D_o	
100	1.5	2	0.6	10	1	20	5	0.4909	0.3644	4	5	5	0.6	0.5	0.5	3.7237
					2	10	5	0.3960								
					4	5	5	0.3644								
					5	4	5	0.3694								
					5	5	4	0.3892								
					5	10	2	0.4703								
					5	20	1	0.5905								
					10	2	5	0.4481								
					10	5	2	0.5141								
					10	10	1	0.5953								

Tableau 4.2. Dimensions optimales du rack pour différentes capacités de stockage.

Numéro de la capacité de stockage N	Capacité de stockage N	Les dimensions admissibles (m)			Nombre de configurations possibles	L_e (A_1) minimal	La configuration optimale			Les dimensions optimales (m)			Temps d'exécution d'algorithme (mn)
		L_A	H_A	D_A			N_{Lo}	N_{Co}	M_o	L_o	H_o	D_o	
1	100	1.5	2	0.6	10	0.3644	4	5	5	0.6	0.5	0.5	3.7237
2	200				10	0.4411	5	8	5	0.75	0.8	0.5	5.1113
3	400				7	0.5459	8	10	5	1.2	1	0.5	3.7438
4	800	4	1.5	0.8	7	0.5959	10	10	8	1.5	1	0.8	2.7499
5	900				11	0.6603	10	15	6	1.5	1.5	0.6	3.8294
6	1200				10	0.6597	10	15	8	1.5	1.5	0.8	4.9991
7	1400				5	0.8464	20	10	7	3	1	0.7	2.0975
8	1600	6	2	1	18	0.6650	8	20	10	1.2	2	1	7.6664
9	1800				28	0.6905	9	20	10	1.35	2	1	12.7414
10	2000				9	0.7143	10	20	10	1.5	2	1	4.1323
11	3000				8	0.8402	15	20	10	2.25	2	1	3.3255
12	4000				5	0.9631	20	20	10	3	2	1	1.8267
13	5000	8	2.5	1.2	7	1.0132	20	25	10	3	2.5	1	2.6314
14	6000				11	1.1118	24	25	10	3.6	2.5	1	4.1910
15	7000				6	1.2150	28	25	10	4.2	2.5	1	2.1091
16	8000				5	1.3154	32	25	10	4.8	2.5	1	2.1338
17	10000	15	3	1.5	7	1.5144	40	25	10	6	2.5	1	2.5140
18	21000				14	1.7883	50	28	15	7.5	2.8	1.5	7.3610
19	24000				9	2.1141	64	25	15	9.6	2.5	1.5	3.1748
20	27000				10	2.0581	60	30	15	9	3	1.5	6.5480

Après le calcul et l'analyse des résultats obtenus par l'optimisation, on peut faire les remarques suivantes :

- Le rack optimal n'est pas cubique en temps (c'est-à-dire que le temps de déplacement sur la largeur, la hauteur et la profondeur ne sont pas égaux).
- L'algorithme d'optimisation tend généralement à choisir la profondeur maximale possible, ensuite il tend à choisir plus de hauteur que de largeur du rack, car la profondeur n'affecte pas le temps moyen de déstockage, tandis que la hauteur affecte légèrement le temps moyen de déstockage.

On peut voir dans le tableau 4.2 que le temps de l'exécution de l'algorithme est inférieur à 13 (mn) pour toutes les configurations étudiées, où les paramètres affectant ce temps sont:

- Les caractéristiques de l'ordinateur (Processeur, RAM).
- Efficacité et rapidité des programmes de calcul.
- Nombre de configurations possibles.
- La capacité de stockage du rack a étudié.
- Le calcul du temps moyen de déstockage (A_1) car une séquence de 100 000 opérations de déstockage a été effectuée pour chaque configuration possible.

4.2.2 Optimisation discrète (méthode exacte de résolution)

Concernant la deuxième méthode d'optimisation, nous avons formulé le problème comme un problème d'optimisation non linéaire en nombres entiers (PNLNE). Où, la fonction objectif à minimiser est la fonction non linéaire du temps moyen de déstockage $E(T'_g)$.

Rappelons l'équation du temps moyen de déstockage, développée au chapitre 3 est :

$$E(T'_g) = \frac{2}{3} C \sqrt{H} + \frac{1}{2 v_c} L \quad (3.22)$$

Nous allons introduire les variables suivantes :

m Nombre de casiers par ligne

n Nombre de casiers par colonne

q Nombre de couches ; c'est-à-dire le nombre d'emplacements d'un casier

Minimiser l'expression (3.22), sous contraintes, revient à résoudre le problème d'optimisation suivant :

$$\text{Min } \frac{2}{3} C \sqrt{H} + \frac{1}{2 v_c} L \quad (4.1)$$

Rappelons que : $m = L/l$, $n = H/h$, $q = D/d$, donc :

$$\text{Min } \frac{1}{2 v_c} m + \frac{2}{3} C \sqrt{n} \quad (4.2)$$

$$\text{Sous les contraintes : } \begin{cases} m \leq N_{LA} \\ n \leq N_{CA} \\ q \leq M_A \\ m * n * q \geq N \\ m, n \text{ et } q \text{ sont des nombres entiers} \end{cases} \quad (4.3)$$

Les trois premières équations du système (4.3) représentent les contraintes liées au nombre des casiers admissibles du rack. La quatrième contrainte est liée à la capacité admissible du rack. La cinquième contrainte assure que les variables de décision (m, n et q) sont des entiers, car c'est un problème d'optimisation discrète.

Nous proposons un organigramme qui montre les différentes parties du modèle d'optimisation discrète. Comme le montre la figure 4.3, le modèle évolue selon les phases suivantes:

- Initialisation des paramètres système tels que : la capacité de stockage (N), les dimensions admissibles du rack (L_A, H_A, D_A), les dimensions d'un emplacement de stockage (l, h, d) et la vitesse du convoyeur de transport (V_c).
- Détermination des dimensions optimales (m, n, q) qui sont notés (N_{Lo}, N_{Co}, M_o) respectivement. Où : $N_{Lo} = L_o/l, N_{Co} = H_o/h, M_o = D_o/d$.

Résultats et interprétations

Le problème d'optimisation discrète est résolu en utilisant le solveur GRG (Generalized Reduced Gradient), nous avons utilisé le solveur GRG car le modèle optimisé est un problème non linéaire en nombre entier.

Gradient Réduit Généralisé (GRG)

La méthode du G.R.G, en Anglais Generalized Reduced Gradient est un algorithme pour la résolution des problèmes d'optimisation avec des contraintes non linéaires, cet algorithme disponible dans le solveur d'Excel.

Il est sur l'idée de l'élimination des variables en utilisant les contraintes d'égalité. L'idée du gradient réduit généralisé est de convertir le problème avec contrainte en un problème sans contrainte en utilisant la substitution directe. Le GRG ajuste les variables pour que les contraintes actives continuent à être satisfaites lorsque la procédure se déplace d'un point à un autre.

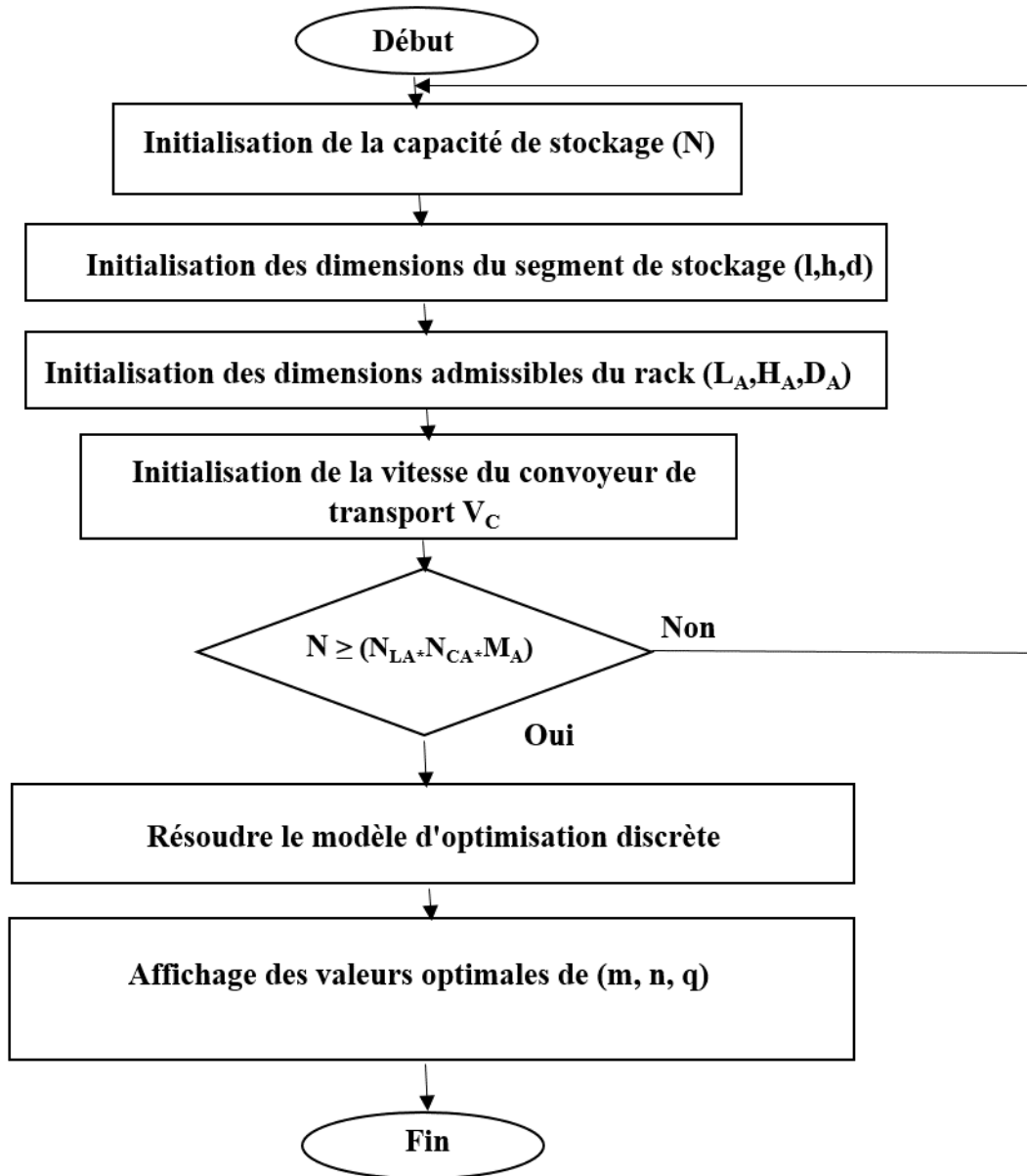


Figure 4.3. Organigramme d'algorithme d'optimisation discrète.

Pour illustrer la procédure d'optimisation, le tableau 4.2 présente les résultats d'optimisation de 20 capacités de stockage. Les colonnes 2, 3 et 4 de ce tableau représentent la capacité de stockage étudiée (N), les dimensions admissibles (L_A, H_A, D_A) et la configuration optimale (N_{L_o}, N_{C_o}, M_o), respectivement. Alors que les colonnes 5 et 6 représentent les dimensions optimales (L_o, H_o, D_o) et leur temps moyen de déstockage correspondant $E(T'_g)$, respectivement.

Tableau 4.3. Configurations optimales pour différentes capacités de stockage

	N	Les dimensions admissibles (m)			La configuration optimale			Les dimensions optimales (m)			$E(T'_g)$
		L_A	H_A	D_A	N_{Lo}	N_{Co}	M_o	L_o	H_o	D_o	
1	400	2	1	0.6	8	10	5	1.2	1	0.5	0.501016
2	500				10	10	5	1.5	1	0.5	0.551016
3	600				10	10	6	1.5	1	0.6	0.551016
4	900	4	1.5	0.8	10	15	6	1.5	1.5	0.6	0.618668
5	1000				20	10	5	3	1	0.5	0.801016
6	1200				10	15	8	1.5	1.5	0.8	0.618668
7	1400				20	10	7	3	1	0.7	0.801016
8	1800	6	2	1	9	20	10	1.35	2	1	0.650701
9	2000				10	20	10	1.5	2	1	0.675701
10	2500				25	10	10	3.75	1	1	0.926016
11	3000				15	20	10	2.25	2	1	0.800701
12	4000				20	20	10	3	2	1	0.925701
13	5000	8	2.5	1.2	20	25	10	3	2.5	1	0.975948
14	6000				20	25	12	3	2.5	1.2	0.975948
15	7000				28	25	10	4.2	2.5	1	1.175948
16	8000				32	25	10	4.8	2.5	1	1.275948
17	10000	15	3	1.5	40	25	10	6	2.5	1	1.475948
18	21000				50	28	15	7.5	2.8	1.5	1.753696
19	24000				64	25	15	9.6	2.5	1.5	2.075948
20	27000				60	30	15	9	3	1.5	2.021375

L'analyse des résultats nous a permis de faire les remarques suivantes :

- Le rack optimal n'est pas cubique en temps.
- Le modèle d'optimisation tend généralement à choisir la profondeur maximale possible, ensuite la hauteur et la longueur du rack.
- Le temps de l'exécution de l'algorithme est très court (quelques secondes).

4.3 Comparaison entre les deux méthodes de résolution

Les résultats fournis par la technique d'énumération sont exacts mais cette technique reste non pratique car elle conduit à une explosion combinatoire et nécessite un temps de calcul un peu élevé (cas des systèmes à grande capacité de stockage). Par contre, la méthode d'optimisation discrète donne des résultats exacts avec des temps de calcul raisonnables, en plus elle est adaptée pour toutes les tailles du système.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la détermination de la configuration optimale d'un flow-rack AS/RS à chute libre en vue de minimiser le temps moyen de déstockage.

Nous avons utilisé deux méthodes (techniques d'énumération et optimisation discrète) pour la résolution du problème d'optimisation. Les deux méthodes donnent des résultats exacts, mais l'optimisation discrète reste plus rapide et pratique par rapport à la technique d'énumération surtout pour les systèmes de grande taille.

Les résultats pour différentes capacités de stockage montrent que la configuration optimale du rack n'est pas cubique en temps (c'est-à-dire que le temps de déplacement sur la largeur, la hauteur et la profondeur du rack ne sont pas égaux). De plus, le modèle d'optimisation tend généralement à choisir la profondeur maximale possible, ensuite la hauteur et la largeur du rack.

L'optimisation constitue un outil d'aide à la décision indispensable pendant la phase de conception des AS/RS, en fournissant la configuration optimale permettant d'améliorer les performances d'un AS/RS.

Conclusion générale

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés aux systèmes automatisés de stockage/déstockage (AS/RS). Nous avons étudié le flow-rack AS/RS à chute libre. Ce type d'AS/RS, n'a jamais été étudié, le FF-flow-rack AS/RS est utilisé en particulier dans la dispensation des médicaments, il permet de :

- L'élimination des mouvements d'aller-retour des pharmaciens (de 2 à 3 heures par jour).
- La réduction de la taille des files d'attente en officine, ce qui laisse plus de temps pour les pharmaciens de conseiller leurs clients.
- La réduction du temps d'attente des clients.
- La réduction des erreurs de distribution.
- La possibilité de déstockage simultané de plusieurs produits.

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse peuvent être récapitulés comme suit :

- La présentation générale et état de l'art sur les systèmes automatisés de stockage/déstockage.
- La présentation du flow-rack AS/RS à chute libre, et sa comparaison avec le flow-rack classique et la dispensation manuelle des médicaments.
- La modélisation mathématique du temps moyen de déstockage dans le FF-flow-rack AS/RS.
- La validation du modèle proposé par la simulation.
- L'optimisation des dimensions du rack.

La majorité de ces travaux ont fait l'objet de publications et communications internationales.

L'objectif de ce travail est la modélisation mathématique du temps moyen de déstockage d'un flow-rack AS/RS à chute libre dans le but d'évaluer ses performances.

Pour cela, nous avons commencé par une introduction générale sur les systèmes automatisés de stockage/déstockage (définition, composition, fonctionnement, et avantages/inconvénients), suivi par un état de l'art sur les différentes recherches sur le domaine d'AS/RS.

Une première étude comparative entre le flow-rack AS/RS à chute libre et le flow-rack AS/RS classique a été menée, nous avons trouvé que le FF-flow-rack AS/RS offre une réduction de 40% du temps moyen de déstockage pour une commande à un produit, en outre elle peut avoisiner 92% si on prend en considération la possibilité du déstockage simultané de plusieurs produits.

La deuxième étude sert à l'évaluation du temps total de livraison d'une ordonnance par la dispensation manuelle (à l'aide d'un opérateur) et la dispensation automatisée (à l'aide du FF flow-rack AS/RS). Les résultats de comparaisons montrent une réduction significative du temps total de livraison d'une ordonnance qui peut atteindre 95% pour les scénarios étudiés.

La troisième étude a porté sur la modélisation mathématique du temps moyen de déstockage par une approche continue. L'expression analytique développée a été validé par un modèle de simulation, où l'écart maximal entre ces deux modèles est de 5%, ce qui montre l'exactitude du modèle proposé (continu).

Enfin, nous nous sommes intéressés à l'optimisation des dimensions du rack, dans le but de minimiser le temps moyen de déstockage d'un flow-rack AS/RS à chute libre, en se servant de l'expression du temps moyen de déstockage comme fonction objective.

Nous avons utilisé deux méthodes (techniques d'énumération et optimisation discrète) pour la résolution du problème d'optimisation. Les deux méthodes donnent des résultats exacts, mais l'optimisation discrète reste plus rapide et pratique par rapport à la technique d'énumération surtout pour les systèmes de grande taille.

Le travail réalisé ouvre la voie à plusieurs perspectives de recherche, que nous listons brièvement ci-dessous :

- Application d'une politique de stockage par classe afin de réduire le temps moyen de déstockage, cela suppose la connaissance des taux de demandes des différents produits. Ces informations peuvent être extraites de l'historique des demandes sur une période donnée.
- Évaluation du temps moyen de déstockage pour différentes locations de la station de livraison.

Références Bibliographiques

- Abdel-Malek, L., Tang, C., 1994. A heuristic for cyclic stochastic sequencing of tasks on a drum-like storage system. *Computers & Operations Research* 21 (4), 385–396.
- Amato, F., Basile, F., Carbone, C., & Chiacchio, P. (2005). An approach to control automated warehouse systems. *Control Engineering Practice*, 13(10), 1223-1241.
- Ascheuer, N., Grotschel, M., Abdel-Hamid, A.A.A., 1999. Order picking in an automatic warehouse: Solving online asymmetric TSPs. *Mathematical Methods of Operations Research* 49, 501–515.
- Ashayeri, J., Gelders, L., & WASSENHOVE, L. V. (1985). A microcomputer-based optimization model for the design of automated are houses. *International Journal of Production Research*, 23(4), 825-839.
- Ashayeri, J., Heuts, R.M., Valkenburg, M.W.T., Veraart, H.C., and Wilhelm, M.R. 2002 «A geometrical approach to computing expected cycle times for zone-based storage layouts in AS/RS» *International Journal of Production Research* 40(17), 4467-4483.
- Ashayeri, J., Heuts, R.M., Valkenburg, M.W.T., Veraart, H.C., and Wilhelm, M.R. 2002 «A geometrical approach to computing expected cycle times for zone-based storage layouts in AS/RS» *International Journal of Production Research* 40(17), 4467-4483.
- Askin, R.G. & Standridge, C.R. (1993). *Modeling and Analysis of Manufacturing Systems*, (John Wiley & Sons, Ed.).
- Azzi, A., Battini, D., Faccio, M., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2011). Innovative travel time model for dual-shuttle automated storage/retrieval systems. *Computers & Industrial Engineering*, 61(3), 600-607.
- Bafna, K., & Reed, R. (1972). ANALYTICAL APPROACH TO DESIGN OF HIGH-RISE STACKER CRANE WAREHOUSE SYSTEMS.
- Bassan, Y., Roll, Y., and Rosenblatt, M.J. 1980 «Internal layout design of a warehouse» *AIIE Transactions* 12(4), 317-322.
- Bessenouci, H.N., Sari,Z., Ghomri, L. 2010. «Metaheuristic based control of a flow-rack automated storage retrieval system», *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23 (4), 1157-1166.

- Bozer, Y.A., and White, J.A. 1984 «Travel-time models for automated storage /retrieval systems», IIE Transactions 16(4), 329-338.
- Bozer, Y.A., Schorn, E.C., and Sharp, G.P. 1990 «Geometric approaches to solve the chebyshev traveling salesman problem» IIE Transactions 22(3), 238-254.
- Bozer YA, White JA 1996 «A generalized design and performance analysis model for endof- aisle order-picking systems» IIE Trans 28(4):271–280.
- Cardin, O., Castagna, P., Sari, Z., & Meghelli, N. (2012). Performance evaluation of in-deep class storage for flow-rack AS/RS. *International Journal of Production Research*, 50(23), 6775-6791.
- Caron, F., Marchet, G., and Perego, A. 1998 «Routing policies and COI-based storage policies in picker-to-part systems» *International Journal of Production Research* 36(3), 713- 732.
- Caron, F., Marchet, G., and Perego, A. 2000 «Layout design in manual picking system: a simulation approach» *Integrated Manufacturing Systems* 11(2), 94-104.
- Chang, S.H., and Egbelu, P.J. 1997 «Relative pre-positioning of storage/retrieval machines in automated storage/retrieval systems to minimize maximum system response time» IIE Transactions 29(4), 303-312.
- Chang, D.T., Wen, U.P., Lin, J.T., 1995. The impact of acceleration/deceleration on travel-time models for automated storage/retrieval systems. *IIE Transactions* 27 (1), 108–111.
- Chang, S.H., and Egbelu, P.J. 1997 «Relative pre-positioning of storage /retrieval machines in automated storage/retrieval systems to minimize expected system response time», *IIE Transactions* 29(4), 313-322.
- Chang, D.T., Wen, U.P., 1997. The impact on rack configuration on the speed profile of the storage and retrieval machine. *IIE Transactions* 29, 525–531.
- Chen, Z., Li, X., & Gupta, J. N. (2016). Sequencing the storages and retrievals for flow-rack automated storage and retrieval systems with duration-of-stay storage policy. *International Journal of Production Research*, 54(4), 984-998.
- Chew, E.P., and Tang, L.C. 1999 «Travel time analysis for general item location assignment in a rectangular warehouse» *European Journal of Operational Research* 112, 582-597.

- Chiadamrong, N., & Piyathanavong, V. (2017). Optimal design of supply chain network under uncertainty environment using hybrid analytical and simulation modeling approach. *Journal of Industrial Engineering International*, 1-14.
- Chiang, F.C., Wen, U.P., Lin, J.T., Chang, D.T., 1994. Travel time estimation for the order picking problem in automated warehousing systems. *Journal of the Chinese Institute of Engineers* 17 (2), 205– 211.
- Chung, E., & Lee, H. F. (2008). A genetic algorithm for the generalised sequencing problem for automated storage and retrieval systems. *International Journal of Services Operations and Informatics*, 3(1), 90-106.
- De Koster MBM, Le-Duc T, Yugang Y 2006 «Optimal storage rack design for a 3-dimensional compact AS/RS» *Int J Prod Res* 46(6):1495–1514.
- De Puy, G. W. (2007). Multiple shuttle ASRS systems with acceleration/deceleration considerations. White Paper of Department of Industrial Engineering, University of Louisville.
- Derks, R. P. (1993). Purpose-driven product and process design. *Industrial engineering*, 25(1), 38.
- Dotoli, M., & Fanti, M. P. (2005). A coloured Petri net model for automated storage and retrieval systems serviced by rail-guided vehicles: a control perspective. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 18(2-3), 122-136.
- Eben-Chaïme, M. (1992). Operations sequencing in automated warehousing systems. *The International Journal Of Production Research*, 30(10), 2401-2409.
- Eben-Chaïme, M., Pliskin, N., 1997. Operations management of multiple machine automatic warehousing systems. *International Journal of Production Economics* 51, 83–98.
- Egbelu, P.J., and Wu, C.-T. 1993 «A comparison of dwell point rules in an automated storage/retrieval system» *International Journal of Production Research* 31(11), 2515-2530.
- 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), 17- 37.
- Ekren, B. Y., Heragu, S. S., Krishnamurthy, A., & Malmborg, C. J. (2010). Simulation based experimental design to identify factors affecting performance of AVS/RS. *Computers & Industrial Engineering*, 58(1), 175-185.

- Eldemir, F., Graves, R.J., and 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), 4767–4783.
- Elsayed, E. A., Lee, M. K., Kim, S., & Scherer, E. (1993). Sequencing and batching procedures for minimizing earliness and tardiness penalty of order retrievals. *The International Journal of Production Research*, 31(3), 727-738.
- Elsayed, E.A., Unal, O.I., 1989. Order batching algorithms and travel time estimation for automated storage/retrieval systems. *International Journal of Production Research* 27 (7), 1097–1114.
- Eynan A, Rosenblatt MJ (1994) Establishing zones in single command class-based rectangular AS/RS. *IIE Trans* 26(1):3–46.
- Eynan, A., Rosenblatt, M.J., 1994. Establishing zones in single command class-based rectangular AS/RS. *IIE Transactions* 26 (1), 38–46.
- Eynan, A., & Rosenblatt, M. J. (1993). An interleaving policy in automated storage/retrieval systems. *THE INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 31(1), 1-18.
- F.E.M. (2001) Federation Européenne de la Manutention, Section IX, Series Lifting Equipment, Normativa FEM 9851: Performance Data of S/R Machines Cycle Times. 02.2001 (E).
- 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), 1–17.
- Foley et Frazelle. (1991) Foley, R.D., Frazelle, E.H., 1991. Analytical results for miniload throughput and the distribution of dual command travel time. *IIE Transactions* 23 (3), 273–281.
- Gagliardi, J. P., Renaud, J., & Ruiz, A. (2015). Sequencing approaches for multiple-aisle automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 53(19), 5873-5883.
- Gouar, N., Sari, Z., and Ghouali, N., 2005, Développement d’une heuristique de stockage/de’stockage pour un système AS/R à convoyeur gravitationnel. In: 6e Congrès international de génie industriel (GI’2005), 7–10 Juin 2005, Besançon Micropolis, France.

- Gaouar, N., Sari, Z., and Ghouali, N., 2006, Modélisation et implémentation d'une heuristique de stockage/de-stockage pour un système AS/R à convoyeur gravitationnel. In: 6^e conférence francophone de modélisation et simulation (MOSIM'06), 3–5 Avril 2006, Rabat, Maroc.
- Gaouar, N. (2004). Amélioration des performances d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel (Doctoral dissertation, Thèse de magister, Université de Tlemcen Algérie).
- Ghomri L., Sari Z., Guezzan A.H., Sari T. 2008 «Modèle analytique du temps de simple cycle d'un AS/RS multi allées» conférence internationale de modélisation et simulation, Paris.
- Glock, C. H., & Grosse, E. H. (2012). Storage policies and order picking strategies in U-shaped order-picking systems with a movable base. *International Journal of Production Research*, 50(16), 4344–4357.
- Goetschalckx, M., and Ratli., H.D. 1990 «Shared storage policies based on the duration stay of unit loads» *Management Science* 36(9), 1120-1132.
- Goetschalckx, M., Ratliff, H.D., 1988. Sequencing picking operations in a man-aboard order picking system. *Material Flow* 4, 255–263.
- Graves, S.C., Hausman, W.H., and Schwarz, L.B. 1977 «Storage-retrieval interleaving in automatic warehousing systems» *Management Science* 23(9), 935-945.
- Guenov, M., and 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(1), 37-47.
- Guenov, M., Raeside, R., 1992. Zone shapes in class based storage and multi command order picking when storage/retrieval machines are used. *European Journal of Operational Research* 58, 37–47.
- Guezzan A.H. Sari Z. 2014 «An analysis of single-command operations in a mobile rack (as/rs) served by a single order picker» IMRHC'14 USA.
- Guezzan A.H. Sari Z., Ghomri L. 2011a «A Study on Mobil Racks Automated Storage and Retrieval System (M-AS/RS) » conference CCCA'11, Hammamet.
- Guezzan A.H. Sari Z., Ghomri L. 2011b «Continuous Model for Single Cycle Times of a Mobile Racks Automated Storage and Retrieval System» conference MISC' 11.

- Ha, J.W., and Hwang, H. 1994 «Class-based storage assignment policy in carousel system»
*Computers & Industrial Engineering*26(3), 489-499.
- Hachemi, K., & Alla, H. (2008). Pilotage dynamique d'un système automatisé de stockage/déstockage à convoyeur gravitationnel. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, 42(5/2008), 487-508.
- Hackman, S. T., Rosenblatt, M. J., & Olin, J. M. (1990). Allocating items to an automated storage and retrieval system. *IIE transactions*, 22(1), 7-14.
- Hale, T. S., Hanna, M. E., Huq, F., & Gil, A. (2015). Closed form models for dwell point locations in a multi-aisle automated storage and retrieval system. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 19(3), 364-388.
- Hale, T., Hanna, M. and Huq, F. (2009a) 'The generalised dwell point location problem', *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, Vol. 4, No. 4, pp.446–454.
- Hale, T.S., Huq, F. and Pujari, N.A. (2008) 'Closed form models for dwell point locations in automated storage carousel systems', *International Journal of Production Research*, Vol. 46, No. 4, pp.1089–1098.
- Hale, T.S., Huq, F., Blackhurst, J. and Cutright, K. (2009b) 'Closed form models for dwell point locations for overhead bridge cranes', *International Journal of Operational Research*, Vol. 4, No. 4, pp.412–421.
- Hamzaoui, M. A., & Sari, Z. (2015). Optimal dimensions minimizing expected travel time of a single machine flow rack AS/RS. *Mechatronics*,31, 158-168.
- Han et al. (1987) 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.
- Han, M.H., McGinnis, L.F., White, J.A., 1988. Analysis of rotary rack operation. *Material Flow* 4, 283–293.
- 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.
- 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), 629–638.
- Heskett (1964)Heskett, J.L. 1964 «Putting the cube-per-order index to work in warehouse layout» *Transportation and Distribution Management* 4(8), 23-30.
- Homayouni, S. M., Tang, S. H., & Motlagh, O. (2014). A genetic algorithm for optimization of integrated scheduling of cranes, vehicles, and storage platforms at automated container terminals. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 270, 545-556.
- Hu, Y.H., Huang, S.Y., Chen, C., Hsu, W.J., Toh, A.C., Loh, C.K., and Song, T. 2005 «Travel time analysis of a new automated storage and retrieval system» *Computers & Operations Research* 32(6), 1515-1544.
- Hu, Y. H., Huang, S. Y., Chen, C., Hsu, W. J., Toh, A. C., Loh, C. K., & Song, T. (2005). Travel time analysis of a new automated storage and retrieval system. *Computers & Operations Research*, 32(6), 1515-1544.
- Hwang, H., and 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), 2591-2602.
- Hwang, H., Ha, J.W., 1991. Cycle time models for single/double carousel system. *International Journal of Production Economics* 25, 129–140.
- Hwang, H., & KO, C. S. (1988). A study on multi-aisle system served by a single storage/retrieval machine. *The International Journal Of Production Research*, 26(11), 1727-1737.
- Hwang, H., Lee, S.B., 1990. Travel-time models considering the operating characteristics of the storage and retrieval machine. *International Journal of Production Research* 28 (10), 1779–1789.
- Hwang, H., & KO, C. S. (1988). A study on multi-aisle system served by a single storage/retrieval machine. *The International Journal Of Production Research*, 26(11), 1727-1737.
- 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(2), 249-258.
- Inman, R. R. (2003). ASRS sizing for recreating automotive assembly sequences. *International Journal of Production Research*, 41(5), 847-863.

- Jarvis, J.M., and McDowell, E.D. 1991 «Optimal product layout in an order picking warehouse» IIE Transactions 23(1), 93-102.
- Jawahar, N., Aravindan, P., & Ponnambalam, S. G. (1998). Optimal random storage allocation for an AS/RS in an FMS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14(2), 116-132.
- Karasawa, Y., Nakayama, H., & Dohi, S. (1980). Trade-off analysis for optimal design of automated warehouses. *International Journal of Systems Science*, 11(5), 567-576.
- Keserla, A., Peters, B.A., 1994. Analysis of dual-shuttle automated storage/retrieval systems. *Journal of Manufacturing Systems* 13 (6), 424-434.
- Keserla, A., & Peters, B. A. (1994). Analysis of dual-shuttle automated storage/retrieval systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 13(6), 424-434.
- 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), 601-612.
- Koenig, J. (1980). DESIGN AND MODEL THE TOTAL SYSTEM. 3. ASPECTS OF SYSTEM-DESIGN. *Industrial Engineering*, 12(10), 22.
- Kouloughli, S., Sari, Z., and Sari, T. 2009 “Optimisation des dimensions d’un AS/RS multi allées pour un temps de double cycle minimal ». Acte des 6e conférence internationale de conception et production intégréeCPI’09, Fès, 19-21.
- Kouloughli, S., & Sari, Z. (2015). Multi-aisle AS/RS dimensions optimization for cycle time minimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79(1-4), 675-692.
- Kouloughli, S., Sari, Z., Sari, T., 2010 «Optimisation des dimensions d’un AS/RS multi allées basée sur un modèle analytique du temps de simple cycle» *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, vol.44 n°.2, p. 135-160.
- Kouloughli, S., Sari, Z. 2011 «Optimisation de deux dimensions d’un AS/RS multi allées en fixant la troisième pour minimiser le temps de cycle» Acte des 7ème conférence internationale de conception et production intégréeCPI’11. Hammamet.

- 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), 2889–2905.
- Kouvelis P, Papanicolaou V (1995) Expected travel time and optimal boundary formulas for a two-class-based automated storage/retrieval system. *Int J Prod Res* 33(10):2889–2905.
- Kovács, A. (2011). Optimizing the storage assignment in a warehouse served by milkrun logistics. *International Journal of Production Economics*, 133(1), 312–318.
- 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, 932–940.
- Kuo P-H, Krishnamurthy A, Malmberg CJ 2007 «Design models for unit load storage and retrieval systems using autonomous vehicle technology and resource conserving storage and dwell-point policies» *Appl Math Model* 31(10):2332–2346.
- Kuo, R. J., Kuo, P. H., Chen, Y. R., & Zulvia, F. E. (2016). Application of metaheuristics-based clustering algorithm to item assignment in a synchronized zone order picking system. *Applied Soft Computing*, 46, 143-150.
- Le-Duc T, De Koster MBM, Yugang Y 2006 «Optimal storage rack design for a 3-dimensional compact AS/RS» ERIM report series research in management.
- Lee, H.F., and Schaefer, S.K. 1996 «Retrieval sequencing for unit-load automated storage and retrieval systems with multiple openings» *International Journal of Production Research* 34(10), 2943-2962.
- 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), 2943-2962.
- 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), 3331-3348.
- Lee, S. G., De Souza, R., & Ong, E. K. (1996). Simulation modelling of a narrow aisle automated storage and retrieval system (AS/RS) serviced by rail-guided vehicles. *Computers in Industry*, 30(3), 241-253.

- Lee, Y., & Lee, M. H. (2000). An automated storage/retrieval system with modularized cells. *Annals DAAAM*, 11(6), 269-270.
- Lerher, T., Potrč, 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(3), 571-583.
- Lerher T., Sraml M., Kramberger J., Potrc I., Borovinsek M., and Zmazek B. 2005 «Analytical travel time models for multi aisle automated storage and retrieval systems» *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 30, n° 3, p. 340-356.
- 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), 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), 735–756.
- Mahajan, S., Rao, B. V., & Peters, B. A. (1998). A retrieval sequencing heuristic for miniload end-of-aisle automated storage/retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 36(6), 1715-1731.
- Malmberg, C. J. (2000). Interleaving models for the analysis of twin shuttle automated storage and retrieval systems. *International journal of production research*, 38(18), 4599-4610.
- Malmberg, 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), 511-527.
- Malmberg, 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), 511-527.
- Malmberg, C.J., 2002. Conceptualizing tools for autonomous vehicle storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 40 (8), 1807–1822.
- Manzini, R. (2006). Correlated storage assignment in an order picking system. *international journal of industrial engineering-theory applications and practice*, 13(4), 384-394.

- Manzini, R., Accorsi, R., Baruffaldi, G., Cennerazzo, T., & Gamberi, M. (2016). Travel time models for deep-lane unit-load autonomous vehicle storage and retrieval system (AVS/RS). *International Journal of Production Research*, 1-19.
- Marchet, G., Melacini, M., Perotti, S., & Tappia, E. (2012). Analytical model to estimate performances of autonomous vehicle storage and retrieval systems for product totes. *International Journal of Production Research*, 50(24), 7134-7148.
- Meller, R.D., and Mungwattana, A. 2005 «AS/RS dwell-point strategy selection at high system utilization: a simulation study to investigate the magnitude of the benefit» *International Journal of Production Research* 43(24), 5217-5227.
- Meller, R. D., & Mungwattana, A. (1997). Multi-shuttle automated storage/retrieval systems. *IIE Transactions*, 29, 925–938.
- Meller, R. D., & Mungwattana, A. (1997). Multi-shuttle automated storage/retrieval systems. *IIE transactions*, 29(10), 925-938.
- Metahri, D., & Hachemi, K. (2017a). Automated storage and retrieval systems: A performances comparison between Free-fall-flow-rack and classic flow-rack. In *Systems and Control (ICSC), 2017 6th International Conference on* (pp. 589-594). IEEE.
- Metahri, d., & hachemi, K. (2017b). drug distribution: evaluation of prescription drug delivery time of manual and automated distribution. (SEHA2017) *The Second International Seminar in Engineering, Health and Analysis*
- Metahri, D., & Hachemi, K. (2017c). Optimization of free-fall-flow-rack automated storage and retrieval system dimensions. In *Embedded & Distributed Systems (EDiS), 2017 First International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.
- Metahri, D., & Hachemi, K. (2018a). Retrieval–travel-time model for free-fall-flow-rack automated storage and retrieval system. *Journal of Industrial Engineering International*, 1-14.
- Metahri, D., & Hachemi, K. (2018b). “Discrete Optimisation Model of Free-Fall-Flow-Rack Automated Storage and Retrieval System Dimensions”.
- Muppani, V. R., & Adil, G. K. (2008a). A branch and bound algorithm for class based storage location assignment. *European Journal of Operational Research*, 189,492–507.

- Muppani, V. R., & Adil, G. K. (2008a). A branch and bound algorithm for class based storage location assignment. *European Journal of Operational Research*, 189,492–507.
- Muppani, V. R., & Adil, G. K. (2008b). Efficient formation of storage classes for warehouse storage location assignment: Simulated annealing approach. *Omega*,36, 609–618.
- Ouhoud, A., Guezzen, A., & Sari, Z. (2016). Experimental Validation of Travel Time Models for Multi Aisle Automated Storage and Retrieval System in Class-Based Storage. *Electrotehnica, Electronica, Automatica*, 64(1), 150.
- Ouhoud, A., Guezzen, A., & Sari, Z. (2015). Experimental Validation of Travel Time Models for Multi Aisle Automated Storage and Retrieval System in Class-Based Storage. *Electrotehnica, Electronica, Automatica*, 64(1), 150.
- Park, B.C. 1999 «Optimal dwell point policies for automated storage/retrieval systems with dedicated storage» *IIE Transactions* 31, 1011-1013.
- Park, B.C. 2001 «An optimal dwell point policy 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, 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, 144–155.
- Park, B.C., 1991. Analytical models and optimal strategies for automated storage/retrieval system operations. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.
- Park, Y. H., & Webster, D. B. (1989). Modelling of three-dimensional warehouse systems. the international journal of production research, 27(6), 985-1003.
- Park, Y. H., & Webster, D. B. (1989). Modelling of three-dimensional warehouse systems. the international journal of production research, 27(6), 985-1003.
- Park, B.C., 2008. Performance of carousel systems with remote picking stations. *Progress in Material Handling Research: 2008*. Material Handling Institute, Charlotte, NC, 458–466
- Pazour, J. A., & Meller, R. D. (2013). The impact of batch retrievals on throughput performance of a carousel system serviced by a storage and retrieval machine. *International Journal of Production Economics*, 142(2), 332-342.

- Perry, R. F., Hoover, S. V., & Freeman, D. R. (1984, January). An optimum-seeking approach to the design of automated storage/retrieval systems. In Proceedings of the 16th conference on Winter simulation (pp. 348-354). IEEE Press.
- Peters BA, Smith JS, Hale TS 1996 «Closed form models for determining the optimal dwell point location in automated storage and retrieval systems» *Int J Prod Res* 34(6):1757–1772.
- Petersen, C. G., & Gerald, A. (2004). A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking. *International Journal of Production Economics*, 92, 11–19.
- Pohjalainen, A. (2015). Control Policies of an Automated Storage and Retrieval System.
- Popović, D., Vidović, M., & Bjelić, N. (2014). Application of genetic algorithms for sequencing of AS/RS with a triple-shuttle module in class-based storage. *Flexible services and manufacturing journal*, 26(3), 432-453.
- Potrc I, Lerher T, Kramberger J, Sraml M 2004 «Simulation model of multi-shuttle automated storage and retrieval systems» *J Mater Process Tech* 157-158:236-244.
- Raghunath S, Perry R, Cullinane T 1986 «Interactive simulation modeling of automated storage retrieval systems» Washington DC, ACM, New York, pp 613-620.
- Randhawa SU, Shroff R 1995«Simulation-based design evaluation of unit load automated storage/retrieval systems» *Comput Ind Eng* 28(1):71-79.
- Randhawa SU, McDowell ED, Wang W-T 1991 «Evaluation of scheduling rules for single- and dual-dock automated storage/retrieval system» *Comput Ind Eng* 20(4):401-410.
- Randhawa, S. U., & Shroff, R. (1995). Simulation-based design evaluation of unit load automated storage/retrieval systems. *Computers & Industrial Engineering*, 28(1), 71-79.
- Rao, M. S., & Naikan, V. N. A. (2014). Reliability analysis of repairable systems using system dynamics modeling and simulation. *Journal of Industrial Engineering International*, 10(3), 69.
- Rashid, M. M., Kasemi, B., & Rahman, M. (2011, May). New Automated Storage and Retrieval System (ASRS) using wireless communications. In *Mechatronics (ICOM)*, 2011 4th International Conference On (pp. 1-7). IEEE.
- ROBERT TERRY, W., RAO, H. G., & SON, J. Y. (1988). Application of a computer-based approach to designing real-time control software for an integrated robotic assembly and

- automated storage/retrieval system. *The International Journal Of Production Research*, 26(10), 1593-1604.
- Roberts, S. D., & Reed Jr, R. (1972). Optimal warehouse bay configurations. *AIIE Transactions*, 4(3), 178-185.
- Rosenblatt et Eynan. (1989) Rosenblatt, M.J., Eynan, A., 1989. Deriving the optimal boundaries for class-based automatic storage/retrieval systems. *Management Science* 35 (12), 1519–1524.
- Rosenblatt MJ, Eynan A (1989) Deriving the optimal boundaries for class-based automatic storage/retrieval systems. *Manag Sci* 35(12):1519–1524.
- Rosenblatt, M. J., & Roll, Y. (1984). Warehouse design with storage policy considerations. *The International Journal of Production Research*, 22(5), 809-821.
- Rosenblatt, M. J., Roll, Y., & Vered Zyser, D. (1993). A combined optimization and simulation approach for designing automated storage/retrieval systems. *IIE transactions*, 25(1), 40-50.
- Rosenblatt, M.J., Roll, Y., Zyser, V., 1993. A combined optimization and simulation approach for designing automated storage/retrieval systems. *IIE Transactions* 25 (1), 40–50.
- Roy, D., Krishnamurthy, A., Heragu, S., & Malmborg, C. (2015). Queuing models to analyze dwell-point and cross-aisle location in autonomous vehicle-based warehouse systems. *European Journal of Operational Research*, 242(1), 72-87.
- Sari Z, Bessnoui NH. Design & modeling of a single machine flow rack AS/RS. In: *Proceeding of IMHRC2012*, Gardanne, France; 2012.
- Sari Z, Grassman S, Ghouali N. Impact of pickup/drop off stations and restoring conveyor locations on retrieval time models of flow-rack automated storage and retrieval systems. *Prod Plan Control* 2007;18(2):105–16.
- Sari Z, Saygin C, Ghouali N. Travel time models for flow-rack automated storage and retrieval systems. *Int J Adv Manuf Technol* 2005;25(9–10):979–87.
- Sari Z. (2010) Performance evaluation of flow-rack and unit load automated storage & retrieval systems. In: *Proceedings of ISTEAC*, Cyprus; 2010. p. 605–15.
- Sari. (2008) Sari Z., Expressions analytiques discrètes de simple et double cycle d'un AS/RS à rack glissant Rapport interne, LAT, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- Sarker, B.R., Sabapathy, A., Lal, A.M., Han, M.H., 1991. Performance

- Sarker, B.R., Babu, P.S., 1995. Travel time models in automated storage/ retrieval systems: A critical review. *International Journal of Production Economics* 40, 173–184.
- SARKER, B. R., MANN JR, L. A. W. R. E. N. C. E., & Leal dos Santos, J. R. (1994). Evaluation of a class-based storage scheduling technique applied to dual-shuttle automated storage and retrieval systems. *Production planning & control*, 5(5), 442-449.
- Sarker, B. R., Sabapathy, A., Lal, A. M., & Han, M. H. (1991). Performance evaluation of a double shuttle automated storage and retrieval system. *Production Planning & Control*, 2(3), 207-213.
- Seidmann, A., 1988. Intelligent control schemes for automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research* 26 (5), 931–952.
- Sharma, R. K., & Sharma, P. (2015). Qualitative and quantitative approaches to analyse reliability of a mechatronic system: a case. *Journal of Industrial Engineering International*, 11(2), 253-268.
- Tang, L.C., and Chew, E.K. 1997 «Order picking systems: batching and storage assignment strategies» *Computers & Industrial Engineering* 33(3-4), 817-820.
- Liu, T., Xu, X., Qin, H., & Lim, A. (2015). Travel time analysis of the dual command cycle in the split-platform AS/RS with I/O dwell point policy. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 1-19.
- Trevino, J., Liao, F., & Chopra, S. (1994). Cardes—carousel design. *THE INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 32(5), 1013-1026.
- Van den Berg, J.P. 1999 «A literature survey on planning and control of warehousing systems» *IIE Transactions* 31, 751-762.
- Van den Berg, J.P. 1999 «A literature survey on planning and control of warehousing systems» *IIE Transactions* 31, 751-762.
- Van den Berg et Gademann (2000) «Simulation study of an automated storage/retrieval system» *International Journal of Production Research* 38(6), 1339-1356.
- Van den berg J. P., Gademan A.J.R.M., « Optimal routing in an automated storage/retrieval system with dedicated storage ». *IIE transactions*, 31, 1999, p. 407-415.

- Van den Berg, J.P. 1996 «Multiple order pick sequencing in a carousel system: A solvable case of the rural postman problem» *Journal of the Operational Research Society* 47(12), 1504-1515.
- 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(1), 13-25.
- Van Oudheusden, D. L., & Zhu, W. (1992). Storage layout of AS/RS racks based on recurrent orders. *European journal of operational research*, 58(1), 48-56.
- Van Oudheusden, D.L., Tzen, Y.J.J., Ko, H.T., 1988. Improving storage and order picking in a person-on-board AS/R system: A case study. *Engineering Costs and Production Economics* 13, 273–283.
- Vasili MR, Tang SH, Homayouni SM, Ismail N. 2006 «Comparison of different dwell-point policies for split-platform automated storage and retrieval system» *Int J Adv Manuf Tech*3(1):91–106.
- Vasili, M., Hong, T. S., Homayouni, S. M., & Ismail, N. (2008). A statistical model for expected cycle time of SP-AS/RS: an application of Monte Carlo simulation. *Applied Artificial Intelligence*, 22(7-8), 824-840.
- Ventura, J. A., & Lee, C. (2003). Optimally locating multiple dwell points in a single loop guide path system. *IIE Transactions*, 35(8), 727-737.
- 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), 487–495.
- Wen, U.P., Chang, D., Chen, S.P., 2001. The impact of acceleration/ deceleration on travel-time models in class-based automated S/R systems. *IIE Transactions* 33, 599–608.
- West, T. M., Amundson, A. N., & Randhawa, S. U. (1993). Evaluation of alternative materials handling systems. *Computers & industrial engineering*,25(1-4), 187-190.
- WHITE Jr, K. P. (1990). *Advances in the Theory and Practice of Production Scheduling. Control and Dynamic Systems vol. 37: Advances in Industrial Systems*, 115-157.
- Xu, X., Gong, Y., Fan, X., Shen, G., & Zou, B. (2017). Travel-time model of dual-command cycles in a 3D compact AS/RS with lower mid-point I/O dwell point policy. *International Journal of Production Research*, 1-22.

- Xu, X., Shen, G., Yu, Y., & Huang, W. (2015). Travel time analysis for the double-deep dual-shuttle AS/RS. *International Journal of Production Research*, 53(3), 757-773.
- Yang, P., Miao, L., et al, 2013. An integrated optimization of location assignment and storage/retrieval scheduling in multi-shuttle automated storage/retrieval systems. *J. Intell. Manuf.*, 1–15.
- Yang, P., Miao, L., Xue, Z., & Qin, L. (2015). Optimal storage rack design for a multi-deep compact AS/RS considering the acceleration/deceleration of the storage and retrieval machine. *International Journal of Production Research*,53(3), 929-943.
- Yang, P., Miao, L., Xue, Z., & Ye, B. (2015). Variable neighborhood search heuristic for storage location assignment and storage/retrieval scheduling under shared storage in multi-shuttle automated storage/retrieval systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 79, 164-177.
- Yu, Y. and De Koster, R., 2011. Sequencing heuristics for storing and retrieving unit loads in 3D compact automated warehousing systems. *IIE Transactions*, doi: 10.1080/0740817X.2011.57544.
- Zollinger, H. A. (1975, April). Planning, evaluating and estimating storage systems. In *Proceedings of the seminar on advanced material handling*, Purdue University, West Lafayette, IN (pp. 29-30).

« Contribution à l'évaluation des performances d'un flow-rack AS/RS à chute libre »

Résumé :

Dans ce travail, nous introduisons un nouveau type de système automatisé de stockage/déstockage (AS/RS) qui est basé sur un flow-rack à chute libre utilisé pour la distribution des médicaments. Ce système est une nouvelle variation du flow-rack AS/RS classique, qui utilise un opérateur ou une seule machine S/D pour le stockage des produits, et utilise une combinaison entre le mouvement de chute libre et un convoyeur pour le déstockage.

L'objectif de cette étude est de faire une évaluation des performances de ce système. Pour ce faire, nous utilisons comme critère principal de performance le temps moyen de déstockage. Le temps moyen est calculé par une approche continue. Pour valider ce modèle, des simulations sont effectuées pour des différentes configurations, nous avons comparé les résultats obtenus par le modèle continu avec ceux données par la simulation. L'écart maximal entre ces résultats ne dépasse pas 5%, ce qui démontre l'exactitude du modèle proposé.

Nous avons comparé le FF-flow-rack AS/RS avec le flow-rack AS/RS classique et aussi avec les systèmes de distribution manuelle des médicaments, en outre nous avons présenté une étude d'optimisation des dimensions de ce système.

Mots clés : *Systèmes Automatisés de stockage/déstockage, FF-Flow-rack AS/RS, temps moyen de transport, distribution de médicaments, simulation.*

« Performance evaluation contribution of a Free-Fall flow rack AS/RS »

Abstract :

In this work we interest to the automated storage and retrieval systems. A modern automated material-handling technology for the product distribution consists of a free-fall-flow-rack automated storage and retrieval system. The free-fall-flow-rack AS/RS is a new variation of flow rack AS/RS that uses an operator or a single machine for storage operations, and uses a combination between the free-fall movement and a transport conveyor for retrieval operations. The aim of this paper is to develop an analytical model of the expected retrieval-travel-time for the free-fall flow-rack under dedicated storage assignment policy, which provides the throughput for different configurations of FF-flow-rack. In order to validate the accuracy of the proposed model, which is based on a continuous approach, we compare it with a computer simulation that is based on a discrete model, which is equivalent to the onsite experimentation. The obtained results show that the maximum deviation between the continuous model and the simulation is less than 5%, this show the reliability and application of our model in industry.

We compared the FF-flow-rack AS/RS with the conventional AS-RS flow-rack, also with the manual dispensing systems of drugs; moreover, we performed an optimization of the dimensions of this system.

Key words : *Automated Storage and Retrieval System, FF-Flow-rack AS/RS, travel time, drug distribution, simulation.*

" المساهمة في تقييم أداء رف آلي للتخزين عن طريق السقوط الحر "

الملخص:

في هذه المذكرة قمنا بدراسة الأنظمة الآلية لتخزين المنتجات حيث تم التطرق الى نظام جديد يسمى رف آلي للتخزين عن طريق السقوط الحر, والذي يعتبر بديل جديد لأنظمة التخزين الكلاسيكية, حيث يستعمل عامل أو آلة أوتوماتكية للتخزين في حين يعتمد على السقوط الحر للمنتوج أين يتم تحويله الى نقطة التفريغ عن طريق ناقل حركة.

تركز إهتمامنا على تقييم الوقت المتوقع لتفريغ كل المنتجات المخزنة في هذا النظام, لذلك تم حساب هذا الوقت عن طريق نموذج رياضي. للتحقق من صحة هذا النموذج تم إنشاء خوارزمية تحاكي طريقة عمل هذا النظام, حيث أن الفرق بين المحاكاة و النموذج الرياضي لا يتجاوز 5%, وهذا ما يبرهن صحة النموذج.

كما تم مقارنة نظام الرف الآلي للتخزين مع نظام تخزين كلاسيكي, وكذلك مع أنظمة التوزيع اليدوية. وفي الأخير تمت دراسة الأبعاد المثلى لهذا النظام بهدف ربح الوقت اللازم للتفريغ.

كلمات مفتاحية : الأنظمة الآلية للتخزين , رف آلي للتخزين عن طريق السقوط الحر , الوقت المتوقع لتفريغ المنتجات , توزيع الأدوية , المحاكاة