

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du grade de DOCTORAT 3ème Cycle

En Génie Industriel

Spécialité : Génie Industriel

Par : FANDI Wahiba

Sujet

Analyse de fonctionnement de systèmes automatisés de stockage/
déstockage (AS/RS) en se basant sur des techniques
d'intelligence artificielle.

Soutenue publiquement, le 22/03/2023, devant le jury composé de:

MIRI Sofiane	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
KOULOUGHLI Sihem	Professeur	Univ. Tlemcen	Directrice de thèse
MALIKI Fouad	MCA	ESSAT. Tlemcen	Examineur 1
BENEKROUF Mohammed	MCA	ESSAT. Tlemcen	Examineur 2
GHOMRI Latefa	Professeur	Univ. Tlemcen	Invité

Dédicace

Je dédie ce travail à ceux qui m'ont aidée à le terminer, à ceux qui attendent mon succès et à ceux qui m'ont créé le climat favorable pour bien travailler.

A ma mère, celle qui m'a arrosé de tendresse et d'espoirs, à la source d'amour intarissable, à la mer des sentiments fragiles qui ma bénie par ces prières. Puisse Dieu vous préserver et vous procurer santé et bonheur.

A mon père. Aucune dédicace ne saurait exprimer mes respects, ma reconnaissance et mon profond amour. Puisse Dieu vous préserver et vous procurer santé et bonheur.

A mon frère, qui a été toujours là pour moi. Qui m'a donné tant de courage et de soutien.

A ma sœur, qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.

A mon mari, qui n'as jamais cessé de me soutenir et de m'épauler. Aucun mot ne pourrait exprimer ma gratitude, mon amour et mon respect. Je remercie le bon Dieu qui a croisé nos chemins.

A mes petits choux d'amours Yesmine et Amir, vous êtes ma force, ma volonté, ma source d'inspiration et de bonheur. Je vous aime énormément.

A ma famille, ma belle famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A tous ceux que j'aime.

Merci !

Remerciements

Je remercie d'abord Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force, le courage et la patience pour mener à terme ce travail.

Je remercie chaleureusement toutes les personnes qui m'ont aidée pendant l'élaboration de ma thèse et bien plus encore à ceux qui l'ont rendue agréable. C'est une occasion pour moi de leur témoigner ma reconnaissance.

Notamment, je remercie ma directrice Madame KOULOUGHLI Sihem professeur à l'université Abou Bekr Belkaid. Celle à qui je me suis dirigée après avoir eu mon concours de doctorat, celle qui a accepté de m'encadrer et de m'orienter avec un grand cœur. Je la remercie pour son soutien, sa compréhension, son professionnalisme, sa disponibilité et pour les nombreux encouragements et conseils qu'elle m'a prodigués tout au long de cette thèse.

Je remercie également Madame GHOMRI Latefa, professeur à l'université Abou Bekr Belkaid, pour sa rigueur scientifique, sa gentillesse, sa disponibilité permanente, son aide et ses précieux conseils qui ont permis d'accomplir ce travail, ainsi que pour ses encouragements durant des périodes critiques et difficiles qui m'ont permis de ne jamais dévier de mon objectif final.

Enfin je remercie tous les membres du jury, d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

Table des Matières

Dédicace	ii
Remerciements	i
Table des figures	v
Liste des tableaux	viii
Introduction générale	1
1 Introduction aux systèmes automatisés de stockage/déstockage	4
1.1 Introduction	6
1.2 Définition des systèmes automatisés de stockage/ déstockage	7
1.3 Fonction d'un AS/RS	7
1.4 Composants d'un AS/RS	7
1.5 Terminologie	8
1.6 Types d'AS/RS	10
1.6.1 L' AS/RS à charge unitaire	10
1.6.2 L'AS/RS multi allées	11
1.6.3 L'AS/RS à racks glissants	12
1.6.4 L'AS/RS à mini charge ou à charge réduite	12
1.6.5 L'AS/RS à carrousel	13
1.6.6 L'AS/RS à personne embarquée	14
1.6.7 L'AS/RS à étagères profondes	14
1.6.8 L' AS/RS à convoyeurs gravitationnels	15
1.6.9 L' AVS/RS	15
1.6.10 L' SP/AS/RS	16
1.6.11 L'SBS/RS	16
1.7 Politique de stockage	17
1.8 Mesures de performances d'un AS/RS	18

1.9	Etat de l'art	19
1.9.1	Introduction	19
1.9.2	Contrôle stratégique	20
1.9.3	Contrôle opérationnel	24
1.10	Conclusion	28
2	Optimisation des dimensions de l'AS/RS multi allées	29
2.1	Introduction	31
2.2	Métaheuristiques	32
2.2.1	Algorithmes génétiques	33
2.3	Description de l'AS/RS multi allées	34
2.4	Fonctionnement de l'AS/RS multi allées	35
2.5	Modèle mathématique du temps de cycle de l'AS/RS multi allées	37
2.5.1	Notations	37
2.5.2	Hypothèses	38
2.5.3	Modèle continu du temps moyen de simple cycle de l'AS/RS multi allées	38
2.5.4	Modèle continu du temps moyen de déplacement entre deux casiers de l'AS/RS multi allées	42
2.5.5	Modèle continu du temps multi cycles de l'AS/RS multi allées	46
2.6	Détermination des trois dimensions optimales de l'AS/RS multi allées	46
2.6.1	Formulation du problème	46
2.6.2	Résolution du problème	47
2.7	Résultats et interprétations	50
2.8	Conclusion	62
3	Optimisation des dimensions de l'AS/RS à racks glissants	64
3.1	Introduction	66
3.2	Description de l'AS/RS à racks glissants	67
3.3	Fonctionnement de l'AS/RS à racks glissants	67
3.4	Modèle mathématique du temps de cycle de l'AS/RS à racks glissants	68
3.4.1	Notations	68
3.4.2	Modèle continu du temps moyen de simple cycle de l'AS/RS à racks glissants	69
3.4.3	Modèle continu du temps moyen de déplacement entre deux casiers de l'AS/RS à racks glissants	71

3.4.4	Modèle continu du temps moyen multi cycles de l'AS/RS à racks glissants	75
3.5	Détermination des dimensions optimales de l'AS/RS à racks glissants .	76
3.5.1	Formulation du problème	76
3.5.2	Résolution du problème	76
3.6	Résultats et interprétations	77
3.7	Conclusion	83
	Conclusion générale	84
	A Annexes	86
A.1	Le temps de déplacement entre deux casiers $E(TB)$ de l'AS/RS multi allées	87
A.2	Le temps de déplacement entre deux casiers $E(TB)$ de l'AS/RS à racks glissants	88
	B Bibliographie	93
	Références	94

Table des Figures

1.1 Casier de stockage	8
1.2 Colonne de casiers	8
1.3 Rangée ou rack	8
1.4 Allée	9
1.5 Machine S/R multi navettes	9
1.6 Machine S/R simple navette	9
1.7 Module de stockage	9
1.8 Station dépôt/livraison (D/L)	10
1.9 AS/RS à charge unitaire	11
1.10 ASRS multi-allées	11
1.11 AS/RS à racks glissants	12
1.12 AS/RS à mini charge	13
1.13 AS/RS à carrousel	13
1.14 AS/RS à personne embarquée	14
1.15 AS/RS à étagères profondes	14
1.16 AS/RS à convoyeurs gravitationnels	15
1.17 AVS/RS en bleu et les ascenseurs en jaune	16
1.18 SP/AS/RS	16
1.19 SBS/RS	17
2.1 Description de l'AS/RS multi allées	35
2.2 Temps de cycle quadruple	36
2.3 Représentation des notations utilisée	38
2.4 Déplacement horizontal de la machine S/R. (Ghomri et al., 2009)	39
2.5 a- Distribution discrète exacte de la variable SC_{H1} b- Distribution discrète exacte de la variable SC_{H2}	39
2.6 a- Distribution continue approchée de la variable SC_{H1} b- Distribution continue approchée de la variable SC_{H2}	40

2.7	Distribution aléatoire de la variable SC_H modélisant le déplacement horizontal de la machine S/R	41
2.8	Temps de déplacement horizontal entre deux casiers (Djellouli & Hassaine, 2008)	43
2.9	a- Distribution continue approchée de la variable X_1 b- Distribution continue approché de la variable $X_1 + X_2$	44
2.10	a- Distribution continue approchée de la variable K_1 b- Distribution continue approché de la variable $-K_2$	44
2.11	a- Distribution continue approchée de la variable $K_1 - K_2$ b- Distribution continue approché de la variable $ K_1 - K_2 $	44
2.12	Opération de croisement	49
2.13	Opération de mutation	49
2.14	Dimensions optimales t_p, t_h et t_v en fonction de k (Stockage et déstockage sur la même allée)	52
2.15	Comparaison entre les dimensions optimales de t_p et celles données par la fonction approximative $t_p(k)$	54
2.16	Comparaison entre les dimensions optimales de t_h et celles données par la fonction approximative $t_h(k)$	55
2.17	Dimensions optimales t_p, t_h et t_v en fonction de k (stockage et déstockage sur des allées différentes)	57
2.18	Comparaison entre les dimensions optimales de t_p et celles données par la fonction approximative $t_p(k)$	59
2.19	Comparaison entre les dimensions optimales de t_h et celles données par la fonction approximative $t_h(k)$	61
2.20	Résumé des résultats	62
3.1	Déscription de l'AS/RS à racks glissants	67
3.2	Temps de déplacement de simple cycle	69
3.3	Temps de déplacement horizontal entre deux casiers	71
3.4	a- Distribution continue approchée de la variable t_{h1} b- Distribution continue approchée de la variable $t_{h1} + t_{h2}$	72
3.5	a- Distribution continue approchée de la variable t_{p1} b- Distribution continue approché de la variable $-t_{p2}$	73
3.6	a- Distribution continue approchée de la variable $t_{p1} - t_{p2}$ b- Distribution continue approchée de la variable $ t_{p1} - t_{p2} $	73
3.7	Distribution continue approchée de la variable t_r	74

3.8	Distribution du maximum entre le déplacement transversal et le temps de glissement des racks	75
3.9	Dimensions optimales t_p t_h t_v en fonction de t_r pour $k = 1$	79
3.10	Dimensions optimales de t_p , t_h et t_v en fonction de t_r pour $k = 2$	81
3.11	Dimensions optimales de t_p , t_h et t_v en fonction de t_r pour $k = 3$	82
3.12	Dimensions optimales de t_p , t_h et t_v en fonction de t_r pour $k = 4$	82

Liste des Tableaux

1.1	Différentes terminologies de l'AS/RS	8
2.2	Dimensions optimales de l'AS/RS multi allées (stockage et déstockage sur la même allée)	50
2.3	Ecart relatif entre les valeurs optimales de t_p et de la fonction approximative $t_p(k)$	53
2.4	Ecart relatif entre les valeurs optimales de t_h et de la fonction approximative $t_h(k)$	54
2.5	Dimensions optimales de l'AS/RS multi allées (stockage et déstockage sur des allées différentes)	56
2.6	Ecart relatif entre les valeurs optimales de t_p et de la fonction approximative $t_p(k)$	58
2.7	Ecart relatif entre les valeurs optimales de t_h et de la fonction approximative $t_h(k)$	60
3.1	Dimensions optimales de l'AS/RS à racks glissant pour $k = 1$	78
3.2	Dimensions optimales de l'AS/RS à racks glissants pour un temps multi cycles. Nous remarquons que pour $t_r=0$ et $t_r=1$ les valeurs des dimensions optimales t_p , t_h et t_v restent presque les mêmes. Quelle que soit le nombre d'opérations k	80

Introduction générale

Aujourd'hui en raison de la croissance constante des besoins économiques et logistiques, l'efficacité et l'efficacité dans les entreprises reposent sur les activités logistiques en particulier, la gestion des stocks.

Dans les grandes entreprises de production, le volume des articles et des composants tellement important que  a devient difficile d'utiliser un système de stockage et de déstockage manuel. C'est pourquoi, une attention particulière a été portée sur l'installation d'un système automatisé de stockage et de déstockage (AS/RS:Automated Storage/Retrieval System).

Les AS/RS représentent une alternative innovante au contrôle et à la gestion des stocks qui sont en majorité utilisés dans les usines, centres de distribution, entrepôts et environnements non manufacturiers. De nombreux avantages peuvent être tirés de l'installation des systèmes AS/RS, tels que l'économie de coûts de main-d'œuvre et de l'espace de stockage, la facilité et la rapidité de la manutention des articles et des produits, une meilleure traçabilité des produits stockés, un débit optimisé du système et plus de sécurité.

Les AS/RS se sont de plus en plus améliorés. Ainsi les machines de stockage/déstockage (S/R: Storage/Retrieval Machines) multi-navettes ont été progressivement introduites sur le marché il y a quelques années. Ces machines, possèdent une grande vitesse d'exécution, et elles sont capables de transporter plusieurs palettes à la fois au cours d'un même cycle, contrairement aux machines S/R à simple navette qui ne peuvent transporter qu'une seule palette à la fois.

L'installation de ce type de système nécessite un investissement financier important, il est donc fortement recommandé de bien étudier et de concevoir ce système avant

son installation. Il est largement reconnu que l'un des objectifs les plus importants lors de la conception d'un AS/RS est d'atteindre un temps de cycle minimum.

L'objectif de ce travail est de déterminer les dimensions optimales de l'AS/RS multi allées et l'AS /RS à racks glissants, pour un temps de cycle de la machine S/R multi navettes minimal.

Ce travail comprend trois chapitres. Dans le premier chapitre, une généralité sur les systèmes automatisés de stockage/déstockage sera présentée. Elle comportera la définition, les fonctions, les composants et les différentes terminologies utilisées dans la littérature des AS/RS. Nous présenterons une section décrivant les différents types d'AS/RS les plus connus dits classiques, nous présenterons également quelques nouveaux AS/RS développés au cours de ces dernières années. Ensuite une section dédiée aux méthodologies de stockage et une autre aux différentes mesures de performances de l'AS/RS sont présentées. Un état d'art regroupant deux différents volets de recherche sur les AS/RS. Le premier regroupe le fonctionnement du système sur le long terme et le deuxième volet s'intéresse aux facteurs qui influent sur le fonctionnement du système pendant son utilisation.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons l'AS/RS multi allées, son fonctionnement, le modèle analytique du temps de simple cycle et le modèle analytique du temps de déplacement entre deux casiers ainsi que le temps multi cycles du système, pour ensuite passer à l'optimisation pour un temps multi cycles afin de déterminer les trois dimensions de l'AS/RS multi allées. Nous avons formulé le problème qui représente un problème d'optimisation en nombres réels de fonctions à trois variables avec contraintes. La première contrainte est reliée à la positivité des trois dimensions du système et la deuxième contrainte est liée à la constante du système. Cette dernière nous permettra de passer à une fonction à deux variables. La lourdeur des équations du temps multi cycles rend le calcul analytique difficile pour cela nous utilisons la méta-heuristique algorithme génétique pour déterminer les dimensions optimales.

Finalement, dans le troisième chapitre, nous présenterons l'AS/RS à racks glissants, son fonctionnement, les modèles analytiques du temps de simple cycle, du temps de déplacement entre deux casiers ainsi que le temps multi cycles du système. Pour passer ensuite à l'optimisation des dimensions du système. Nous commencerons par la formulation du problème qui est un problème d'optimisation en nombre réel de fonctions à trois variables configuré avec des contraintes. La résolution analytique de

ce problème d'optimisation est difficile, nous utiliserons l'algorithme génétique pour déterminer les dimensions optimales de ce système.

1

Introduction aux systèmes automatisés de stockage/déstockage

Sommaire

1.1	Introduction	6
1.2	Définition des systèmes automatisés de stockage/ déstockage	7
1.3	Fonction d'un AS/RS	7
1.4	Composants d'un AS/RS	7
1.5	Terminologie	8
1.6	Types d'AS/RS	10
1.6.1	L' AS/RS à charge unitaire	10
1.6.2	L'AS/RS multi allées	11
1.6.3	L'AS/RS à racks glissants	12
1.6.4	L'AS/RS à mini charge ou à charge réduite	12
1.6.5	L'AS/RS à carrousel	13
1.6.6	L'AS/RS à personne embarquée	14
1.6.7	L'AS/RS à étagères profondes	14
1.6.8	L' AS/RS à convoyeurs gravitationnels	15
1.6.9	L' AVS/RS	15

Chapitre 1 – Introduction aux systèmes automatisés de stockage/déstockage

1.6.10	L' SP/AS/RS	16
1.6.11	L'SBS/RS	16
1.7	Politique de stockage	17
1.8	Mesures de performances d'un AS/RS	18
1.9	Etat de l'art	19
1.9.1	Introduction	19
1.9.2	Contrôle stratégique	20
1.9.3	Contrôle opérationnel	24
1.10	Conclusion	28

1.1 Introduction

La fonction du stockage joue un rôle indispensable et primordial qui doit être prise en considération par n'importe quelle entreprise pour maintenir un avantage concurrentiel en termes d'efficacité et d'efficience.

Le stockage représente une immobilisation de capital, il peut à tout moment disparaître puisqu'il risque de se détériorer ou se périmer, donc une bonne gestion de stock garantit un gain de temps et d'argent pour l'entreprise. Les chercheurs ont essayé de trouver des solutions et des améliorations à la gestion de stocks, parmi leurs grandes innovations on trouve les systèmes automatisés de stockage et de déstockage (AS/RS).

Les AS/RS constituent une technologie importante dans les industries modernes. Ils sont beaucoup plus utilisés dans les usines de fabrication et les centres de distribution. Il s'agit d'un système robotisé, informatisé qui automatise les opérations telles que le stockage, déstockage le tri, le rangement et la préparation de commandes.

Leur installation coûte un investissement énorme cependant ils présentent beaucoup d'avantages tels que : la densité élevée de stockage, la rapidité et la fiabilité de stockage et de déstockage sans intervention humaine et le suivi des stocks en temps réel. Ce qui justifie leur coût.

Quel que soit le type de l'AS/RS, il est constitué de quatre composants principaux : le rack de stockage, le système d'entrée/sortie, la machine de stockage/déstockage (Storage and Retrieval machine) et le système de gestion informatique ou le système de contrôle.

Les AS/RS permettent aux produits d'être stockés pendant des durées bien déterminées, soit après leurs traitements (produit semi finis), ou pour leurs premiers stockages (matière première). Pendant les opérations de stockage et de déstockage des déplacements physiques doivent être effectués. Pour une bonne gestion de la fonction de stockage, ces déplacements doivent être optimisés.

Dans ce chapitre nous commençons dans la section 1.2 par définir l'AS/RS, ensuite dans la section 1.3 une présentation de ses composants ainsi que de ses fonctions dans la section 1.4. Ensuite dans 1.5 les différents types des AS/RS cités dans la littérature et existants dans l'industrie sont présentés, par la suite nous exposons dans la section 1.6 les différentes méthodologies de stockage. Ensuite dans la section 1.8 les mesures de performances de l'AS/RS. Ensuite dans la section 1.9 un état de l'art qui regroupe les différents travaux dans le domaine des AS/RS. Nous terminons par une conclusion dans la section 1.10.

1.2 Définition des systèmes automatisés de stockage/déstockage

Un système automatisé de stockage/déstockage (AS/RS) peut être défini comme un système de stockage dans lequel un degré d'automatisation est implémenté pour garantir une rapidité et une précision dans l'exécution de stockages et de déstockages. Selon "Material Handling Institute" (Material Handling Institute, 1977) un système de stockage/déstockage automatisé est défini comme ceci : « A combination of equipment and controls which handles, stores, and retrieves materials with precision, accuracy, and speed under a defined degree of automation. »

1.3 Fonction d'un AS/RS

Un AS/RS est composé d'une ou de plusieurs machines S/R (Storage/Retrieval machine). Elle se déplace à la fois verticalement et horizontalement vers le produit désiré via un système de contrôle pour réaliser, sans intervention humaine les trois principales opérations:

- L'opération de stockage : transport du produit de la station de D/L (dépot/livraison) vers le casier de stockage.
- L'opération de déstockage : déstocker le produit.
- Le transport de l'article déstocké vers la station D/L.

Un AS/RS peut avoir d'autres fonctions supplémentaires comme recevoir, identifier, classer, emballer des produits.

1.4 Composants d'un AS/RS

Les composants de base qu'on retrouve dans la majorité des AS/RS quels que soient leurs types sont les suivants:

- Une machine de stockage et déstockage S/R: Permet la manutention des articles au sein de l'AS/RS. On peut avoir une ou plusieurs machines dans un AS/RS, cela dépend du type de ce dernier.
- Une station de dépôt et de livraison : Permet le dépôt des articles à stocker et la récupération des articles déstockés. Les détails du contenu des articles sont communiqués à l'ordinateur central
- Un ensemble d'allées parallèles entourées de racks de stockage de chaque côté.

- Un système de contrôle informatique : Il effectue deux fonctions : Contrôle les opérations de stockages et déstockages dans le système et stocker le mouvement des articles et les données d'inventaire. Afin d'assurer le bon fonctionnement du système (interface homme/machine).

1.5 Terminologie

Le tableau ci-dessous représente les différentes terminologies utilisées dans la littérature des AS/RS.

Tableau 1.1: Différentes terminologies de l'AS/RS

Terminologie		Définition
Casier	 <p>Figure 1.1: Casier de stockage</p>	Un espace tridimensionnel alloué au stockage d'une charge unitaire ou d'un ensemble de charges.
Colonne de casiers	 <p>Figure 1.2: Colonne de casiers</p>	Un ensemble de casiers disposés les uns sur les autres dans le sens vertical (du sol au plafond).
Rangée ou rack	 <p>Figure 1.3: Rangée ou rack</p>	La rangée est constituée de plusieurs colonnes placées les unes derrière les autres, formant par conséquent un ensemble de casiers qui vont délimiter les allées de l'AS/RS.

<p>Allée</p>	 <p>Figure 1.4: Allée</p>	<p>Allée de service (desserte): elle se situe entre deux racks. Allée commune : elle relie toutes les allées de desserte. Sur les deux types d'allées peut circuler la machine de stockage/déstockage.</p>
<p>Machine de stockage/déstockage S/R (Storage/Retrieval machine)</p>	 <p>Figure 1.5: Machine S/R multi navettes</p>  <p>Figure 1.6: Machine S/R simple navette</p>	<p>Est un dispositif automatisé souvent à grande hauteur, qui permet de ranger des charges ou des produits dans un rack. Elle est constituée d'un mât qui se déplace sur un rail le long d'un rayonnage. Le nombre et le type de machines S/R diffèrent d'un genre de système à un autre. Il existe une configuration de la machine S/R (multi navettes) qui dispose de deux ou trois emplacements et peut transporter deux charges et trois charges. Contrairement à la machine S/R (transstockeur)classique qui peut transporter au maximum une charge à la fois.</p>
<p>Module de stockage</p>	 <p>Figure 1.7: Module de stockage</p>	<p>Représente les palettes ou les containers de formes standards pouvant être placés dans les casiers.</p>

<p>Station dépôt/livraison (D/L). Ou d'entrée/sortie</p>	 <p>Figure 1.8: Station dépôt/livraison (D/L)</p>	<p>Sont des stations par lesquelles transitent les articles entrants et sortants de l'AS/RS. Il existe des cas où la station d'entrée et la station de sortie se divisent en deux stations ou bien qu'elles soient combinées en une seule station.</p>
--	---	--

1.6 Types d'AS/RS

Il existe différents types d'AS/RS. Leur variation dépend de la taille et du volume des articles à manipuler, des méthodes de stockage et de déstockage, de l'interaction entre le transstockeur et le travailleur humain,...

Les AS/RS's les plus connus dits classiques sont les suivants:

1.6.1 L' AS/RS à charge unitaire

Le système de charge unitaire (Figure 1.9) représente le système de base ou l'AS/RS générique. Il est composé d'un ensemble de racks disposés deux à deux en parallèle et séparés par des allées dites allées de dessertes. Des appareils de manutentions appelés machines S/R ou machines de stockage et déstockage peuvent circuler pour stocker ou déstocker des charges palettisées ou en container dont le poids est généralement supérieur à 250 kg. (Kouloughli, 2014).

Chaque machine S/R est placée sur des rails fixés au sol. Elle est composée d'un cadre perpendiculaire à ces rails sur lequel coulisse, verticalement, un plateau, qui sert à transporter les charges. Ce plateau peut se déplacer horizontalement à la perpendiculaire du cadre pour charger/décharger les produits dans les casiers ainsi qu'au niveau de la station dépôt/livraison. Il existe plusieurs mécanismes de support de la charge qui diffèrent d'un système à un autre, on peut en citer :

- Le système à plateau coulissant : le même principe que le transpalette.
- Le système à ventouse : la charge est fixée en créant un vide dans les ventouses.
- Le système à aimant : idéal pour les produits en acier (Sari, 2003)

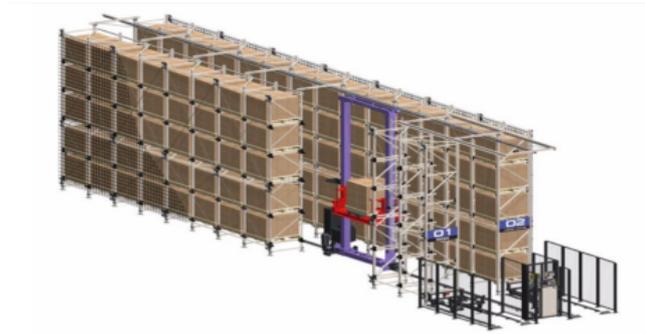


Figure 1.9: AS/RS à charge unitaire

1.6.2 L'AS/RS multi allées

L'AS/RS multi allées (Figure 1.10) est une variation de l'AS/RS à charge unitaire. La particularité de ce système est qu'il est équipé en plus, d'une allée commune dite allée transversale reliant toutes les allées. Ainsi d'une seule machine S/R qui peut servir plusieurs allées à la fois, cette machine S/R se déplace suivant trois axes: verticalement le long des colonnes formant les racks, horizontalement le long des allées de service et le long de l'allée et une station de D/L se trouve a l'extrémité des racks.

Une description plus détaillée de ce type de système est mentionnée dans le chapitre2.



Figure 1.10: ASRS multi-allées

1.6.3 L'AS/RS à racks glissants

L'AS/RS à racks glissants (Figure 1.11) est une variation des AS/RS multi allées. Sauf que dans ce système il y a une seule allée de service qui n'apparaît que lorsqu'une opération de stockage ou de déstockage est prévue dans les racks correspondants.

Cette allée est formée par le glissement latéral de deux racks mitoyens ce qui permettra à la machine S/R d'accéder au rack pour stocker ou déstocker l'article.

Une description plus détaillée sur ce type de système est mentionnée dans le chapitre 3.



Figure 1.11: AS/RS à racks glissants

1.6.4 L'AS/RS à mini charge ou à charge réduite

Ce type d'AS/RS (Figure 1.12) est contrairement aux AS/RS à charge unitaire conçu pour stocker de petites charges dont le poids de charge varie entre 45 et 225 kg (Metahri, 2019) dans des casiers. Un casier peut contenir un ou plusieurs produits.

La machine S/R est conçue pour déstocker le casier en entier et le livrer à la station D/L ou se trouve un opérateur (personne ou robot) qui retire les articles.



Figure 1.12: AS/RS à mini charge

1.6.5 L'AS/RS à carrousel

L'AS/RS à carrousel (Figure 1.13) est composé d'un ensemble de casiers montés sur des convoyeurs qui tournent horizontalement sur des rails si le carrousel est horizontal ou verticalement sur les rails si le carrousel est vertical.

Dans ce type de système ce sont les casiers qui se déplacent vers l'extrémité du rack où on trouve un opérateur qui stocke ou déstocke les produits, ce qui représente une bonne alternative au système à mini charge (Sari, 2003).

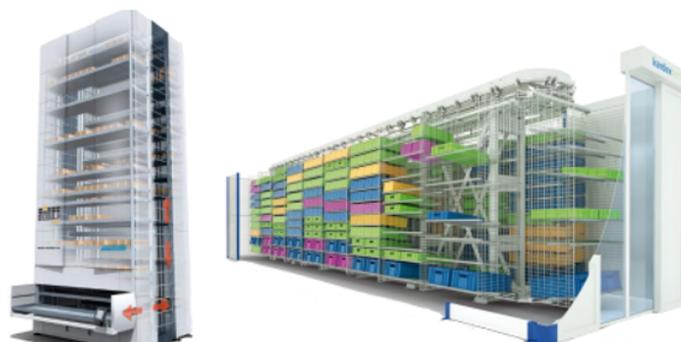


Figure 1.13: AS/RS à carrousel

1.6.6 L'AS/RS à personne embarquée

L'AS/RS à personne embarquée (Figure 1.14) est constitué d'une plateforme mobile sur laquelle un opérateur peut prendre place pour stocker ou déstocker plusieurs petits produits de chaque casier en une seule opération. Ensuite ces produits sont déposés sur la machine S/R pour les transporter vers la station D/L. De plus, la plateforme est équipée d'un système automatique pour la manutention des produits lourds.



Figure 1.14: AS/RS à personne embarquée

1.6.7 L'AS/RS à étagères profondes

L'AS/RS à étagères profondes (Figure 1.15) est un AS/RS à charge unitaire à haute densité, il permet de stocker une quantité importante de charges unitaires. Dans un même casier on peut stocker jusqu'à 10 charges l'une derrière l'autre c'est-à-dire en multi couche (Tompkins et al., 2010).

Les charges peuvent se déplacer horizontalement à l'intérieur du casier grâce à des plateaux mobiles qui se déplacent de la machine S/R à l'entrée du casier. Ils sont stockés d'un côté du casier et déstockés de l'autre côté du casier.

La machine S/R est la même que celle utilisée dans les AS/RS à charge unitaire, sauf que cette dernière dispose de quelques fonctions en plus pour contrôler les plateaux mobiles.

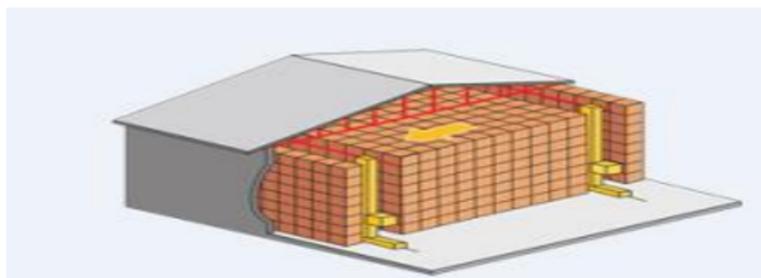


Figure 1.15: AS/RS à étagères profondes

1.6.8 L' AS/RS à convoyeurs gravitationnels

L'AS/RS à convoyeurs gravitationnels (Figure 1.16) est une variation des AS/RS à étagères profondes. Il est composé d'un rack profond constitué d'un ensemble de casiers. Chaque casier est équipé d'un convoyeur gravitationnel pour permettre le glissement des produits d'un bout à l'autre du casier.

Le stockage et le déstockage se font par deux machines S/R. La machine de stockage est placée sur la face avant du rack et la machine de déstockage sur l'autre face. Ces deux machines sont reliées entre elles par un convoyeur de restockage permettant à la machine S/R d'accéder aux produits pour les restocker, ainsi on trouve une station de dépôt située au coin bas de la face de stockage et une station de livraison au coin bas de la face de déstockage.



Figure 1.16: AS/RS à convoyeurs gravitationnels

Il y a beaucoup de nouveaux modèles d'AS/RS parmi lesquels on trouve les systèmes à véhicule autonome de stockage et déstockage, les systèmes de stockage et de déstockage à plateforme partagée, les systèmes de stockage et de déstockage basés sur les navettes...

1.6.9 L' AVS/RS

L'AVS/RS ou autonomous vehicle storage and retrieval system (Figure 1.17) est une variation des AS/RS classiques, qui utilise des véhicules autonomes pour le stockage et le déstockage.

Il est composé principalement d'un système RGV(Rail Guided Vehicle), un système d'ascenseurs, d'une allée et d'une étagère, d'une station de D/L et d'un système de contrôle.

Les véhicules autonomes sont utilisés pour déplacer les palettes à l'intérieur d'un étage et les ascenseurs sont utilisés pour transporter les véhicules vides ou chargés

entre les niveaux. Ils sont flexibles et efficaces pour le transfert de charges unitaires dans les zones de stockage à haute densité.

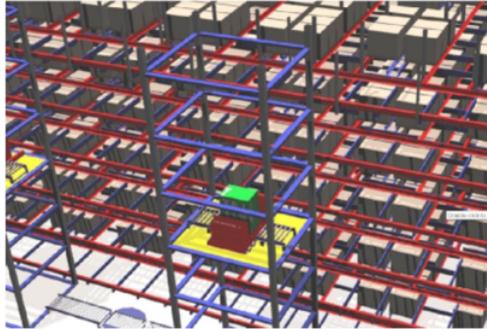


Figure 1.17: AVS/RS en bleu et les ascenseurs en jaune

1.6.10 L' SP/AS/RS

L' SP/AS/RS (split-platform automate storage and retrieval system)(Figure 1.18) est un système de stockage et de déstockage à plateforme partagée, qui peut transporter des charges plus lourdes telles que des conteneurs maritimes.

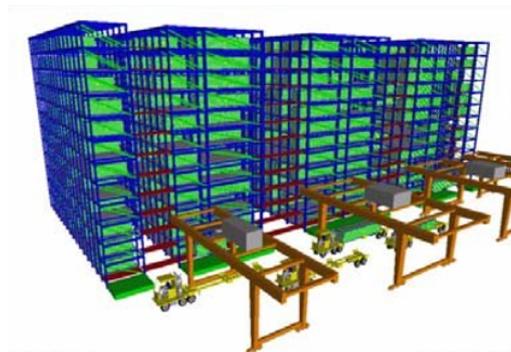


Figure 1.18: SP/AS/RS

1.6.11 L'SBS/RS

L'SBS/RS (Shuttle Based Storage/Retrieval Systems) (Figure 1.19) est un système de stockage et de déstockage basé sur des navettes. C'est une variation des AS/RS, mais il est différent dans le sens qu'il utilise des navettes comme machine de stockage/déstockage (S/R) au lieu d'un transstockeur. Les navettes sont affectées à chaque niveau du système et sont utilisées pour le ramassage ou le dépôt des commandes.

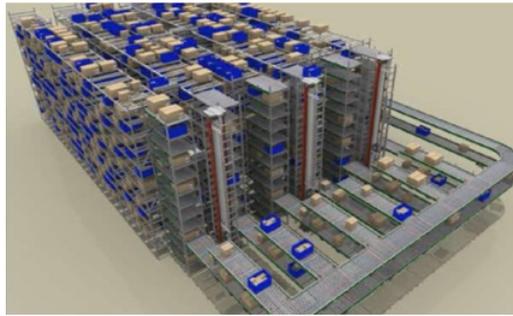


Figure 1.19: SBS/RS

1.7 Politique de stockage

Plusieurs stratégies de stockage peuvent être trouvées dans la littérature pour les AS/RS. Les plus utilisées sont (Roodbergen & Vis, 2009) :

- **Le stockage dédié :**

Chaque type de produit est toujours affecté au même emplacement. L'inconvénient de ce type de stockage est qu'il prend beaucoup de place. Car des places sont aussi réservées aux produits en rupture de stock. En outre, vous devez réserver suffisamment d'espace pour chaque type de produit afin d'accueillir le maximum d'inventaire qui peut se produire. On peut citer les avantages du stockage dédié, tels que la localisation des produits lourds au fond ou l'adaptation à la disposition des magasins, sont liés aux zones de préparation de commandes non automatisées et ne sont pas aussi intéressants pour les AS/RS.

- **Le stockage aléatoire :**

Avec le stockage aléatoire, chaque emplacement vide a une chance égale d'être affecté au prochain chargement.

- **Le stockage aléatoire ouvert :**

Le premier emplacement vide rencontré sera utilisé pour stocker les produits. Cela conduit généralement à un AS/RS où les rayonnages sont pleins autour des points d'entrée/sortie et progressivement plus vides vers l'arrière (s'il y a une capacité supplémentaire).

- **Le stockage full-turnover :**

La politique de stockage à rotation complète détermine les emplacements de stockage des charges en fonction de la fréquence de leur demande. Les produits fréquemment demandés obtiennent les emplacements les plus faciles d'accès, généralement près des points d'entrée/sortie. Les produits à rotation lente sont situés plus loin du point d'entrée/sortie.

- **Le stockage par classes :**

Cette méthode d'affectation des stocks divise l'espace disponible de l'entrepôt en un certain nombre de zones. Chaque article est ensuite affecté à l'une de ces zones, en fonction de la fréquence de la demande de cet article. Le stockage aléatoire est appliqué à l'intérieur d'une zone. En fait, la politique de stockage à rotation complète peut être considérée comme une politique basée sur les classes, avec un seul article par classe. Le stockage par classe à trois classes est souvent appelé stockage ABC. Le principal avantage du stockage par classe est une efficacité accrue due au stockage des éléments à rotation rapide près du point d'entrée/sortie, alors que dans le même temps, les faibles besoins en espace de stockage et la flexibilité de la méthode de stockage aléatoire s'appliquent.

1.8 Mesures de performances d'un AS/RS

Les avantages majeurs des AS/RS sont 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 certains critères appelés critères de performances d'un AS/RS avant son installation, car les modifications à posteriori sont plus difficiles et très coûteuses.

Les principales mesures de performances utilisées dans les AS/RS sont :

- **L'espace de stockage utilisé :** ceci dépend du type de l'AS/RS. C'est la quantité de produit stocké par unité de volume.
- **Le taux d'utilisation de la machine S/R :** il correspond à la fréquence des opérations de stockage et de déstockage et au nombre de demandes traitées sur une période de temps.
- **Le temps de cycle de la machine S/R :** le temps de cycle est défini comme étant le temps qui s'écoule depuis l'apparition de la requête de stockage ou de déstockage, jusqu'à la fin de son exécution.

- **Le taux de requêtes satisfaites par unité de temps (throughput)** : il dépend du temps de cycle moyen mais aussi des méthodologies de stockage et des techniques de pilotage du système.

La mesure de performance la plus couramment utilisée d'un AS/RS est le débit du système, défini comme le nombre d'opérations de stockage et déstockage effectuées par le système par période. Il est égal à l'inverse du temps de cycle de la machine S/R.

Dans ce travail nous nous intéressons à l'optimisation du temps de cycle de la machine S/R tout en augmentant sa capacité (le nombre d'opérations de stockages et déstockages par cycle). Dans l'objectif d'augmenter le débit de système et d'obtenir les dimensions optimales temporelles pour les deux types de système l'AS/RS multi allées et l'AS/RS à racks glissants.

1.9 Etat de l'art

1.9.1 Introduction

Depuis les années 1950 les entrepôts ainsi que les centres de production et de distribution du monde entier appliquent les technologies des systèmes de stockage et de déstockage automatisés AS/RS pour la manutention des produits et la gestion des stocks (Roodbergen & Vis, 2009).

Les AS/RS ont évolué en plusieurs branches, et chaque branche a donné lieu à de nombreuses recherches : sur les méthodologies de conception et de configuration des systèmes ainsi que sur les stratégies de contrôle opérationnel.

L'objectif principal de ces nombreux travaux de recherches est de minimiser le temps de cycle moyen de la machine S/R afin d'améliorer le débit du système, qui est considéré comme la plus importante mesure de performance. Ce dernier dépend de plusieurs critères tels que le déplacement et les caractéristiques fonctionnelles de la machine S/R, la structure des cellules de stockage dans les racks, la conception des racks et la disposition physique des AS/RS, la politique du point de repos de la machine S/R, la position de la station D/L et les stratégies du stockage. . . etc.

Nous présentons un état de l'art regroupant deux différents volets de recherche: le premier regroupe le fonctionnement du système sur le long terme et qui est lié à des décisions prises en amont de l'installation du système telles que la conception et la configuration des AS/RS, nous soulignons aussi les différents travaux sur la modélisation et l'optimisation du temps de cycle et les positions des points de repos des machines S/R. Le deuxième volet contient les facteurs qui influent sur le fonctionnement du système pendant son utilisation tels que la méthodologie de stockage et l'ordonnancement des

opérations de stockages et de déstockages. À la fin de cette partie nous terminerons par une présentation des contributions de cette thèse.

1.9.2 Contrôle stratégique

• Conception et configuration des AS/RS

Pour améliorer les performances du système et réduire les coûts d'investissement, d'importantes décisions de conception et de configuration doivent être prises au cours de la phase initiale de conception du système. Afin de répondre aux exigences du système caractérisées par la capacité de stockage, le débit, le temps de réponse, etc,

Les concepteurs doivent décider du nombre d'allées, du nombre de colonnes, de la profondeur et de l'emplacement des stations d'entrée/sortie, etc.

La conception des AS/RS a intéressé beaucoup de chercheurs : les auteurs (Vasili et al., 2012) ont fait une liste des problèmes de conception les plus intéressants tels que: l'affectation des produits aux emplacements de stockage dans la structure de stockage, la configuration de la structure de stockage (rapport entre la longueur et la hauteur), les politiques d'exploitation pour le stockage des commandes. Les auteurs (Çinar et al., 2021) ont présenté une revue systématique de la littérature sur la recherche en matière de conception et d'optimisation de la configuration des AS/RS. Les auteurs (Lerher & Šraml, 2012) se sont penchés sur le modèle d'efficacité énergétique pour les systèmes de stockage et de déstockage automatisés à mini-charge. Les vitesses et les accélérations des grues, le nombre de rangées et le nombre de colonnes avec le nombre requis de grues sont définis comme variables de conception. Ainsi la consommation de CO₂ du système est évaluée. (P. Yang et al., 2015a) ont étudié l'AS/RS à étagères profondes dont ils ont développé des modèles de temps de cycle puis procédé à l'optimisation du design du système afin de déterminer les ratios entre les différentes dimensions optimales. En considérant l'accélération/décélération des machines S/R ainsi que leurs vitesses maximales. (Ghomri & Sari, 2017) ont développé des modèles du temps de cycle pour l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels en tenant compte la variété des produits pour ce système. (Sari & Bessenouci, 2012) ont présenté un nouveau système de stockage automatisé, ce dernier est un cas particulier de l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels. Il est constitué d'une seule machine au lieu de deux machines. Des modèles de temps de cycle ont été présentés. (Chen et al., 2015) ont présenté un nouveau type de système qui est l'AS/RS à convoyeurs gravitationnels bidirectionnels, Ce dernier combine les caractéristiques des deux systèmes, d'un AS/RS à convoyeurs gravitationnels classique et celles d'un système à convoyeurs gravitationnels à une seule machine présenté par (Sari & Bessenouci, 2012).

En plus des systèmes de stockage dits classiques, les chercheurs du domaine se sont penchés sur l'analyse et l'étude des nouvelles technologies dans les AS/RS, comme c'est le cas pour les SBS/RS (Shuttle Based Storage/Retrieval Systems), (split-platform SP-AS/RS) ou AS/RS à plateforme partagée et l'AVS/RS.

(Manzini et al., 2016) ont présenté une expression mathématique calculant le temps de simple et double cycle d'un AVS/RS à voie profonde avec une configuration alternative. Les auteurs ont ensuite validé ces résultats via la simulation et ont donné un exemple avec une étude de cas réel d'entrepôt. (D'Antonio et al., 2019) ont présenté des modèles du temps de cycle pour l'AVS/RS à étagère profonde, tout en considérant les caractéristiques opérationnelles d'un tel système. (Ekren, 2020) ont développé un outil informatique d'évaluation des performances d'un SBS/RS, en termes de temps de cycle moyen, de variance, ainsi qu'en consommation énergétique. (Y.-H. Hu et al., 2005) ont modélisé le temps de transport pour le simple cycle d'un AS/RS à plateforme partagée (split-platform SP-AS/RS). 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 (Liu et al., 2016) en introduisant le temps de double cycle pour le même type de système et avec les mêmes hypothèses et ils ont validé son exactitude par la simulation.

• Temps de cycle

Le temps de cycle de la machine de stockage et déstockage représente un paramètre important qui influe directement sur la performance globale du système.

L'un des premiers travaux s'intéressant à la modélisation et à l'optimisation a été réalisé par (Bozer & White, 1984). Où les auteurs ont développé des modèles analytiques du temps de simple et de double cycle pour un AS/RS à charge unitaire. Ils ont ensuite optimisé les dimensions de ce système.

Les AS/RS multi allées sont une variété des AS/RS à charge unitaire ils diffèrent uniquement dans le fait qu'ils utilisent une seule machine S/R pour servir toutes les allées. (Hwang & KO, 1988) ont proposé un modèle du temps de cycle pour les AS/RS multi allées. Chaque rack est approché par une surface continue pour laquelle les auteurs ont proposé une expression mathématique estimant le temps de cycle. Le modèle du temps de cycle global du système est la moyenne des expressions modélisant le temps de cycle pour toutes les allées. (Ghomri et al., 2009) ont développé un modèle mathématique pour le temps de cycle d'un AS/RS multi allées. Dans ce travail les auteurs ont approximé l'AS/RS multi allées par un parallépipède rectangle et ont modélisé son temps de cycle par une expression purement continue. Contrairement au modèle de (Hwang & KO, 1988), le modèle obtenu ici est complètement continu. (Lerher et al., 2010) ont également proposé un modèle analytique pour le temps

de cycle d'un AS/RS multi allées en prenant en considération les paramètres de l'accélération et la décélération de la machine S/R. (Lu et al., 2016) ont proposé un modèle analytique de temps de cycle pour l'AS/RS multi allées en considérant les paramètres de l'accélération et la déclaration de la machine S/R. Dans (Guezzen et al., 2013) les auteurs, ont développé deux modèles analytiques continus du temps moyen de simple cycle pour l' AS/RS à racks glissants. (Metahri & Hachemi, 2018) ont développé des modèles continus du temps de cycle et les ont validé en les comparant à des modèles discrets pour un AS/RS à convoyeurs gravitationnels à chute libre. (Lerher et al., 2015) ont développé des modèles analytiques du temps de cycle pour les systèmes SBS/RS, tout en considérant les caractéristiques opérationnelles des ascenseurs et chariots, comme l'accélération/décélération et la vitesse. (Xu et al., 2018) ont développé le modèle du temps de cycle à double commande dans les systèmes AS/RS compacts 3D et ont prouvé que le cycle à double commandes est plus intéressant que le cycle à commande unique.

La majorité des chercheurs ont étudié un système à simple navette. Ils ont constaté que la capacité et le débit restent limités par rapport aux caractéristiques techniques maximales de la machine S/R et la géométrie optimale des racks de stockage (Han et al., 1987). Pour augmenter la capacité et le débit, nous devons utiliser des machines S/R multi navettes qui peuvent stocker et récupérer plusieurs charges en même temps. Des modèles analytiques pour le système multi-navettes ont été présentés par (Meller & Mungwattana, 1997) Dans ce travail les auteurs ont développé des modèles analytiques pour le temps de cycle quadruple T (QC) et sextuple T (SxC) avec les trois heuristiques FCFS(First-come-fist-served), NN(Nearest Neighbors), RNN(Reverse Nearest Neighbors). Les auteurs dans(Azzi et al., 2011) ont modélisé le temps de transport d'un AS/RS à double navettes.

• Optimisation

Beaucoup de chercheurs ont travaillé sur l'optimisation des différents paramètres de performances des AS/RS tel que : le temps de cycle, le débit, la consommation d'énergie, l'émission de CO₂, ainsi que le coût total sous les contraintes de hauteur, de diamètre et de capacité de stockage du système ... afin de trouver une conception optimale de l'AS /RS.

(Borovinšek et al., 2017) se sont penchés sur l'optimisation multi-objectifs du design du SBS/RS. Trois critères étaient considérés dans la conception du design ; la minimisation du temps de cycle moyen, la minimisation de la quantité d'énergie consommée et la minimisation du coût d'investissement total. Les auteurs dans (Accorsi et al., 2017) ont également travaillé sur l'optimisation multi-objectifs dans le cadre d'une approche hiérarchique pour la conception d'un AVS/RS, afin de minimiser deux mesures de performance : le temps de cycle moyen et la consommation d'énergie

moyenne par transaction. (Yetkin Ekren, 2021)] ont proposé un modèle multi-objectifs pour la conception de bâtiment d'entrepôt afin de minimiser le temps de cycle, le coût total et l'empreinte carbone du système de stockage. L'objectif est de définir les dimensions globales du bâtiment, en tenant compte de la capacité de stockage et des performances de manutention.

Les auteurs dans (Kouloughli & Sari, 2015) ont déterminé les dimensions optimales d'un AS/RS multi-allées pour un temps de simple et de double cycle dans le cas où les demandes de stockage et de déstockage se font sur la même allée. (Hamzaoui & Sari, 2020) ont déterminé les dimensions optimales d'un AS/RS avec un convoyeur gravitationnel en forme de U et une seule machine S/R en utilisant une technique de comptage. (Kouloughli et al., 2022) ont fait une simulation numérique pour déterminer les trois dimensions temporelles optimales de l'AS/RS à racks glissants pour un temps de simple cycle minimal. Les dimensions temporelles obtenues permettront de trouver la longueur optimale, la profondeur optimale et la hauteur optimale du système.

Beaucoup de chercheurs ont utilisé les métaheuristiques et beaucoup plus les Algorithmes génétiques pour déterminer la conception optimale des AS/RS tel que (Bessenouci et al., 2012) qui ont utilisé les algorithmes de recherche tabou et le recuit simulé pour minimiser le temps de cycle du convoyeur gravitationnel AS/RS qui est un AS/RS compact. (Cinar, 2017a) ont appliqué l'algorithme génétique pour la conception et l'optimisation de la configuration de l'AS/RS circulaire avec l'objectif d'optimiser le débit, le et l'empreinte carbone. Ainsi le coût total sous les contraintes de hauteur, de diamètre et de capacité de stockage du système. (Rajković et al., 2017) ont utilisé l'algorithme génétique NSGA pour l'optimisation multi-objectif des entrepôts automatisés (coût - temps de trajet - émission de CO₂/efficacité énergétique) afin de déterminer la performance du système selon la technique d'optimisation multi-objectifs. (Yue et al., 2017) ont proposé un modèle d'optimisation des créneaux avec une séquence de modèles mixtes à assembler en tenant compte des lignes de flux finales pour optimiser l'ensemble du système de stockage et déstockage automatisé. Un algorithme génétique est proposé afin de minimiser la hauteur verticale du centre de gravité du système AS/RS et le temps total passé à sortir les matériaux du système AS/RS simultanément. (Fandi et al., 2022) ont déterminé les dimensions optimales de l'AS/RS multi allée pour un temps multi cycles cela en utilisant l'algorithme génétique.

• Positions de la station d'entrée / sortie (E/S)

Dans le but de minimiser le temps de cycle des machines de stockage/déstockage, plusieurs chercheurs ont étudié le problème de la position de la station d'entrée / sortie (E/S) et son impact sur le temps de cycle. Elle peut être située à l'avant, au milieu et/ou l'arrière d'une allée (Roodbergen & Vis, 2009).

(Bozer & White, 1984) ont développé le modèle du temps de cycle pour quatre configurations alternatives de la station E/S: dans la première configuration la station E/S est située aux extrémités opposées de l'allée. Dans la deuxième configuration la station E/S est située à la même extrémité de l'allée, mais à des hauteurs différentes. Dans la troisième configuration la station S/E est située à la même hauteur, mais à un point central dans l'allée. Dans la quatrième configuration la station S/E est élevée à la fin de l'allée. (Hao et al., 2015) ont prouvé que les stations d'E/S situées dans le point médian inférieur du rack multi-profondeur peuvent minimiser le temps de déplacement attendu. Dans (Xu et al., 2018) les auteurs ont utilisé un modèle de temps de déplacement stochastique pour étudier l'impact des positions des stations d'E/S sur les performances du système pour un AS/R compact tridimensionnel. (Ma & Wang, 2019) ont suggéré d'avoir plus de deux points d'E/S et différentes politiques d'affectation telles que la politique de stockage basée sur la classe et la politique basée sur le chiffre d'affaires afin de comprendre l'impact de la séparation des E/S. (H. Yu & Yu, 2019) ont proposé deux politiques de point d'arrêt dans les AS/RS avec des stations d'entrée et de sortie aux extrémités opposées de l'allée. Ensuite ils ont développé des modèles de temps de trajet attendu pour les politiques proposées.

1.9.3 Contrôle opérationnel

- **Méthodologies de stockage appliquées aux AS/RS**

De nombreux chercheurs se sont concentrés sur la méthodologie de stockage. Cette dernière est considérée comme optimale si elle répond à diverses contraintes tout en minimisant le temps moyen nécessaire au stockage et déstockage des produits.

Plusieurs stratégies de stockage peuvent être trouvées dans la littérature pour l'AS/RS. Les quatre politiques souvent utilisées sont : le stockage dédié, le stockage aléatoire, le stockage aléatoire ouvert (closest open location storage), le stockage par classe.

(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 politiques de stockage aléatoire, par classe, et full turnover, pour plusieurs distributions de la demande du produit. Par la suite (Guo et al., 2016) ont comparé les performances d'un système AS/RS à charge unitaire exploitées par un chariot élévateur basé sur les trois politiques de stockage (aléatoire, full turnover, par classe), ainsi ils ont développé un modèle pour la distance de déplacement qui tient compte de la consommation d'espace requise. Les résultats montrent que la distance de déplacement unidirectionnelle d'une politique aléatoire diminue avec l'augmentation de la courbe de la demande et une

politique de stockage basée sur les classes est généralement plus performante qu'une politique basée sur la rotation complète. (Lerher, 2006) ont appliqué la politique aléatoire pour les opérations de stockage et la politique premier arrivé premier servi et le plus proche voisin pour les opérations de déstockage dans un AS/RS multi allées. Les résultats montrent que le système est efficace en termes d'amélioration du temps de cycle et du débit dans une politique de stockage par classe.

(Y. Yu et al., 2022) ont étudié un AS/RS avec deux dépôts aux extrémités opposées de chaque allée (TD-AS/RS) basé sur une politique de stockage par classe. Les résultats montrent que la politique de stockage proposée peut améliorer la performance du système jusqu'à 60% et 40%. (Dong & Jin, 2021) ont étudié un système SBS/RS avec une politique de stockage aléatoire et par classe et sous les trois règles de répartition des navettes (aléatoire, basé sur la distance et basée sur le taux de demande). Ils ont modélisé le système comme une chaîne de Markov à temps discret. Une distribution des navettes sous chaque politique a été développé ainsi des modèles de temps de déplacement pour les opérations à commande unique (simple cycle) et à commande double (double cycle). (Lehmann & Hußmann, 2022) ont présenté quatre modèles du temps de cycle pour l'AS/RS à profondeur multiples suivant quatre stratégies de stockage : deux modèles gèrent les stratégies aléatoires, un modèle minimise la variance de remplissage des canaux de stockage et le quatrième maximise cette variance. L'évaluation et la comparaison de ces modèles a montré que la stratégie aléatoire se situe entre la stratégie de variance minimale et maximale. Les auteurs (Keserla & Peters, 1994; Malmberg, 2000; Sarker et al., 1994) ont étudié les systèmes multi navettes en examinant les différentes politiques de stockage.

En outre, beaucoup de chercheurs ont développé de nouvelles méthodes, des heuristiques et des métaheuristiques pour trouver la méthodologie de stockage optimale.

(Cardin et al., 2012) ont développé une nouvelle méthode de stockage appelée in Depp Storage class pour un AS/RS gravitationnel, l'idée est de stocker les produits les plus demandés en premier. (Pan et al., 2015) ont développé une heuristique d'affectation du stockage qui a été développée sur la base d'un algorithme génétique pour un système de pick-and-pass. Les résultats améliorent l'efficacité de la préparation des commandes dans ce système.

• **Ordonnancement des opérations de stockage et de déstockage**

Beaucoup de méthodes sont citées dans la littérature pour ordonnancer les opérations de stockage et de déstockage dans le but de réduire au minimum la distance totale parcourue. Des recherches ont été effectuées sur l'ordonnancement des demandes de stockage et de déstockage pour différents types d'AS/RS.

(Hachemi & Besombes, 2013) ont traité un problème d'ordonnancement de l'AS/RS de type flow rack en intégrant la date d'expédition. (Chen et al., 2016) ont étudié un

problème d'ordonnancement des demandes de stockage/déstockage dans un flow-rack avec une politique de stockage basée sur la durée de séjour. Une heuristique en deux étapes appelée méthode de regroupement et d'appariement est proposée pour minimiser le temps total de déplacement. (Gagliardi et al., 2015) ont présenté deux approches de séquençage pour l'AS/RS multi-allées et ils ont évalué leurs performances lorsque toutes les allées sont d'abord gérées indépendamment, puis de manière globale. Les expériences démontrent clairement qu'un système multi-allées ne peut pas être représenté avec précision par plusieurs systèmes à une allée. Les résultats numériques démontrent que, lorsqu'il s'agit de stockage aléatoire, le séquençage global d'un système AS/RS multi-allées conduit à des réductions de makespan allant de 14 à 29% pour les systèmes à 2 et 3 allées.

Les AS/RS se sont développés et les machines S/R multi navettes ont été progressivement introduites dans le marché. Dans ces systèmes, la machine S/R permet d'effectuer plusieurs opérations de stockage et de déstockage au cours d'un même cycle. Les AS/RS multi navettes ont reçu très peu d'attention de la part des chercheurs par rapport aux AS/RS à simple navette, principalement en raison de leur nouveauté. Nous citons ci-dessous quelques travaux qui traitent l'ordonnancement dans les systèmes AS/RS à navettes multiples. (Sarker et al., 1994) ont proposé une heuristique d'ordonnancement pour le déstockage dans l'AS/RS à double navettes. (Meller & Mungwattana, 1997) ont étudié un problème d'ordonnancement dans l'AS/RS à multi-navettes. Ils ont développé un modèle analytique avec la règle premier arrivé premier servi, plus proche voisin et plus proche voisin inversé. (Dooly & Lee, 2008) ont étudié un problème de séquençage basé sur les quarts de travail pour les AS/RS à double navette, où l'épuisement (opérations de déstockage) et le réapprovisionnement (opérations de stockage) des articles se produisent sur différents quarts de travail.

Ces dernières années, l'intelligence artificielle a suscité un grand intérêt dans le domaine de l'industrie. En général, la majorité des chercheurs utilisent des métaheuristiques et beaucoup plus les algorithmes génétiques pour étudier les AS/RS. Certains de ces travaux de recherche sont cités ci-dessous:

(P. Yang et al., 2015b) ont proposé 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 multi-navettes. L'objectif du modèle est de choisir le mode opératoire en une seule opération ou en plusieurs cycles. (Cheng et al., 2015) ont proposé un algorithme hybride qui combine l'optimisation par essaims de particules et l'optimisation par colonies de fourmis pour résoudre le problème de la mise en lot des commandes et de l'ordonnancement des commandes dans les AS/RS. Le processus d'optimisation est divisé en deux phases. L'optimisation par essaims de particules (PSO) et l'optimisation par colonies de fourmis (ACO) sont utilisées pour optimiser respectivement la mise en lot des commandes et le routage des préparateurs

de commandes. (Cunkas & Ozer, 2019) ont proposé l'optimisation par essaims de particules PSO pour résoudre le problème de l'affectation des AS/RS avec navettes doubles à la charge unitaire. (Yan et al., 2021) ont utilisé un essaim artificiel d'abeilles de tri non dominé (NSABC) qui combine le cadre de traitement multi-objectifs de NSGA-II et la recherche de voisinage de l'algorithme ABC. Ils ont fait une optimisation multi objectifs d'un AS/RS multi allées avec une machine S/R multi navettes. Les résultats montrent que l'algorithme NSABC proposé est une approche efficace pour l'ordonnancement dans un AS/RS cela après une comparaison avec d'autres algorithmes.

Beaucoup de problèmes dans le domaine des AS/RS ont été résolus par des algorithmes génétiques. (Chetty & Reddy, 2003) ont été parmi les premiers à appliquer les algorithmes génétiques (GA) au séquençage des AS/RSs. (Chung & Lee, 2008) ont utilisé un algorithme génétique pour le séquençage d'un AS/RS a simple navette pour un double cycle et une stratégie de stockage aléatoire. (Popović et al., 2014) ont utilisé un algorithme génétique pour l'ordonnancement dans 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). (Wu et al., 2013) ont développé une métaheuristique PSO et un algorithme génétique pour l'ordonnancement des produits de stockage dans un AS/RS à double profondeurs, puis comparer les résultats avec ceux des algorithmes existants. Les résultats des simulations et les comparaisons montrent les avantages et la faisabilité des méthodes proposées. (Homayouni et al., 2014) ont développé un algorithme génétique pour résoudre le problème d'ordonnancement intégré des véhicules guidés automatiquement et SP-AS/RS. (Dornberger et al., 2014) ont eux aussi utilisé un algorithme génétique pour résoudre le problème de la planification du prélèvement dans un AS/RS multi allées. (Cinar, 2017b) les auteurs ont étudié un problème d'ordonnancement. Ils ont modélisé les commandes de déstockage comme étant les jobs et ses palettes comme étant des opérations, ainsi les transtockeurs comme étant des machines. Dans l'objectif de minimiser le temps de déstockage maximal, un algorithme génétique a été mis en place pour y parvenir.

(P. Hu et al., 2019) se sont penchés sur le problème d'ordonnancement des chariots élévateurs et du système de véhicules guidés par rail unique dans les AS/RS. Ces derniers ont formulé le problème comme un modèle de programmation linéaire en nombre entiers. Ainsi un algorithme génétique a été utilisé pour résoudre ce problème. L'écart de la solution obtenue par rapport à la borne inférieure calculée est de 2,00 % en moyenne, donc cet algorithme semble donner de bons résultats, car il surpasse la politique FCFS de 8,36

Dans cette thèse, nous nous intéressons à l'optimisation du temps de cycle de la machine S/R multi navettes pour un AS/RS multi allées et un AS/RS à racks glissants

afin de déterminer leurs dimensions en termes de longueur, largeur et profondeur pour une conception optimale de ces systèmes.

1.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés aux systèmes automatisés de stockage/déstockage. Nous avons présenté une description de ces systèmes, leurs fonctions, leurs composants et les différentes terminologies utilisées. Une présentation détaillée des différents types, nous avons aussi présenté les différentes politiques de stockage et les mesures de performances d'un AS/RS.

En deuxième partie de ce chapitre nous avons présenté un état de l'art détaillé des recherches sur les systèmes automatisés de stockage/déstockage. Cette section montre l'importance que porte la communauté scientifique aux systèmes de stockage.

Les principales contributions scientifiques de cette thèse seront présentées dans les deux chapitres suivants.

2

Optimisation des dimensions de l'AS/RS multi allées

Sommaire

2.1	Introduction	31
2.2	Métaheuristiques	32
2.2.1	Algorithmes génétiques	33
2.3	Description de l'AS/RS multi allées	34
2.4	Fonctionnement de l'AS/RS multi allées	35
2.5	Modèle mathématique du temps de cycle de l'AS/RS multi allées	37
2.5.1	Notations	37
2.5.2	Hypothèses	38
2.5.3	Modèle continu du temps moyen de simple cycle de l'AS/RS multi allées	38
2.5.4	Modèle continu du temps moyen de déplacement entre deux casiers de l'AS/RS multi allées	42
2.5.5	Modèle continu du temps multi cycles de l'AS/RS multi allées	46
2.6	Détermination des trois dimensions optimales de l'AS/RS multi allées	46
2.6.1	Formulation du problème	46

Chapitre 2 – Optimisation des dimensions de l'AS/RS multi allées

2.6.2	Résolution du problème	47
2.7	Résultats et interprétations	50
2.8	Conclusion	62

2.1 Introduction

Au niveau du stockage il existe plusieurs paramètres à optimiser, on distingue : l'optimisation des coûts de stockage, l'optimisation des délais de transport entre le lieu de stockage et celui de production, l'optimisation des espaces de stockage (les entrepôts)...

De nombreuses méthodes et techniques ont été développées pour résoudre les problèmes d'optimisation, elles peuvent être classées en deux grandes catégories : les méthodes exactes et les méthodes approximatives. Les méthodes exactes sont utilisées pour trouver des solutions aux problèmes d'optimisation de taille raisonnable. Par exemple, dans (Kouloughli & Sari, 2015), les auteurs ont utilisé des méthodes exactes pour résoudre le problème d'optimisation des dimensions d'un AS/RS multi allées pour un temps de simple cycle minimal ensuite pour un temps de double cycle minimal lorsque les opérations de stockage et de déstockage se font dans la même allée. Cependant les méthodes exactes atteignent rapidement leurs limites, lorsque la taille du problème est importante.

Dans notre cas, la taille des équations du temps multi cycle est grande. Ceci rend le calcul analytique difficile c'est pourquoi nous utilisons une métaheuristique pour déterminer les dimensions optimales de l'AS/RS multi allées.

Dans ce chapitre nous nous intéressons à l'optimisation des espaces et des dimensions de stockage. Nous proposons de minimiser le temps multi cycles de l'AS/RS multi allées en utilisant la métaheuristique algorithme génétique.

Les travaux présentés dans ce chapitre, ont fait l'objet d'une publication internationale (Fandi et al., 2022). et d'une communication internationale.

Dans la section 2.2 nous allons voir des généralités sur les métaheuristiques et une définition des algorithmes génétiques, une description de l'AS/RS multi allées est présentée dans la section 2.3, son fonctionnement dans la section 2.4, une présentation des modèles mathématiques du temps de cycle de l'AS/RS multi allées. On présentera d'abord le modèle continu du temps de simple cycle, le modèle continu du temps de déplacement entre deux casiers et le modèle continu du temps multi cycles dans la section 2.5. Dans la section 2.6 nous traitons le problème d'optimisation des dimensions de l'AS/RS multi allées. Nous commencerons par formuler le problème ensuite nous présenterons la méthode de résolution pour enfin étaler les résultats obtenus dans la section 2.7. Nous terminerons par une conclusion dans la section 2.8.

2.2 Métaheuristiques

Les métaheuristiques sont utilisées pour résoudre des problèmes d'optimisation par le processus de recherche de solutions optimales à un problème particulier. Le processus de recherche peut être effectué en utilisant un ensemble de règles ou d'équations mathématiques au cours de multiples itérations. Ces itérations se poursuivent jusqu'à ce que la solution trouvée réponde à un critère prédéfini. Cette solution finale (solution quasi optimale) est dite optimale et le système est considéré comme ayant atteint un état de convergence (Yang et al., 2014).

Selon (Wang & Chou, 2010) les métaheuristiques ont été définies comme suit :

Définition 1: une heuristique est une méthodologie de raisonnement dans la résolution de problèmes qui permet de trouver une solution à un problème par essai-erreur (trial-and-error).

Définition 2: une métaheuristique est une heuristique générique ou de niveau supérieur qui permet de résoudre des problèmes de manière plus générale.

Définition 3: l'informatique métaheuristique est une informatique adaptative qui applique des règles heuristiques générales pour résoudre une catégorie de problèmes informatiques.

La plupart des métaheuristiques sont inspirées de la nature car elles ont été développées sur la base d'une certaine abstraction de la nature. Deux composantes majeures de tout algorithme métaheuristique sont : l'exploration et l'exploitation (également appelées diversification et intensification, divergence et convergence) sont deux caractéristiques communes et fondamentales de toute méthode d'optimisation. Cependant, elles dépendent fortement de la philosophie de recherche adoptée par chaque métaheuristique. Ces deux caractéristiques sont considérées comme les pierres angulaires de la résolution d'un problème d'optimisation avec succès (Črepinšek et al., 2013).

L'exploration est la capacité d'étendre la recherche dans un domaine étendu pour explorer des zones non visitées, tandis que l'exploitation, via l'expérience de recherche accumulée, permet de concentrer les régions prometteuses (solutions de haute qualité) pour les utiliser et les faire converger de manière optimale (Khajehzadeh et al., 2011). Un bon équilibre entre l'exploration et l'exploitation doit être trouvé lors de la sélection des meilleures solutions pour améliorer le taux de convergence de l'algorithme. La sélection des meilleures solutions garantit que les solutions convergeront vers l'optimum, tandis que la diversification ou la randomisation permet à la recherche de s'éloigner des optimaux locaux et en même temps, augmente la diversité des solutions. Une bonne combinaison de ces deux composantes majeures permet généralement d'atteindre l'optimalité globale.

Il existe différents paramètres pour classer les métaheuristiques. On peut les classer comme : métaheuristiques à solution unique et métaheuristiques à population de solution

Métaheuristique à solution unique : sont toutes basées sur un algorithme de recherche de voisinage qui commence avec une solution initiale, puis l'améliore pas à pas en choisissant une nouvelle solution dans son voisinage. Parmi ces méthodes : le recuit simulé et la recherche tabou.

Métaheuristique à population de solution : les méthodes d'optimisation à population de solutions améliorent, au fur et à mesure des itérations, une population de solutions. L'intérêt de ces méthodes est d'utiliser la population comme facteur de diversité. Comme les algorithmes génétiques.

Les algorithmes génétiques sont les algorithmes évolutionnaires les plus populaires, avec une gamme variée d'applications. (Yang, 2011)

Beaucoup de problèmes d'optimisation dans le domaine des AS/RS ont été résolus par des algorithmes génétiques. En outre, les algorithmes génétiques sont basés sur la population et de nombreux algorithmes évolutionnaires modernes sont directement basés sur les algorithmes génétiques ou présentent de fortes similitudes avec ces derniers.

Dans ce travail nous choisissons d'utiliser la métaheuristique algorithme génétique pour trouver les dimensions optimales de l'AS/RS multi allées

2.2.1 Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (AG), ont été développés par John Holland et ses collaborateurs dans les années 1960 et 1970, ce sont un modèle ou une abstraction de l'évolution biologique basée sur la théorie de la sélection naturelle de Charles Darwin.

Holland a été le premier à utiliser le croisement, la recombinaison, la mutation et la sélection dans l'étude des systèmes adaptatifs et artificiels. Ces opérateurs génétiques sont les composants essentiels des algorithmes génétiques en tant que stratégie de résolution de problèmes.

Les algorithmes génétiques impliquent le codage des solutions sous forme de tableaux de bits ou de chaînes de caractères (chromosomes). L'algorithme génétique manipule de façon aléatoire une population initiale de solutions (chromosomes) et évalue ensuite leur performance relative (fitness). Sur la base de ces performances, une nouvelle population de solutions est créée à l'aide d'opérateurs évolutionnaires simples : sélection, croisement et mutation. Ce cycle est répété jusqu'à ce qu'une solution satisfaisante soit trouvée.

Les algorithmes génétiques utilisent le concept de populations d'individus pour résoudre les problèmes d'optimisation, ce principe permet d'obtenir plusieurs solutions optimales ou quasi optimales.

2.3 Description de l'AS/RS multi allées

Un AS/RS multi allées est composé d'un ensemble de racks fixes, disposés par paires de manière parallèle et séparés par des allées. Chacune de ces allées, appelée allée de service, donne accès à deux racks. Une allée commune, perpendiculaire aux racks, relie toutes les allées de service. Une machine de stockage/déstockage dessert tous les racks.

La machine S/R se déplace, simultanément, dans le sens vertical et horizontal (déplacement de Tchebychev) aussi bien dans les allées de service que dans l'allée commune. La machine S/R est capable de circuler sur deux axes horizontaux (sur l'allée de service et sur l'allée commune) et un axe vertical (les colonnes).

L'AS/RS multi allées utilise une machine S/R à simple navette et à faible débit. Ce dernier peut être augmenté en utilisant une machine multi navettes. L'un des principaux avantages de l'AS/RS multi allées est son coût réduit. L'utilisation d'une seule machine S/R réduit le coût du système par rapport à d'autres types d'AS/RS. Cela reste vrai lorsqu'on utilise une machine S/R multi navettes.

Dans l'état initial, la machine S/R se trouve toujours à la station D/L. À la fin de chaque cycle (qui peut comprendre plusieurs opérations), la machine S/R revient à la position initiale.

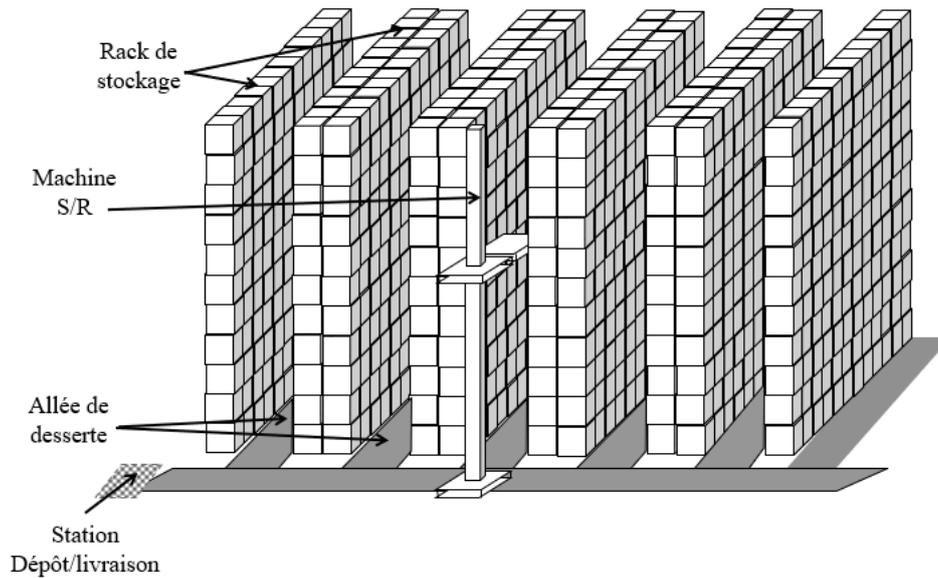


Figure 2.1: Description de l'AS/RS multi allées

2.4 Fonctionnement de l'AS/RS multi allées

Il existe deux types de machines S/R : la machines S/R à simple navette et la machines S/R multi navettes. La machine S/R à simple navette peut transporter une seule palette à la fois. On dit que sa capacité est égale à un. Ainsi, ce type de machine S/R peut fonctionner soit en simple cycle, soit en double cycle. Dans un cycle simple, la machine S/R effectue une opération de stockage ou de déstockage et retourne à la station D/L. En revanche, dans un double cycle, elle effectue une opération de stockage suivie d'une opération de déstockage et retourne à la station D/L.

La machine S/R multi navettes peut transporter plus d'une palette à la fois. Disons qu'elle peut transporter au maximum n palettes. Elle peut alors fonctionner en simple cycle, double, triples... ($2n$). Cela signifie que, si la capacité de la machine S/R est n , elle peut effectuer au maximum n opérations de stockage et n opérations de déstockage dans le même cycle. Le temps nécessaire à l'exécution de ce cycle est équivalent au temps d'un simple cycle plus $(2n - 1)$ fois le temps déplacement entre deux casiers.

Afin de trouver une formule générale pour estimer le temps multi cycles, nous introduisons, dans la suite, le paramètre k . Ce dernier est le nombre d'opérations effectuées par une machine S/R de capacité n , dans le même cycle. k est nécessairement inférieur ou égal à $2n$.

Dans la forme la plus simple des machines S/R, qui est celle des machines S/R à simple navette ($n = 1$), k peut être égal soit à un, si la machine exécute un simple cycle, soit à deux si elle exécute un double cycle.

Dans le cas où la machine S/R peut prendre deux palettes en même temps ($n = 2$), alors, k peut prendre les valeurs : 1, 2, 3 et 4. Et ainsi de suite.

Le temps nécessaire à l'exécution d'un cycle où la machine S/R effectue k opérations de stockage et de déstockage est équivalent à un temps de simple cycle ($E(SC)$) plus $(k-1)$ fois le temps nécessaire pour aller de l'emplacement de stockage à l'emplacement de déstockage (temps de déplacement entre deux casiers dans le système AS/RS multi allées ($E(TB)$)).

Le temps moyen multi cycles est exprimé comme suit:

$$E (MC) = E (SC) + (k - 1) .E (TB) \quad (2.1)$$

Dans la littérature, la plupart des chercheurs qui se sont intéressés au système AS/RS à multi navettes ont considéré des machines S/R avec une capacité de deux ou trois. Cela implique que les machines S/R peuvent avoir une performance maximale soit en cycle quadruple, soit en cycle sextuple.

Dans la figure ci-dessous, nous représentons un cycle de la machine S/R qui comprend quatre opérations. Nous avons considéré dans cette figure que les quatre opérations ont lieu dans la même allée. Ceci n'est qu'un cas particulier. Dans le cas général, les casiers de stockage et déstockage peuvent ne pas être sur la même allée.

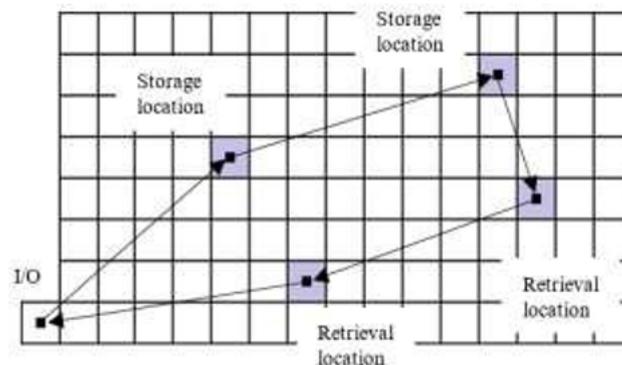


Figure 2.2: Temps de cycle quadruple

2.5 Modèle mathématique du temps de cycle de l'AS/RS multi allées

2.5.1 Notations

Avant d'entamer notre étude, nous allons définir les différents termes que nous utiliserons pour la présentation des modèles.

- M : Nombre de racks dans un AS/RS multi allées.
- $\frac{M}{2}$: Nombre d'allées dans l'AS/RS.
- N_L : Nombre de casiers par ligne.
- N_H : Nombre de casiers par colonne.
- N : Nombre total de casiers.
- t_h : Temps de déplacement horizontal du premier casier au dernier d'un rack.
- t_v : Temps de déplacement vertical du premier casier au dernier d'un rack.
- t_p : Temps de déplacement de la première à la dernière allée.
- t'_p : Temps de déplacement d'une allée à une allée adjacente.
- t'_h : Temps de déplacement horizontal d'un casier au suivant.
- t'_v : Temps de déplacement vertical d'un casier au suivant.
- $E(SC)$: Temps moyen de simple cycle.
- $E(DC)$: Temps moyen de double cycle.
- $E(TB)$: Temps moyen de déplacement entre deux casiers.
- $E(MC)$: Temps moyen multi cycles.
- n : Capacité de la machine S/R, c'est-à-dire le nombre de palettes que la machine S/R peut transporter à la fois.
- k : Nombre d'opérations par cycle ; c'est-à-dire que k est égal au maximum à $2.n$

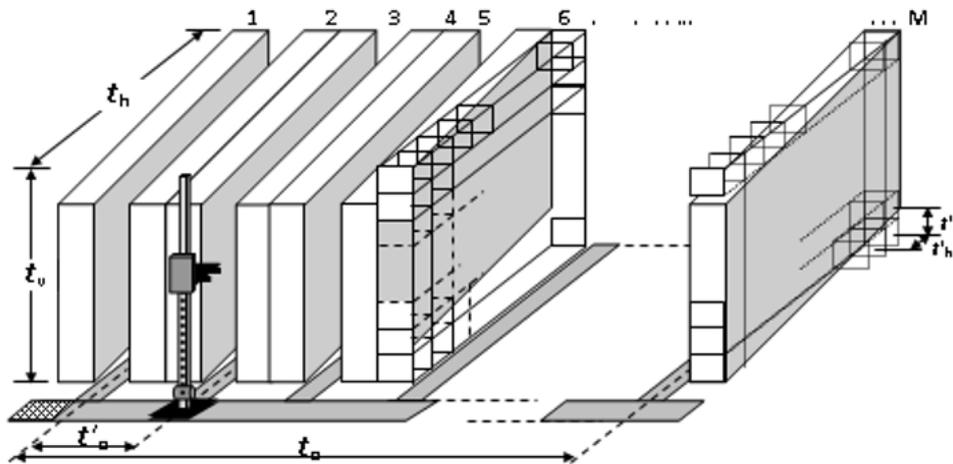


Figure 2.3: Représentation des notations utilisées

2.5.2 Hypothèses

- L'AS/RS est composé de M racks, $\frac{M}{2}$ allées et N casiers avec $N = M \cdot N_L \cdot N_H$.
- La machine S/R se déplace simultanément dans les directions verticale et horizontale, c'est ce qu'on appelle le déplacement de Tchebychev.
- Les temps de chargement/déchargement des palettes et l'accélération/décélération de la machine S/R sont négligés.
- La probabilité d'accès à tout emplacement du système est la même, et la méthode de stockage et de déstockage est aléatoire.
- La station de dépôt et de livraison D/L est située dans le coin inférieur gauche du rack.

2.5.3 Modèle continu du temps moyen de simple cycle de l'AS/RS multi allées

Les auteurs (Ghomri et al., 2009) ont utilisé une approche continue pour modéliser le temps moyen d'un simple cycle pour l'AS/RS multi allées. Le temps de simple cycle de la machine S/R est le temps nécessaire pour aller du point de dépôt/livraison au casier de stockage ou déstockage plus le temps nécessaire pour retourner de ce casier au point de dépôt/livraison

La figure 2.5 représente une vue de haut de l'AS/RS multi allées. Cette figure montre que le temps de déplacement horizontal de la machine S/R noté SC_H , est la somme de deux déplacements notés respectivement SC_{H1} et SC_{H2} .

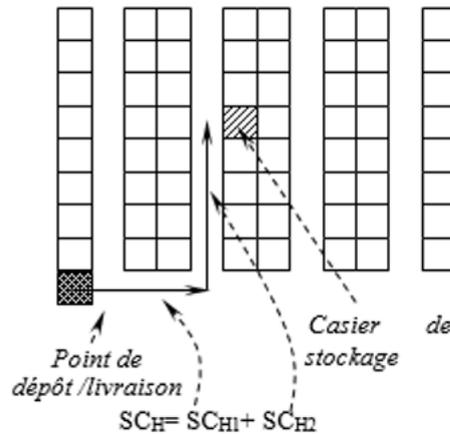


Figure 2.4: Déplacement horizontal de la machine S/R. (Ghomri et al., 2009)

Nous présentons dans ce qui suit les principales étapes de calcul des expressions continues du temps de simple cycle de l'AS/RS multi allées développées par (Ghomri et al., 2009) :

SC_{H1} et SC_{H2} représentent des durées de déplacement. Chacune de ces deux variables est une variable aléatoire discrète de distribution uniforme. Les figures a et b représentent les distributions uniformes discrètes respectives de SC_{H1} et SC_{H2} .

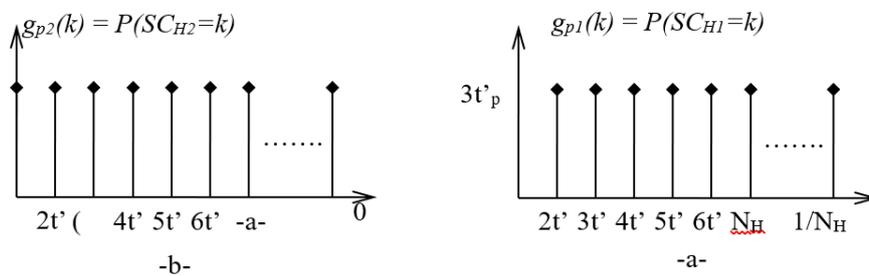


Figure 2.5: a- Distribution discrète exacte de la variable SC_{H1} b- Distribution discrète exacte de la variable SC_{H2}

Ces distributions discrètes exactes sont approchées par les distributions uniformes continues dans les figures 2.6

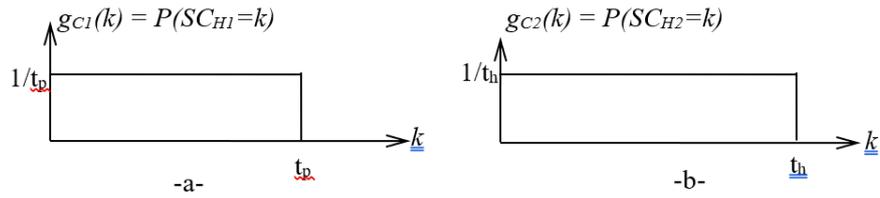


Figure 2.6: a- Distribution continue approchée de la variable SC_{H1} b- Distribution continue approchée de la variable SC_{H2}

Puisque le déplacement horizontal de la machine S/R est la somme de deux déplacements, comme suit

$$SC_H = SC_{H1} + SC_{H2} \quad (2.2)$$

Ceci implique, que la distribution de la variable SC_H (noté $g_c(k)$) est le produit de convolution des fonctions $g_{c1}(k)$ et $g_{c2}(k)$, les distributions respectives des variables SC_{H1} et SC_{H2} .

$$g_c(k) = g_{c1}(k) \cdot g_{c2}(k) \quad (2.3)$$

$$= \int_0^x g_{c1}(k) \cdot g_{c2}(x - k) dk \quad (2.4)$$

La distribution du déplacement horizontal total de la machine S/R (figure 2.9) est la convolution des distributions de SC_{H1} et SC_{H2} .

Après calcul de ce produit de convolution, on trouve l'expression suivante :

$$\begin{cases} \frac{k}{t_p t_h} & k < \min(t_p, t_h) \\ \frac{1}{\max(t_p, t_h)} & k < \max(t_p, t_h) \\ \frac{t_p + t_h - k}{t_p t_h} & k < t_p + t_h \\ 0 & \text{Ailleurs} \end{cases} \quad (2.5)$$

La distribution du déplacement vertical est comme suit:

$$h_c(k) = \begin{cases} \frac{1}{t_v} & k < t_v \\ 0 & \text{Ailleurs} \end{cases} \quad (2.6)$$

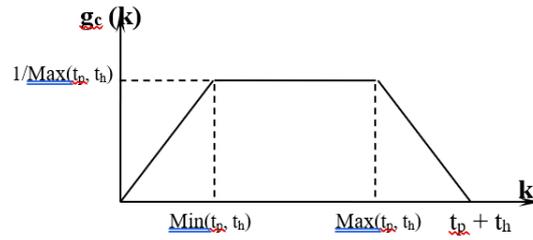


Figure 2.7: Distribution aléatoire de la variable SC_H modélisant le déplacement horizontal de la machine S/R

La distribution du déplacement vertical est une distribution continue approchée, obtenue à partir d'une distribution discrète, de la même manière que pour les expressions continues de SC_{H1} et SC_{H2} .

Puisque le temps de déplacement total de la machine S/R est le maximum entre le déplacement horizontal et le déplacement vertical (déplacement de Tchebychev).

La distribution $f(k)$ du temps de simple cycle de la machine S/R s'écrit comme suit :

$$f_c(k) = g_c(k) \cdot H_c(k) + h_c(k) \cdot G_c(k) \quad (2.7)$$

$$\text{avec } G_c(k) = p(SC_H < k) = \int_{-\infty}^k g_c(t) dt \quad (2.8)$$

$$\text{et } H_c(k) = p(SC_v < k) = \int_{-\infty}^k h_c(t) dt \quad (2.9)$$

Sont respectivement les fonctions de répartition des déplacements horizontal et vertical.

Quatre cas se présentent lors du calcul de la distribution du temps de déplacement (temps de cycle) de la machine S/R.

- 1^{ier} cas : $t_v < \min(t_p, t_h)$
- 2^{ième} cas : $\min(t_p, t_h) < t_v < \max(t_p, t_h)$
- 3^{ième} cas : $\max(t_p, t_h) < t_v < t_p + t_h$
- 4^{ième} cas : $t_v > t_p + t_h$

Pour chacun des quatre cas cités ci-dessus, nous obtenons une expression mathématique du temps de cycle, comme suit :

$$E(SC) = \begin{cases} t_p + t_h + \frac{t_v^3}{12t_p t_h}, 0 < t_v < \min(t_p, t_h) \\ t_p + t_h + \frac{t_v^3}{12t_p t_h} - \frac{(t_v - \min(t_p, t_h))^4}{12t_p t_h t_v}, \min(t_p, t_h) < t_v < \max(t_p, t_h) \\ t_p + t_h + \frac{t_v^3}{12t_p t_h} - \frac{(t_v - \min(t_p, t_h))^4}{12t_p t_h t_v} - \frac{(t_v - \max(t_p, t_h))^4}{12t_p t_h t_v}, \\ \max(t_p, t_h) < t_v < t_p + t_h \\ t_v + \frac{2(t_p + t_h)^2 - t_p t_h}{6t_v}, \text{ Ailleurs} \end{cases} \quad (2.10)$$

Les expressions du modèle du simple cycle, sont des sommes de fonctions polynômiales et de fractions rationnelles elles sont donc continues et donc La fonction $E(SC)$ est continue sur $(\mathbb{R}^* +)^3$. Dans (Kouloughli, 2014) les auteurs ont déjà montré la continuité de la fonction dans le domaine $(\mathbb{R}^* +)^3$.

2.5.4 Modèle continu du temps moyen de déplacement entre deux casiers de l'AS/RS multi allées

Nous présentons les deux cas:

1^{ier} cas: le stockage et le déstockage se font sur la même allée.

Les opérations de stockage et de déstockage sont effectuées dans la même allée. Dans ce cas, le modèle représentant le temps de déplacement entre deux casiers est similaire à celui du modèle de l'AS/RS à charge unitaire, établi par (Bozer & White, 1984) et exprimé comme suit :

$$E(TB) = \frac{T}{3} + \frac{Tb^2}{6} - \frac{Tb^3}{30} \quad (2.11)$$

Avec $T = \max(t_v, t_h)$ et $b = \min(\frac{t_v}{T}, \frac{t_h}{T})$

2^{ème} cas: le stockage et le déstockage se font sur des allées différentes.

Les opérations de stockage et de déstockage sont effectuées dans des allées différentes. Ce cas est schématisé sur la Figure 2.8. Qui montre une vue de haut d'un AS/RS multi-allée.

Le modèle a été développé par (Djellouli & Hassaine, 2008) pour modéliser le temps moyen de déplacement entre deux casiers aléatoires selon une distribution uniforme dans deux allées différentes.

Nous présentons dans ce qui suit les principales étapes de calcul des expressions continues du temps moyen de déplacement entre deux casiers dans deux allées différentes pour l'AS/RS multi allées.

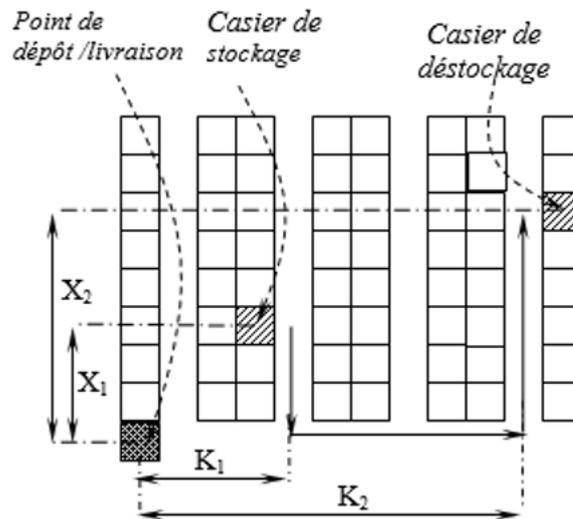


Figure 2.8: Temps de déplacement horizontal entre deux casiers (Djellouli & Hassaine, 2008)

Supposons que le déplacement doit se faire entre le casier de coordonnées (X_1, Y_2) de l'allée K_1 et le casier de coordonnées (X_1, Y_2) de l'allée K_2 .

Notons que les variables X_1, X_2, Y_1, Y_2, K_1 et K_2 sont des durées de déplacement.

$$\text{On a: } E(TB) = \max(TB_H, TB_V) \quad (2.12)$$

Le temps de déplacement horizontal TB_H entre ces deux casiers peut s'écrire sous la forme.

$$TB_H = X_1 + X_2 + |K_1 - K_2| \quad (2.13)$$

Le temps de déplacement vertical TB_V entre ces deux casiers peut s'écrire sous la forme.

$$TB_v = |Y_1 - Y_2| \quad (2.14)$$

Si on considère en plus que les deux casiers de stockage et de déstockage sont aléatoirement choisis. Ceci implique que X_1, Y_1, X_2, Y_2, K_1 et K_2 sont des variables aléatoires dont les distributions sont uniformes discrètes.

De la même manière que pour l'expression du simple cycle, ces distributions discrètes sont approchées par les distributions uniformes continues et en calculant

la distribution du temps de déplacement entre deux casiers et puis son espérance mathématique.

X_1 et X_2 ont la même distribution continue (Figure 2.9.a). La distribution uniforme continue de la variable $X_1 + X_2$ est représenté dans Figure 2.9.b

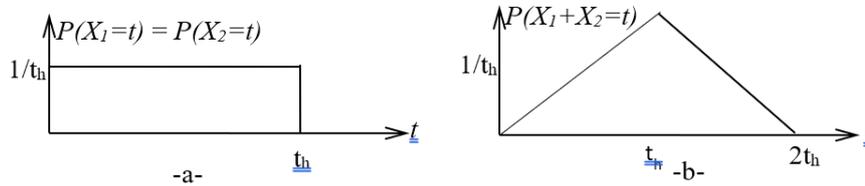


Figure 2.9: a- Distribution continue approchée de la variable X_1 b- Distribution continue approché de la variable $X_1 + X_2$

La fonction de distribution de déplacement $X_1 + X_2$ notée $f(t)$ est la suivante :

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{t_h^2}, & 0 < t \leq t_h \\ \frac{2t_h - t}{t_h^2}, & t_h < t \leq 2t_h \\ 0, & \text{Ailleurs} \end{cases} \quad (2.15)$$

K_1 et K_2 ont la même distribution continue (Figure 2.10.a). La distribution uniforme continue de la variable $(-K_2)$ est représentée dans Figure 2.10.b

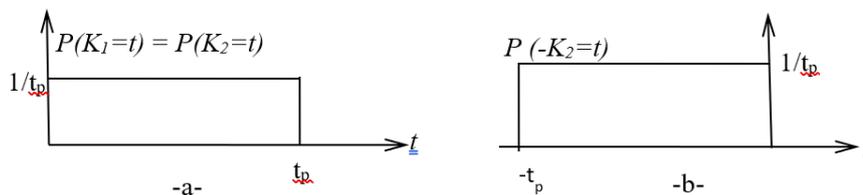


Figure 2.10: a- Distribution continue approchée de la variable K_1 b- Distribution continue approché de la variable $-K_2$

La distribution continue de $(K_1 - K_2)$ est représentée par la Figure 2.11.a. La distribution continue de $|K_1 - K_2|$ est présentée par la Figure 2.11.b

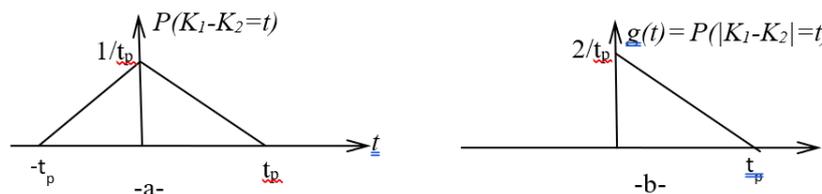


Figure 2.11: a- Distribution continue approchée de la variable $K_1 - K_2$ b- Distribution continue approché de la variable $|K_1 - K_2|$

$$P(K_1 - K_2 = t) = \begin{cases} \frac{t-t_p}{t_p^2}, & -t_p \leq t_p \leq 0 \\ \frac{t_p-t}{t_p^2}, & 0 < t \leq t_p \\ 0, & \text{Ailleurs} \end{cases} \quad (2.16)$$

La fonction de distribution de déplacement $|K_1 - K_2|$ notée $g(t)$ est la suivante :

$$g(t) = \begin{cases} \frac{2t_p-2t}{t_p^2}, & 0 < t < t_p \\ 0, & \text{Ailleurs} \end{cases} \quad (2.17)$$

La fonction distribution de la variable TB_H est donc :

$$P(TB_H = t) = f(t) \cdot g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot g(x-t) dt \quad (2.18)$$

Pour calculer le temps moyen de déplacement entre deux casiers, on utilise la formule suivante :

$$E(TB) = M - \int_0^M F(k) dk \quad (2.19)$$

$F(k)$ c'est la fonction de répartition.

avec $F(k) = G(k) \cdot H(k)$

ou $G(k)$: est la fonction de répartition de déplacement horizontal

et $H(k)$: la fonction de répartition de déplacement vertical

$$G(k) = \int_0^k p(x) \cdot dx \quad \text{et} \quad H(k) = \int_0^k pp(x) \cdot dx \quad (2.20)$$

$p(x)$: est la fonction de distribution du déplacement horizontal avec $p(x)$ est le produit de convolution de la fonction de distribution de déplacement $|K_1 - K_2|$ et de déplacement $X_1 + X_2$.

$pp(x)$: est la fonction de distribution de déplacement vertical $|Y_1 \cup Y_2|$

Plusieurs cas se présentent lors du calcul de la distribution du temps de déplacement TB_H

- 1^{ier} cas : $t_p < t_h$
- 2^{ème} cas : $t_h < t_p < 2t_h$
- 3^{ème} cas : $t_p > 2t_h$

Pour chaque cas nous calculons la fonction de distribution $p(x)$, la fonction de répartition $G(k)$ et $H(k)$, la fonction de répartition $F(k)$ et enfin le temps $E(TB)$.

Finalement pour chacun des trois cas cités ci-dessus, nous obtenons une expression mathématique $E(TB)$ écrite sous la forme de 18 restrictions (Annexes A.1)

2.5.5 Modèle continu du temps multi cycles de l'AS/RS multi allées

Un multi cycles consiste en plusieurs opérations de stockages et de déstockages dans un même cycle. Pour exécuter un multi cycles, la machine S/R effectue un simple cycle et plusieurs temps de déplacement entre deux casiers $E(TB)$.

Le temps nécessaire pour effectuer un multi cycles contenant k opérations est égal au temps de simple cycle plus $k - 1$ temps intermédiaires comme présenté dans l'équation (2.1).

Nous déduisons que la fonction du temps multi cycle est continue sur $(\mathbb{R}^* +)^3$

Notre objectif dans ce chapitre est d'optimiser le temps multi cycles afin de trouver les dimensions optimales de l'AS/RS multi-allées. Pour commencer, nous allons d'abord formuler notre problème.

2.6 Détermination des trois dimensions optimales de l'AS/RS multi allées

2.6.1 Formulation du problème

La conception d'un AS/RS consiste à déterminer son aspect physique. Elle couvre plusieurs aspects importants tels que : le choix du type de système, le nombre d'allées, le nombre de racks, le nombre et le type de machines S/R et les dimensions du système.

Dans ce travail nous nous concentrons sur le type de machine S/R et les dimensions optimales du système AS/RS multi-allées.

L'installation d'un AS/RS multi-allées avec une machine multi navettes coûte environ une fois et demie le coût d'une installation à navette unique (Dube, 2021). Il s'agit d'un investissement important. Cependant, ce dernier doit être rentabilisé. Ceci est garanti si le système multi-navettes améliore significativement le débit du système par rapport à un système à une seule navette. L'un des objectifs de ce travail est d'estimer l'amélioration du débit du système AS/RS multi allées si nous augmentons la capacité de la machine S/R.

Afin de trouver les dimensions optimales de l'AS/RS multi allées, il est nécessaire de trouver un bon équilibre entre la longueur des racks, leur largeur et leur hauteur en minimisant le temps de cycle. La relation entre les dimensions temporelles t_p, t_v et t_h et les distances longueur, largeur et profondeur est évidente car les vitesses horizontale et verticale de la machine S/R sont constantes.

La lourdeur des équations du temps multi cycles rend le calcul analytique exact difficile. C'est pourquoi nous utilisons un algorithme génétique pour déterminer les dimensions optimales de l'AS/RS multi allées.

Contraintes :

Dans notre problème d'optimisation, on a deux types de contraintes :

- Des contraintes d'inégalités liées à la positivité des trois temps de déplacement de la machine de stockage/déstockage :

$$t_p > 0, t_h > 0, t_v > 0 \tag{2.21}$$

t_p ; t_v ; et t_h sont des variables représentant des temps. Elles sont positives et différentes de zéro.

- Une contrainte d'égalité liée à la constance de la taille du système de stockage (nombre total de casiers est constant) :

$$t_p \times t_h \times t_v = \text{constant} \tag{2.22}$$

Prenons cette constante arbitrairement égale à 1 on pourra écrire alors: $t_v = \frac{1}{t_p \times t_h}$

En remplaçant t_v par ses valeurs dans l'équation (2.1), on obtient une nouvelle fonction de deux variables t_p et t_h . Cette nouvelle fonction est la fitness de l'algorithme génétique.

2.6.2 Résolution du problème

L'objectif de ce travail est de minimiser le temps multi cycle de l'AS/RS multi allées afin de trouver les dimensions optimales t_p, t_h et t_v pour ce faire nous allons appliquer l'algorithme génétique. Ce dernier implique la définition du codage du problème, de la population initiale, des concepts de croisement et de mutation ainsi que la détermination de la fonction de fitness, de la taille de la population et du nombre de générations. Ils sont détaillés dans la partie ci-dessous.

- **Codage du problème :**

Les solutions candidates dans un algorithme génétique sont connues sous le nom d'individus ou de chromosomes caractérisés par un ensemble de paramètres (variables) appelés gènes. Ils peuvent être codés en binaire ou en réel. Dans le cas présent, un chromosome est la paire réelle (t_p, t_h) qui représente les dimensions temporelles de l'AS/RS multi allées. Ces dimensions sont disposées dans une séquence spécifique de sorte que t_p se trouve en première position et t_h en deuxième position.

- **Population initiale :**

Nous avons considéré une population initiale de taille 20 et un nombre d'opérations k , qui commence par 1. De plus, chaque chromosome contient des gènes t_p et t_h choisis aléatoirement dans l'intervalle $[0, 3]$.

En outre, le nombre de générations a été fixé à 1000 et une fonction fitness minimale est maintenue pour chaque nouvelle génération.

- **Fonction fitness et sélection des individus :**

La fonction fitness permet de calculer la performance de chaque chromosome à travers l'évaluation du temps de cycle (équation (2.1)). Les chromosomes à reproduire sont sélectionnés en fonction de leur fitness.

Il convient de préciser que 50% des chromosomes présentant les temps de cycle les plus faibles ont été choisis comme population pour la nouvelle génération. Notons également que la sélection des chromosomes parents a été effectuée selon la procédure de sélection par la roulette.

La probabilité de la sélection par roulette est donnée par l'équation ci-dessous :

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^S f_i} \quad (2.23)$$

Où : P_i est la probabilité du chromosome i ; S : est la taille de la population ; f_i : est la fitness du chromosome i ;

La population doit être diversifiée au fil des générations afin d'explorer l'espace de recherche le plus largement possible. Pour ce faire, on utilise les opérateurs de croisement et de mutation.

- **Croisement :**

Une nouvelle population est créée à partir des parents sélectionnés en utilisant des opérateurs de croisement. Le chromosome parent qui est censé s'accoupler est sélectionné de manière aléatoire, et le nombre de chromosomes accouplés est vérifié à l'aide du paramètre de taux de croisement (pc), dans ce cas, est défini comme étant $pc = 80 \%$.

Dans la littérature, il a été rapporté que plusieurs types de croisements peuvent exister, c'est-à-dire le croisement à un point, le croisement à deux points, le croisement à trois points, etc. Dans notre cas, un croisement à un point a été choisi entre les gènes t_p et t_h .

L'exemple illustré dans la Figure 2.12 montre que le croisement aura lieu entre deux chromosomes parents (i_1 et i_2). En outre, une position de point de coupure a été choisi au point central entre les chromosomes i_1 et i_2 . Les deux sous-chaînes

terminales de chaque chromosome ont ensuite été échangées, produisant ainsi deux enfants i_{01} et i_{02} .

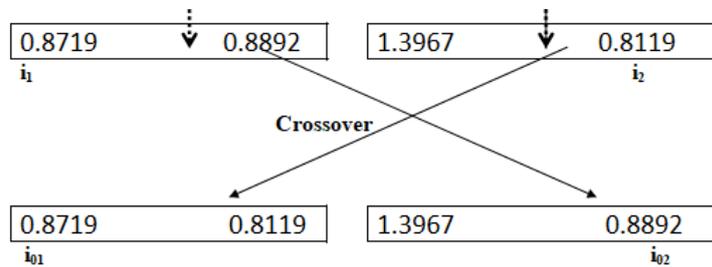


Figure 2.12: Opération de croisement

Ensuite, la nouvelle population subit un processus de mutation pour créer une diversité génétique et éviter les solutions locales.

- **Mutation :**

Le nombre de chromosomes qui présentent des mutations dans une population est déterminé par le paramètre du taux de mutation (ρm). Le processus de mutation est effectué en remplaçant le gène à une position aléatoire par une nouvelle valeur.

Le taux de paramètre de mutation (ρm) a été fixé à 10%, ce qui signifie que 10% du nombre total de gènes de la population devraient subir une mutation. Ensuite, le gène sélectionné (t_p ou t_h) est remplacé par une valeur choisie aléatoirement dans l'intervalle $[0, 3]$.

L'exemple illustré dans la Figure 2.13 montre que le deuxième gène (t_h) du chromosome a subi une mutation et que sa valeur est passée de 0.8891 à 0.8791.

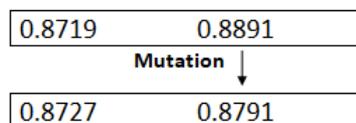


Figure 2.13: Opération de mutation

Finalement les nouveaux chromosomes sont évalués et intégrés à la génération suivante qui, à son tour, subit le même processus que la génération précédente de chromosomes : évaluation, sélection, croisement et mutation. Cela produit alors une nouvelle génération de chromosomes qui sera utilisée dans l'itération suivante. Ce même processus est répété pour les 1000 générations afin d'obtenir le meilleur chromosome.

Les meilleurs chromosomes, qui représentent les dimensions temporelles du système multi-allées pour 1 à 30 opérations sont résumés et discutés dans la section suivante.

2.7 Résultats et interprétations

Dans cette partie nous allons déterminer les dimensions optimales t_p , t_h et t_v obtenues par l'algorithme génétique pour un temps multi cycles. C'est-à-dire pour des opérations de stockages et de déstockages nous allons jusqu'à $k=30$. Dans les deux situations :

Le premier cas ou la machine S/R multi navettes effectue des opérations de stockage et de déstockage qui se font sur la même allée et le deuxième cas ou la machine S/R multi navettes effectue des opérations de stockage et de déstockage qui se font sur des allées différentes.

1^{er} cas : Stockage et déstockage se font sur la même allée.

Notons pour :

- $k = 1$: l'équation (2.10) du temps de simple cycle est utilisée.
- $k > 1$: l'équation (2.1) du temps multi cycle est utilisée tout en considérant l'équation (2.11) pour $E(TB)$.

Les résultats obtenus, en utilisant l'algorithme génétique pour estimer le temps multi cycles, sont résumés dans le tableau 2.2

Tableau 2.2: Dimensions optimales de l'AS/RS multi allées (stockage et déstockage sur la même allée)

k	t_p	t_h	t_v	$E(MC)$
1	0.8710	0.8762	1.3103	1.9868
2	0.9963	0.8334	1.2043	2.4876
3	1.1146	0.8004	1.1210	2.9563
4	1.2360	0.7743	1.0448	3.3985
5	1.3407	0.7558	0.9869	3.8179
6	1.4610	0.7342	0.9323	4.2177
7	1.5785	0.7159	0.8849	4.6007
8	1.6936	0.6978	0.8462	4.9691
9	1.8076	0.6777	0.8164	5.3247
10	1.9236	0.6614	0.7860	5.6691
11	2.0214	0.6514	0.7594	6.0035

12	2.1279	0.6402	0.7341	6.3289
13	2.2501	0.6234	0.7129	6.6462
14	2.3391	0.6123	0.6982	6.9561
15	2.4218	0.6051	0.6824	7.2594
16	2.5441	0.5917	0.6643	7.5564
17	2.6259	0.5871	0.6487	7.8477
18	2.7283	0.5761	0.6362	8.1337
19	2.8218	0.5688	0.6230	8.4148
20	2.9040	0.5625	0.6122	8.6913
21	2.9852	0.5549	0.6037	8.9634
22	3.0816	0.5452	0.5952	9.2314
23	3.1722	0.5404	0.5833	9.4956
24	3.2789	0.5310	0.5743	9.7562
25	3.3406	0.5272	0.5678	10.0133
26	3.4102	0.5215	0.5623	10.2673
27	3.5247	0.5140	0.5520	10.5180
28	3.6044	0.5082	0.5459	10.7658
29	3.7046	0.5030	0.5366	11.0109
30	3.7744	0.4997	0.5302	11.2532

Le tableau récapitule les dimensions temporelles optimales t_p , t_h et t_v ainsi que leurs temps de cycle minimal $E(MC)$ obtenus par l'application de l'algorithme génétique dans le cas où la machine S/R multi-navettes effectue jusqu'à $k=30$ opérations de stockage et de déstockage dans la même allée.

Notons que, dans le cas où $k = 1$, les dimensions optimales t_p, t_h et t_v sont respectivement égales à 0.8710, 0.8761 et 1.3103. Cependant, pour $k = 2$, ces dimensions optimales sont respectivement égales à 0.9963, 0.8334 et 1.2042.

Les résultats obtenus dans le présent travail pour $k = 1$ et $k = 2$ sont en accord avec ceux trouvés par (Kouloughli & Sari, 2015) pour un temps de simple cycle et un temps de double cycle.

Enfin, les dimensions optimales t_p , t_h et t_v sont tracées en fonction du nombre d'opérations k (Figure2.14)

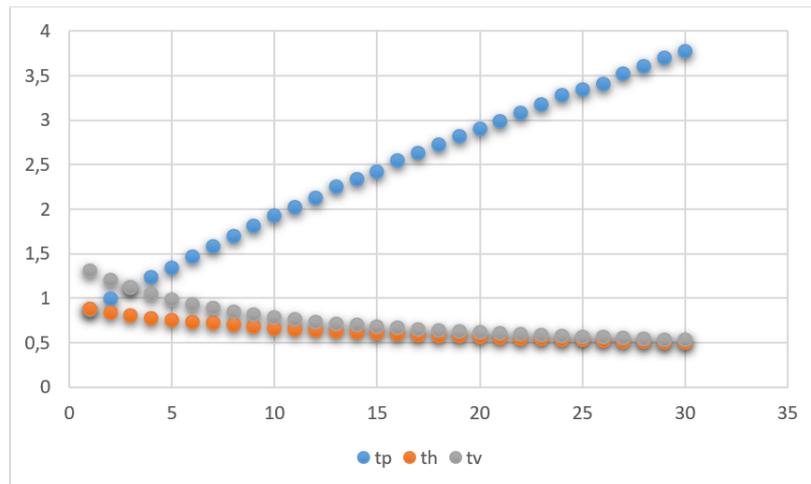


Figure 2.14: Dimensions optimales t_p , t_h et t_v en fonction de k (Stockage et déstockage sur la même allée)

La figure 2.14 montre l'évolution des dimensions t_p , t_h et t_v en fonction du nombre d'opérations k .

Pour $k \in [1, 30]$, on observe que la valeur de t_p augmente continuellement lorsque le nombre d'opérations s'accroît.

Pour $k \in [1, 10]$, les valeurs de t_h et t_v diminuent lorsque le nombre d'opérations augmente.

Pour $k \in [10, 30]$, les dimensions précédentes, continuent à diminuer. Notons que les valeurs de t_h et t_v sont approximatives.

D'autre part, il a été jugé utile de déterminer les fonctions approximatives de t_p et t_h par la méthode des moindres carrés, en utilisant la commande LeastSquares du logiciel Maple. Cela permettrait d'obtenir directement la valeur de la dimension optimale pour un temps multi cycles minimal.

La fonction approximative de t_p donnée par la méthode des moindres carrés est la suivante :

$$t_p(k) \approx t_p = 6.10^{-6}k^3 - 0.0011k^2 + 0.1274k + 0.7429 \quad (2.24)$$

RSD représente le pourcentage de l'écart relatif entre les dimensions de t_p , tel que donnée par l'algorithme génétique, et celles données par la fonction approximative $t_p(k)$. L'écart relatif maximal est égal à 0.9215 %.(Tableau 2.3)

Tableau 2.3: Ecart relatif entre les valeurs optimales de t_p et de la fonction approximative $t_p(k)$

k	t_p	$t_p(k)$	RSD
1	0.8710	0.8690	-0.2275
2	0.9963	0.9931	-0.3254
3	1.1146	1.1151	0.0518
4	1.2360	1.2350	-0.0854
5	1.3407	1.3530	0.9215
6	1.4610	1.4690	0.5506
7	1.5785	1.5831	0.2925
8	1.6936	1.6953	0.1050
9	1.8076	1.8057	-0.1024
10	1.9236	1.9143	-0.4820
11	2.0214	2.0212	-0.0140
12	2.1279	2.1263	-0.0777
13	2.2501	2.2297	-0.9075
14	2.3391	2.3314	-0.3276
15	2.4218	2.4316	0.4036
16	2.5441	2.5302	-0.5482
17	2.6259	2.6272	0.0493
18	2.7283	2.7227	-0.2019
19	2.8218	2.8168	-0.1777
20	2.9040	2.9095	0.1874
21	2.9852	3.0008	0.5213
22	3.0816	3.0907	0.2944
23	3.1722	3.1792	0.2225
24	3.2789	3.2666	-0.3741
25	3.3406	3.3527	0.3616
26	3.4102	3.4376	0.8029
27	3.5247	3.5214	-0.0933
28	3.6044	3.6040	-0.0102
29	3.7046	3.6855	-0.5140
30	3.7744	3.7660	-0.2214

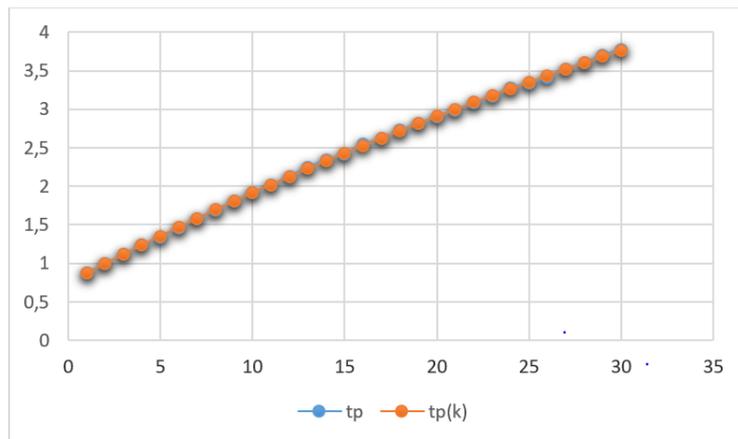


Figure 2.15: Comparaison entre les dimensions optimales de t_p et celles données par la fonction approximative $t_p(k)$

La fonction approximative de t_h , telle qu'elle est donnée par la méthode des moindres carrés, s'exprime comme suit :

$$t_h(k) \approx t_h = -6.10^{-9}k^5 + 9.10^{-5}k^4 - 6.10^{-5}.k^3 + 0.0018k^2 - 0.0377k + 0.9046 \quad (2.25)$$

Tableau 2.4: Ecart relatif entre les valeurs optimales de t_h et de la fonction approximative $t_h(k)$

k	t_h	$t_h(k)$	RSD
1	0.8762	0.8686	-0.8567
2	0.8334	0.8360	0.3131
3	0.8004	0.8065	0.7592
4	0.7743	0.7797	0.6919
5	0.7558	0.7554	-0.0575
6	0.7342	0.7333	-0.1230
7	0.7159	0.7132	-0.3685
8	0.6978	0.6950	-0.3986
9	0.6777	0.6784	0.1099
10	0.6614	0.6632	0.2771
11	0.6514	0.6493	-0.3278
12	0.6402	0.6365	-0.5743
13	0.6234	0.6247	0.2045
14	0.6123	0.6137	0.2321

15	0.6051	0.6035	-0.2548
16	0.5917	0.5940	0.3842
17	0.5871	0.5851	-0.3445
18	0.5761	0.5766	0.0899
19	0.5688	0.5686	-0.0263
20	0.5625	0.5610	-0.2609
21	0.5549	0.5538	-0.2008
22	0.5452	0.5468	0.2938
23	0.5404	0.5401	-0.0541
24	0.5310	0.5337	0.4987
25	0.5272	0.5275	0.04862
26	0.5215	0.5215	-0.0037
27	0.5140	0.5157	0.3292
28	0.5082	0.5101	0.3668
29	0.5030	0.5047	0.3384
30	0.4997	0.4995	-0.0362

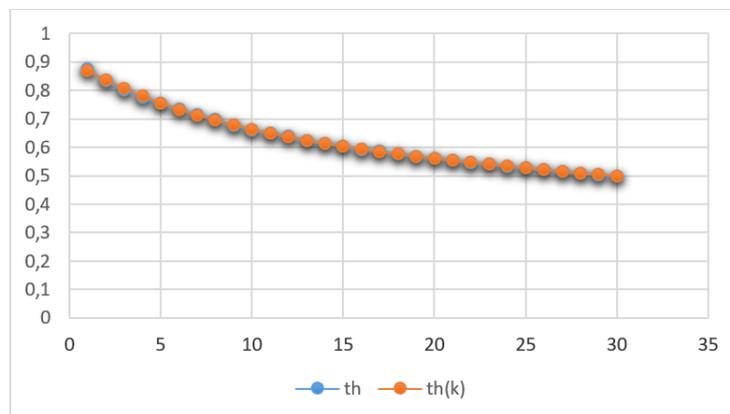


Figure 2.16: Comparaison entre les dimensions optimales de t_h et celles données par la fonction approximative $t_h(k)$

Par conséquent, la forme de la fonction approximative de t_v peut être déduite de la Figure 2.14 dans laquelle on peut voir que le nuage de points correspondant aux valeurs optimales de t_h a la même forme que celle des points correspondant aux valeurs optimales de t_v .

Puisque $t_h(k)$ est un polynôme de degré 5, la fonction $t_v(k)$ l'est également.

La fonction approximative de t_v , donnée par la méthode des moindres carrés, est :

$$t_v(k) \approx t_v = -2.10^{-8}k^5 + 4.10^{-6}k^4 - 0.0002.k^3 + 0.0068k^2 - 0.1111k + 1.4025 \quad (2.26)$$

Comme cela a été fait précédemment pour le calcul de l'écart relatif pour $t_p(k)$ et $t_h(k)$, l'écart relatif maximal entre t_v et $t_v(k)$ a été trouvé égal à 1,2921 %.

2^{ème} cas : le stockage et le déstockage se font sur des allées différentes

Notons pour :

- $k = 1$: l'équation (2.10) du temps de simple cycle est utilisée.
- $k > 1$: l'équation (2.1) du temps multi cycles est utilisée tout en considérant l'ensemble des 18 équations de $E(TB)$ (Annexes A.1).

Les résultats obtenus, en utilisant l'algorithme génétique pour un temps multi cycle, sont résumés dans le tableau 2.5

Tableau 2.5: Dimensions optimales de l'AS/RS multi allées (stockage et déstockage sur des allées différentes)

k	t_p	t_h	t_v	$E(MC)$
1	0.8771	0.8771	1.2999	1.9868
2	1.0315	0.6617	1.4652	3.0875
3	1.1012	0.5903	1.5385	4.1168
4	1.1236	0.5561	1.6005	5.1237
5	1.1431	0.5361	1.6318	6.1204
6	1.1689	0.5180	1.6515	7.1118
7	1.1731	0.5072	1.6808	8.1001
8	1.1841	0.5027	1.6799	9.0863
9	1.1818	0.4967	1.7037	10.071
10	1.1879	0.4923	1.7099	11.0547
11	1.1918	0.4863	1.7254	12.0377
12	1.1927	0.4861	1.7247	13.0201
13	1.1967	0.4823	1.7327	14.002
14	1.2054	0.4786	1.7335	14.9837
15	1.1968	0.4777	1.7490	15.9652
16	1.2052	0.4732	1.7533	16.9462
17	1.2007	0.4748	1.7541	17.9271
18	1.2106	0.4703	1.7565	18.9077
19	1.2027	0.4716	1.7630	19.8885

20	1.2118	0.4699	1.7559	21.8494
21	1.2059	0.4687	1.7691	21.8494
22	1.2146	0.4682	1.7587	22.8295
23	1.2144	0.4641	1.7745	23.81
24	1.2119	0.4673	1.7657	24.7898
25	1.2169	0.4665	1.7615	25.7702
26	1.2145	0.4649	1.7710	26.7499
27	1.2137	0.4634	1.775	27.7299
28	1.2157	0.4625	1,775	28.7098
29	1.2129	0.4624	1.7829	29.69
30	1.2143	0.4601	1.7811	30.6697

Le tableau récapitule les dimensions temporelles optimales t_p , t_h et t_v ainsi que leurs temps de cycle minimal $E(MC)$ obtenus en appliquant l'algorithme génétique dans le cas où la machine S/R (multi-navettes) effectue jusqu'à $k=30$ opérations de stockage et de déstockages dans des allées différentes.

Les résultats montrent qu'après $k = 16$ opérations, les dimensions optimales sont presque constantes. Notons que $t_h \in [0.4585, 0.4699]$, $t_p \in [1.2059, 1.2178]$ et $t_v \in [1.7559, 1.7910]$.

Enfin, les dimensions optimales t_p , t_h et t_v en fonction de nombre d'opérations k sont tracées dans Figure 2.17.

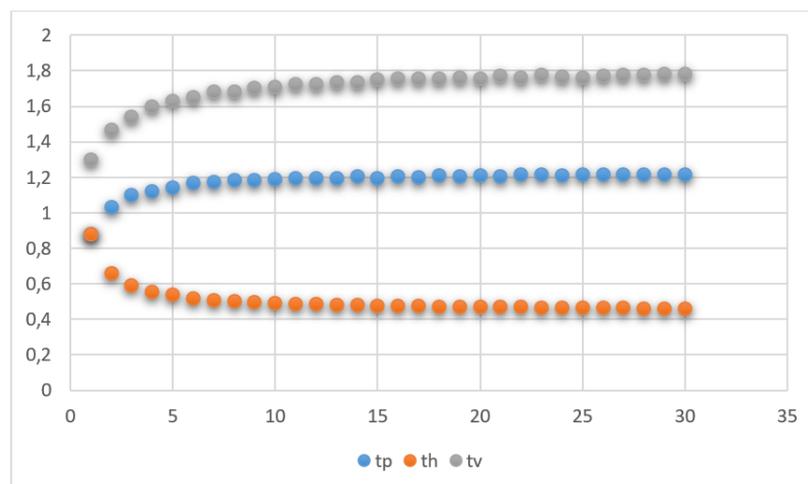


Figure 2.17: Dimensions optimales t_p , t_h et t_v en fonction de k (stockage et déstockage sur des allées différentes)

La figure montre l'évolution des dimensions t_p , t_h et t_v en fonction du nombre d'opération k .

Pour $k \in [1; 16]$, en augmentant le nombre d'opérations, les dimensions de t_p et t_v augmentent alors que celles de t_h diminuent.

Pour $k \in [16; 50]$, les trois dimensions restent quasiment inchangées ($t_h \in [0.4585, 0.4699]$, $t_p \in [1.2059, 1.2178]$ et $t_v \in [1.7559, 1.7910]$).

D'autre part, les fonctions approximatives de t_p et t_h sont déterminées par la méthode des moindres carrés, en utilisant la commande LeastSquares du logiciel Maple. Cela permettrait d'obtenir directement la valeur de la dimension optimale pour un temps multi cycles.

La fonction approximative de t_p donnée par la méthode des moindres carrés est la suivante:

$$t_p(k) \approx t_p = 1.2187(1 - e^{-313k^{0.4708}}) \quad (2.27)$$

RSD représente le pourcentage de l'écart relatif entre les dimensions optimales de t_p , telles que données par l'algorithme génétique, et celles données par la fonction approximative $t_p(k)$. L'écart relatif maximal est égal à 1.5945%. (Tableau 2.6).

Tableau 2.6: Ecart relatif entre les valeurs optimales de t_p et de la fonction approximative $t_p(k)$

k	t_p	$t_p(k)$	RSD
1	0.8771	0.891	1.5945
2	1.0315	1.0214	-0.9782
3	1.1012	1.0842	-1.5444
4	1.1236	1.121	-0.2292
5	1.1431	1.1448	0.1524
6	1.1689	1.1613	-0.65
7	1.1731	1.1731	-0.0048
8	1.1841	1.1885	0.5687
9	1.1818	1.1885	0.5687
10	1.1879	1.1937	0.4878
11	1.1918	1.1978	0.5041
12	1.1927	1.2011	0.7006
13	1.1967	1.2037	0.5871
14	1.2054	1.2059	0.0384
15	1.1968	1.2077	0.9084
16	1.2052	1.2092	0.3317

17	1.2007	1.2104	0.8117
18	1.2106	1.2115	0.0768
19	1.2027	1.2124	0.802
20	1.2118	1.2132	0.1084
21	1.2059	1.2138	0.6581
22	1.2146	1.2144	-0.0171
23	1.2144	1.2149	0.0398
24	1.2119	1.2153	0.2808
25	1.2169	1.2157	-0.1021
26	1.2145	1.216	0.1224
27	1.2137	1.2163	0.21
28	1.2157	1.2165	0.0653
29	1.2129	1.2168	0.3212
30	1.2143	1.2169	0.219

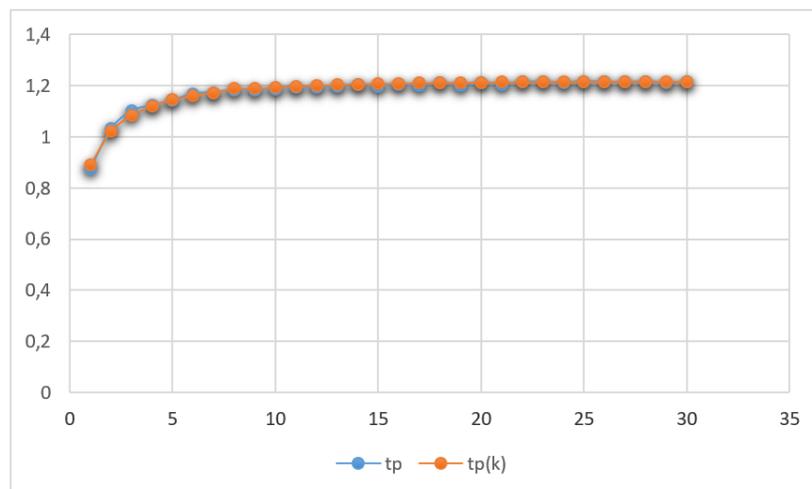


Figure 2.18: Comparaison entre les dimensions optimales de t_p et celles données par la fonction approximative $t_p(k)$

La fonction approximative de t_h donnée par la méthode des moindres carrés est la suivante :

$$t_h(k) \approx t_h = 0.4494 + e^{(-13.3255k^{0.7229} + 0.0071k + 12.4645)} \quad (2.28)$$

RSD représente le pourcentage de l'écart relatif entre les dimensions optimales de t_h , telles que données par l'algorithme génétique, et celles données par la fonction

approximative $t_h(k)$. L'écart relatif maximal est égal à 0.6053%. (Tableau 2.7).

Tableau 2.7: Ecart relatif entre les valeurs optimales de t_h et de la fonction approximative $t_h(k)$

k	t_h	$t_h(k)$	RSD
1	0.8771	0.8752	-0.2174
2	0.6617	0.6657	0.6053
3	0.5903	0.593	0.4693
4	0.5561	0.5562	0.0312
5	0.5361	0.5341	-0.3722
6	0.5180	0.5194	0.2575
7	0.5072	0.5089	0.3367
8	0.5027	0.501	-0.3419
9	0.4967	0.4949	-0.346
10	0.4923	0.4901	-0.4447
11	0.4863	0.4862	-0.0232
12	0.4861	0.4829	-0.6553
13	0.4823	0.4802	-0.4315
14	0.4786	0.4779	-0.1473
15	0.4777	0.4759	-0.3956
16	0.4732	0.4741	0.1803
17	0.4748	0.4726	-0.4699
18	0.4703	0.4712	0.198
19	0.4716	0.47	-0.3369
20	0.4699	0.4689	-0.2168
21	0.4687	0.4679	-0.1701
22	0.4682	0.4671	-0.2314
23	0.4641	0.4663	0.4777
24	0.4673	0.4655	-0.3793
25	0.4665	0.4649	-0.3482
26	0.4649	0.4643	-0.1409
27	0.4634	0.4637	-0.1
28	0.4625	0.4632	-0.0502
29	0.4624	0.4627	0.051
30	0.4601	0.4622	-0.0268

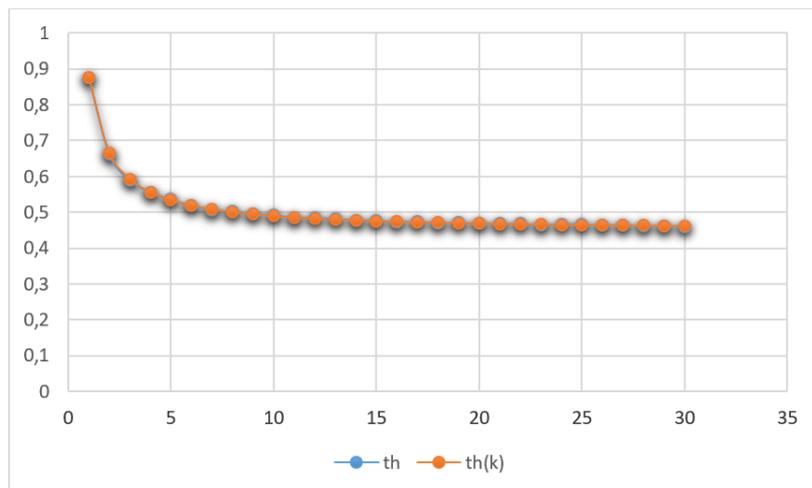


Figure 2.19: Comparaison entre les dimensions optimales de t_h et celles données par la fonction approximative $t_h(k)$

La forme de la fonction approximative de t_v peut donc être déduite de la figure 2.17, dans laquelle on peut voir que le nuage de points correspondant aux valeurs optimales de t_p a la même forme que celle des points correspondant aux valeurs optimales de t_v .

Puisque $t_p(k)$ est une fonction exponentielle croissante, $t_v(k)$ l'est aussi.

La fonction approximative de t_v , telle que donnée par la méthode des moindres carrés est exprimée comme suit :

$$t_v(k) \approx t_v = 1.7960(1 - e^{-1.2960k^{0.3739}}) \quad (2.29)$$

Comme cela a été fait précédemment pour le calcul de l'écart relatif pour $t_p(k)$ et $t_h(k)$, l'écart relatif maximal entre t_v et $t_v(k)$ est égal à 0.6455%.

Nous présentons un schéma récapitulatif des résultats dans la figure 2.20.

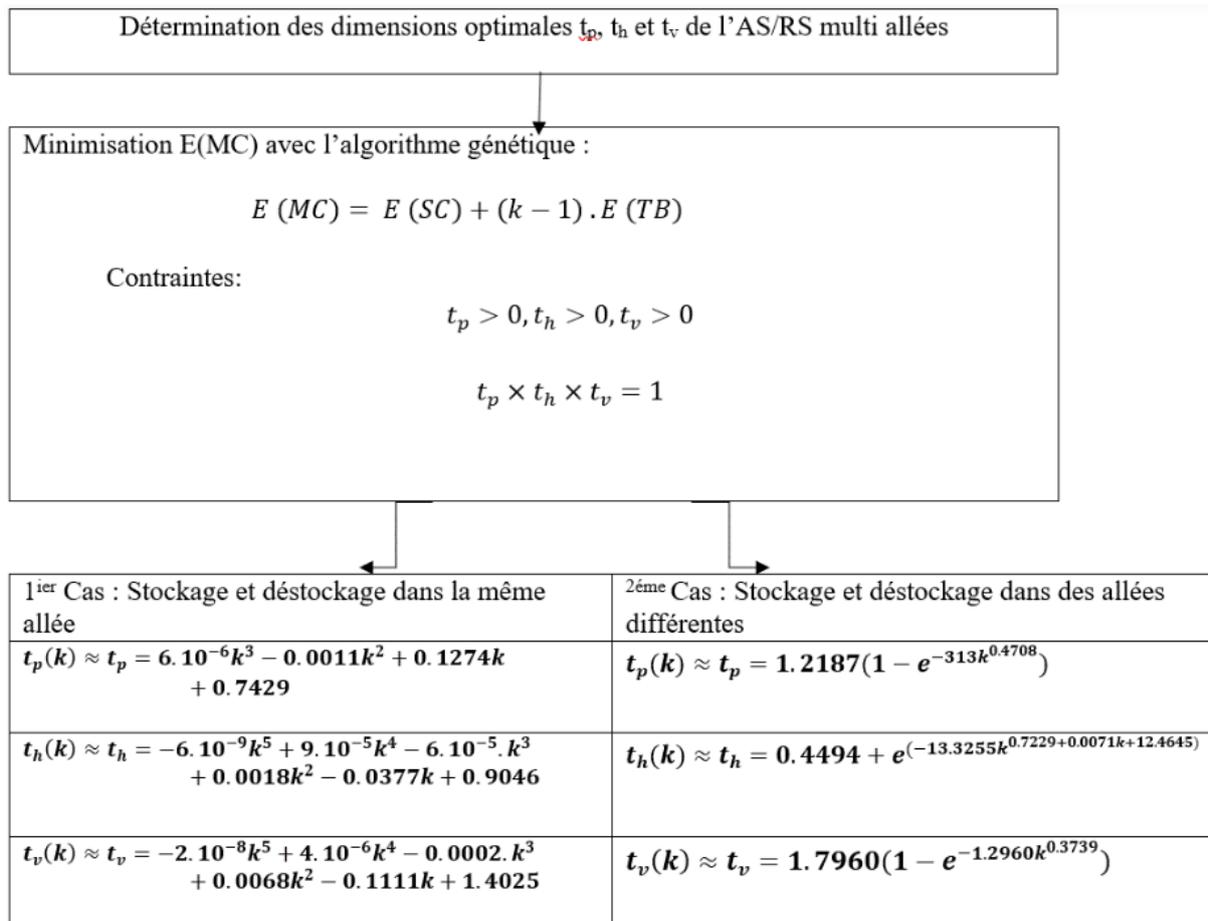


Figure 2.20: Résumé des résultats

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons déterminé des dimensions optimales (t_p , t_h et t_v) que nous proposons lors du choix des dimensions pour la conception de l'AS/RS multi allées avec une machine S/R multi navettes.

Il convient de rappeler que les dimensions optimales ont été déterminées par la minimisation du temps multi-cycles en appliquant l'algorithme génétique, et en considérant que le nombre de casiers du système est constant.

Nous avons fait l'optimisation pour les deux cas. Le premier cas quand la machine S/R effectue des opérations de stockage et de déstockage dans la même allée et le deuxième cas quand la machine S/R effectue des opérations de stockage et de déstockage dans des allées différentes.

Pour une évaluation directe des dimensions optimales du système, nous avons décidé de déterminer les fonctions qui relient les solutions optimales (t_p , t_h et t_v) au

nombre d'opérations k , par la méthode des moindres carrés.

Dans le chapitre suivant nous avons le même objectif sauf que le système est différent, nous allons faire une optimisation des dimensions de l'AS/RS à racks glissants pour un temps multi cycles minimal.

3

Optimisation des dimensions de l'AS/RS à racks glissants

Sommaire

3.1	Introduction	66
3.2	Description de l'AS/RS à racks glissants	67
3.3	Fonctionnement de l'AS/RS à racks glissants	67
3.4	Modèle mathématique du temps de cycle de l'AS/RS à racks glissants	68
3.4.1	Notations	68
3.4.2	Modèle continu du temps moyen de simple cycle de l'AS/RS à racks glissants	69
3.4.3	Modèle continu du temps moyen de déplacement entre deux casiers de l'AS/RS à racks glissants	71
3.4.4	Modèle continu du temps moyen multi cycles de l'AS/RS à racks glissants	75
3.5	Détermination des dimensions optimales de l'AS/RS à racks glissants	76
3.5.1	Formulation du problème	76
3.5.2	Résolution du problème	76
3.6	Résultats et interprétations	77

3.7 Conclusion **83**

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions l'AS/RS (Automated Storage Retrieval System) à racks glissants. Ce type de système est une variation de l'AS/RS multi allées. Il permet un gain considérable dans l'espace de stockage grâce à sa structure qui est composée d'un ensemble de racks disposés en parallèles et d'une seule machine de stockage/déstockage (S/R).

La particularité de ce système est que les allées de service n'apparaissent que lorsqu'une opération de stockage ou de déstockage est prévue dans les racks correspondants. Les racks coulisent de manière à libérer un espace entre deux casiers mitoyens qui permettra à la machine S/R d'accéder au rack désiré.

Nous nous intéressons dans ce chapitre à trouver les dimensions temporelles optimales de l'AS/RS à racks glissants qui sont le temps de déplacements dans le sens horizontal t_h , le temps de déplacement dans le sens vertical t_v et le temps de déplacement de la première à la dernière allée t_p pour n'importe quelle valeur donnée du paramètre t_r (temps de glissement des racks). Cela en minimisant le temps multi cycles de la machine S/R.

Pour retrouver la longueur optimale, la profondeur optimale et la hauteur optimale de l'AS/RS, il suffira de connaître la vitesse de transport horizontale et la vitesse de transport verticale de la machine de stockage/déstockage.

En revanche la taille des équations du temps multi cycles est grande. Ceci rend le calcul analytique difficile c'est pourquoi nous utilisons la métaheuristique algorithme génétique pour déterminer les dimensions optimales du système AS/RS à racks glissants.

Dans la section 3.2 nous allons voir une description de l'AS/RS à rack glissant, son fonctionnement dans la section 3.3, une présentation des modèles mathématiques de l'AS/RS à racks glissants qui comprend le modèle continu du temps de simple cycle, ensuite le modèle continu du temps de déplacement entre deux casiers et le modèle continu du temps multi cycles dans la section 3.4. Dans la section 3.5 nous traiterons le problème d'optimisation pour lequel nous allons appliquer l'algorithme génétique pour déterminer les dimensions optimales de l'AS/RS à racks glissants. Nous commencerons par formuler le problème d'optimisation étudié, nous expliquerons par la suite la méthode de résolution et pour finir nous présenterons dans la section 3.6 les résultats obtenus. Nous terminerons par une conclusion dans la section 3.7.

3.2 Description de l'AS/RS à racks glissants

L'AS/RS à racks glissants est un cas particulier de l'AS/RS multi allées. Il est composé d'un ensemble de racks disposés en parallèle et d'une seule machine de stockage /déstockage. La particularité de ce système est que les allées de service n'apparaissent que lorsqu'une opération de stockage ou de déstockage est prévue dans les racks correspondants. Les racks coulissent de manière à libérer un espace entre deux casiers mitoyens et permettra à la machine S/R d'accéder au rack désiré.

Ce type de système permet un gain considérable dans l'espace de stockage grâce à sa structure qui permet d'optimiser l'utilisation de l'espace en réduisant au minimum le nombre d'allées de service. De plus, son coût est réduit par rapport à d'autres types de système grâce à l'utilisation d'une seule machine S/R à simple navette et à faible débit. Ce dernier peut être augmenté en utilisant une machine S/R multi navettes.

A l'état initial, il existe une seule allée de service (allée aléatoire), la machine S/R se trouve toujours à la station D/L. Cette machine se déplace suivant trois axes : verticalement, le long des colonnes formants les racks, horizontalement, le long des allées de desserte et transversalement, le long de l'allée commune. À la fin de chaque cycle (qui peut comprendre plusieurs opérations), la machine S/R revient à la position initiale.

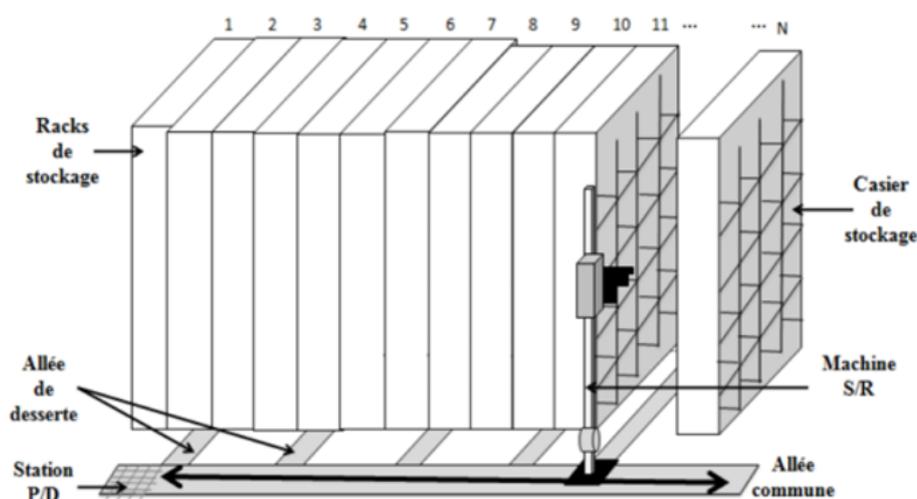


Figure 3.1: Description de l'AS/RS à racks glissants

3.3 Fonctionnement de l'AS/RS à racks glissants

A l'état initial la machine S/R se trouve à la station de D/L, pour une opération de stockage la machine S/R se déplace simultanément dans le sens horizontal et

dans le sens vertical (Chebyshev displacement) jusqu'au casier de stockage en même temps l'allée correspondante au casier de stockage s'ouvre pour que la machine puisse atteindre le casier prévu pour stocker le produit.

Pour une opération de déstockage, la machine S/R se déplace vers le casier où se trouve le produit à déstocker, dès que ce déplacement commence, les racks glissent pour ouvrir l'allée permettant à la machine S/R d'arriver au casier de déstockage, celle-ci récupère le produit à déstocker pour revenir ensuite, à la station D/L.

Dans ce travail nous nous intéressons au fonctionnement de la machine S/R multi navettes et comme on a vu précédemment dans le chapitre2 elle peut transporter au maximum n palettes, ainsi elle peut fonctionner en multi cycles(simple, double, triples cycles...)

Le temps multi cycles de la machine S/R pour l'AS/RS à racks glissants est le même que celui de l'AS/RS multi allées. Il comprend le temps de simple cycle plus $k - 1$ le temps de déplacement entre deux casiers de l'AS/RS à racks glissants. Ceci est exprimé dans l'équation 2.1 du chapitre2.

3.4 Modèle mathématique du temps de cycle de l'AS/RS à racks glissants

3.4.1 Notations

Les principales notations utilisées sont :

- t_r : Temps nécessaire pour l'ouverture d'une allée (ou le temps de glissement des racks).
- t_h : Temps de déplacement horizontal du premier casier au dernier d'un rack.
- t_v : Temps de déplacement vertical du premier casier au dernier d'un rack.
- t_p : Temps de déplacement de la première à la dernière allée.
- $E(SC)$: Temps moyen de simple cycle.
- $E(TB)$: Temps moyen de déplacement entre deux casiers.
- $E(MC)$: Temps moyen multi cycles.
- k : Nombre d'opérations par cycle.

3.4.2 Modèle continu du temps moyen de simple cycle de l'AS/RS à racks glissants

Le temps de simple cycle de l'AS/RS à racks glissants $E(SC)$ comprend : le temps de déplacement de la station D/L vers le casier de stockage/déstockage nommé $E(SC1)$, plus le temps pour retourner vers la station de D/L nommé $E(SC2)$ qui est égal au temps moyen de simple cycle de l'AS/RS multi allées divisé par deux.

Le temps de simple cycle $E(SC)$ est exprimé par la formule suivante :

$$E(SC) = E(SC1) + E(SC2) \quad (3.1)$$

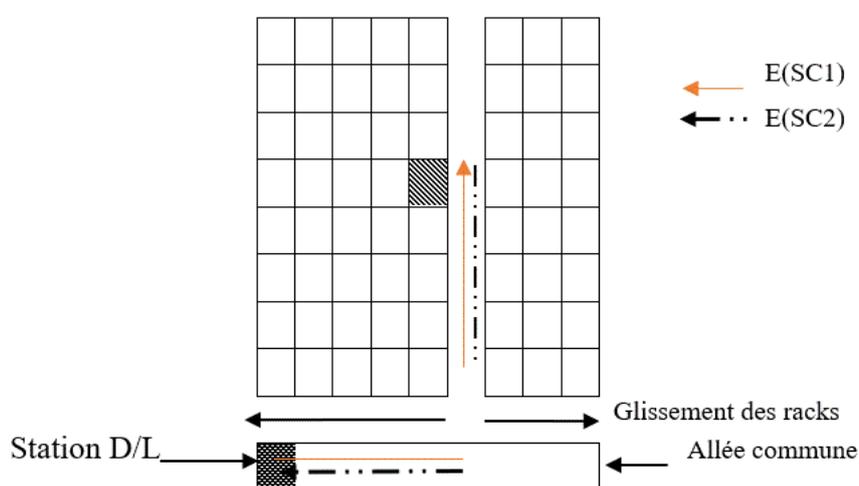


Figure 3.2: Temps de déplacement de simple cycle

Le temps de simple cycle de la machine S/R est décomposé en un ensemble de temps de déplacement de distributions uniformes. A partir de ces distributions, la distribution du temps de simple cycle global est calculé et l'espérance mathématique de cette distribution a donné le temps de simple cycle moyen $E(SC)$ pour l'AS/RS à racks glissants.

L'expression de $E(SC1)$ a été développé par (Kouloughli, 2014) et (Guezzen et al., 2013) est écrite sous la forme de 13 restrictions, et chaque restriction correspond à un domaine de définition spécifique comme montré ci-dessous.

$$E(SC1) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2}t_h + t_r, \text{ si } t_p < t_r \text{ et } t_v \leq t_r \\ \frac{1}{6t_h t_v} (3t_h^2 t_v + 6t_h t_r t_v - t_r^3 + 3t_r^2 t_v - 3t_r^2 t_v - 3t_r t_v^2 + t_v^3), \\ \text{ si } t_p < t_r \text{ et } t_r < t_v \text{ et } t_v \leq t_r + t_h \\ \frac{1}{6t_v} (t_h^2 + 3t_h t_r + 3t_r^2 + 3t_v^2), \text{ si } t_p < t_r \text{ et } t_r + t_h < t_v \\ \frac{1}{2} \frac{t_h t_p + t_p^2 + t_r^2}{t_p}, \text{ si } t_r \leq t_p \text{ et } t_h < t_p - t_r \text{ et } t_v \leq t_r \\ \frac{1}{24t_h t_v t_p} (12t_h^2 t_p t_v + 12t_h t_p^2 t_v + 12t_h t_r^2 t_v + 3t_r^4 + 8t_r^3 t_v - 6t_r^2 t_v^2 + t_v^4), \\ \text{ si } t_r \leq t_p \text{ et } t_h < t_p - t_r \text{ et } t_r < t_v \text{ et } t_v \leq t_r + t_h \\ - \frac{1}{24t_v t_p} (t_h^3 - 4t_h^2 t_v - 12t_h t_p t_v - 6t_h t_r^2 + 6t_h t_v^2 - 12t_p^2 t_v - 8t_r^3 - 4t_v^3), \\ \text{ si } t_r \leq t_p \text{ et } t_h < t_p - t_r \text{ et } t_v \leq t_p \text{ et } t_r + t_h < t_v \\ \frac{1}{24t_v t_p t_h} (t_h^4 - 4t_h^3 t_v - 12t_h^2 t_p t_v - 6t_h^2 t_r^2 + 6t_h^2 t_v^2 - 12t_h t_p^2 t_v - 8t_h t_r^3 - 4t_h t_v^3 + t_p^4 - \\ 4t_p^3 t_v + 6t_p^2 t_v^2 - 4t_p t_v^3 + t_v^4), \\ \text{ si } t_r \leq t_p \text{ et } t_h < t_p - t_r \text{ et } t_p < t_v \text{ et } t_v \leq t_p + t_h \\ \frac{1}{12t_p t_v} (2t_h^2 t_p + 3t_h t_p^2 + 3t_h t_r^2 + 2t_p^3 + 6t_p t_v^2 + 4t_r^3), \\ \text{ si } t_r \leq t_p \text{ et } t_h < t_p - t_r \text{ et } t_p + t_h < t_v \\ \frac{1}{2t_p} (t_h t_p + t_p^2 + t_r^2) \text{ si } t_r \leq t_p \text{ et } t_p - t_r < t_h \text{ et } t_v \leq t_r \\ \frac{1}{24} \frac{(12t_h^2 t_p t_v + 12t_h t_v t_p^2 + 12t_h t_v t_r^2 - 3t_r^4 + 8t_v t_r^3 - 6t_r^2 t_v^2 + t_v^4)}{t_p t_h t_v}, \\ \text{ si } t_r \leq t_p \text{ et } t_p - t_r \leq t_h \text{ et } t_r < t_v \text{ et } t_v \leq t_p \\ \frac{1}{24} \frac{(12t_h^2 t_p t_v + 12t_h t_v t_p^2 + 12t_h t_v t_r^2 - t_p^4 + 4t_p^3 t_v - 6t_p^2 t_v^2 + 4t_p t_v^3 - 3t_r^4 + 8t_r^3 t_v - 6t_r^2 t_v^2)}{t_p t_h t_v}, \\ \text{ si } t_r \leq t_p \text{ et } t_p - t_r \leq t_h \text{ et } t_p < t_v \text{ et } t_v \leq t_r + t_h \\ \frac{1}{24} \frac{(t_h^4 - 4t_h^3 t_v - 12t_p t_v t_h^2 - 6t_h^2 t_r^2 + 6t_h^2 t_v^2 - 12t_h t_p^2 t_v - 8t_h t_r^3 - 4t_h t_v^3 + t_p^4 - 4t_p^3 t_v \\ + 6t_p^2 t_v^2 - 4t_p t_v^3 + t_v^4)}{t_p t_h t_v} \\ \text{ si } t_r \leq t_p \text{ et } t_p - t_r \leq t_h \text{ et } t_r + t_h < t_v \text{ et } t_v \leq t_p + t_h \\ \frac{1}{12t_p t_v} (2t_h^2 t_p + 3t_h t_p^2 + 3t_h t_r^2 + 2t_p^3 + 6t_p t_v^2 + 4t_r^3), \\ \text{ si } t_r \leq t_p \text{ et } t_p - t_r \leq t_h \text{ et } t_p + t_h < t_v \end{array} \right. \quad (3.2)$$

L'expression de $E(SC2)$ a été développée par (Ghomri et al., 2009) est exprimée par la formule suivante:

$$E(SC2) = \begin{cases} \frac{1}{2}t_p + \frac{1}{2}t_h + \frac{t_v^3}{24t_p t_h}, si \\ 0 \leq t_v \text{ et } t_v \leq \min(t_h, t_p) \\ \frac{1}{2}t_p + \frac{1}{2}t_h + \frac{t_v^3}{24t_p t_h} - \frac{(t_v - \min(t_p, t_h))^4}{24t_p t_h t_v}, si \\ \min(t_h, t_p) \leq t_v \text{ et } t_v < \max(t_h, t_p) \\ \frac{1}{2}t_p + \frac{1}{2}t_h + \frac{t_v^3}{24t_p t_h} - \frac{(t_v - \min(t_p, t_h))^4 + (t_v - \max(t_p, t_h))^4}{24t_p t_h t_v}, \\ si \max(t_h, t_p) < t_v \text{ et } t_v < t_p + t_h \\ \frac{1}{2}t_v + \frac{2(t_p + t_h)^2 - t_p t_h}{12t_v}, si t_p + t_h \leq t_v \end{cases} \quad (3.3)$$

3.4.3 Modèle continu du temps moyen de déplacement entre deux casiers de l'AS/RS à racks glissants

(Bakdi & Medkour, 2018) ont développé le modèle continu du temps de déplacement entre deux casiers pour un AS/RS à racks glissants.

Nous présentons dans ce qui suit les principales étapes de calcul des expressions continues du temps moyen entre deux casiers de l'AS/RS à racks glissants.

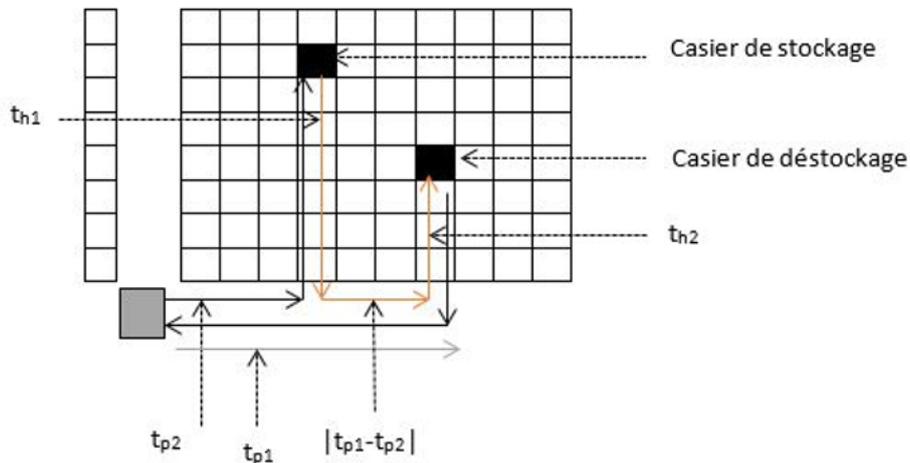


Figure 3.3: Temps de déplacement horizontal entre deux casiers

Le temps de déplacement horizontal de la machine S/R (Figure 3.3) est le temps nécessaire pour aller du casier de stockage vers le casier de déstockage. C'est la somme de deux déplacements indiqués comme suit:

$$X_H = t_h + t_p \quad (3.4)$$

Le temps de déplacement horizontal X_H entre ces deux casiers peut s'écrire sous la forme.

$$X_H = t_{h1} + t_{h2} + |t_{p1} - t_{p2}| \quad (3.5)$$

Le temps de déplacement vertical X_v entre ces deux casiers peut s'écrire sous la forme.

$$X_v = |t_{v1} - t_{v2}| \quad (3.6)$$

Si on considère en plus que les deux casiers de stockage et de déstockage sont aléatoirement choisis. Ceci implique que $t_{h1}, t_{h2}, t_{p1}, t_{p2}, t_{v1}$ et t_{v2} sont des variables aléatoires dont les distributions sont uniformes et discrètes. Ces distributions discrètes sont approchées par les distributions uniformes continues.

t_{h1} et t_{h2} ont la même distribution continue (Figure 3.4.a). La distribution uniforme continue de la variable $t_{h1} + t_{h2}$ est représenté dans Figure 3.4.b

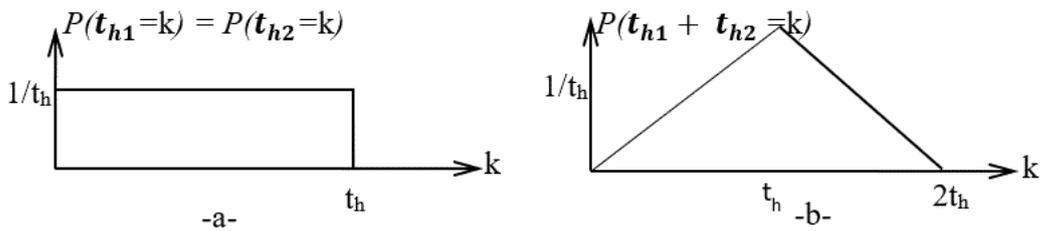


Figure 3.4: a- Distribution continue approchée de la variable t_{h1} b- Distribution continue approchée de la variable $t_{h1} + t_{h2}$

La fonction de distribution de déplacement $t_{h1} + t_{h2}$ notée $f_1(k)$ est la suivante:

$$f_1(k) = \begin{cases} \frac{k}{t_h^2}, & 0 < k \leq t_h \\ \frac{2t_h - k}{t_h^2}, & t_h < k \leq 2t_h \\ 0, & \text{Ailleurs} \end{cases} \quad (3.7)$$

t_{p1} et t_{p2} ont la même distribution continue (Figure 3.5.a). La distribution uniforme continue de la variable $(-t_{p2})$ est représentée dans Figure 3.5.b

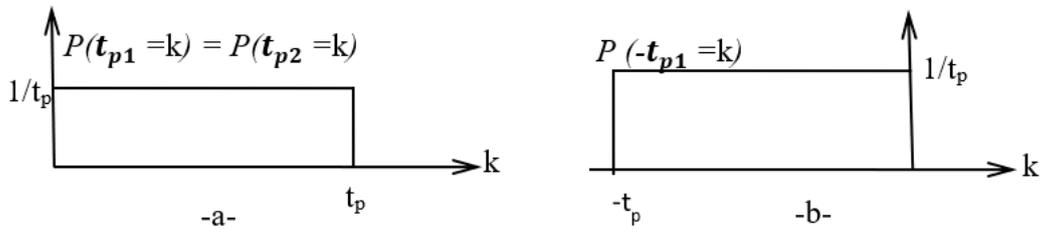


Figure 3.5: a- Distribution continue approchée de la variable t_{p1} b- Distribution continue approchée de la variable $-t_{p2}$

La distribution continue de $(t_{p1} - t_{p2})$ est représentée dans Figure 3.6.a. La distribution continue de $|t_{p1} - t_{p2}|$ est présentée dans Figure 3.6.b

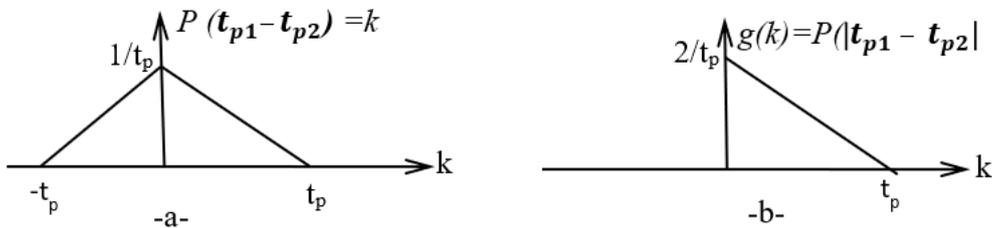


Figure 3.6: a- Distribution continue approchée de la variable $t_{p1} - t_{p2}$ b- Distribution continue approchée de la variable $|t_{p1} - t_{p2}|$

La fonction de distribution de déplacement $|t_{p1} - t_{p2}|$ notée $f_2(k)$ est la suivante:

$$f_2(k) = \begin{cases} \frac{2t_p - 2k}{t_p^2}, & 0 < k < t_p \\ 0, & \text{Ailleurs} \end{cases} \quad (3.8)$$

Cependant le temps de déplacement $|t_{p1} - t_{p2}|$ dépend du temps de glissement des racks t_r . Ce dernier est défini comme le temps nécessaire pour l'ouverture d'une allée de service.

Le temps de glissement des racks est une Dirac sa distribution est comme suit :

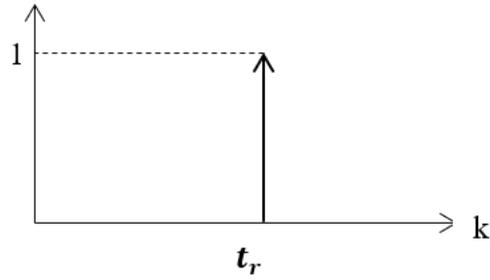


Figure 3.7: Distribution continue approchée de la variable t_r

La fonction de distribution de t_r notée $f_3(k)$ est la suivante :

$$f_3(k) = \begin{cases} 1, & k = t_r \\ 0, & \text{Ailleurs} \end{cases} \quad (3.9)$$

Le temps de déplacement transversal est le maximum entre le déplacement $f_2(k)$ et le temps d'ouverture d'une allée $f_3(k)$ pour ce faire nous allons d'abord calculer leurs fonctions de répartitions $F_2(k), F_3(k)$, ensuite la dérivée de la fonction de distribution obtenue nous donne le maximum entre le déplacement transversal et le temps de glissement des racks.

$$F_4(k) = \max(f_2(k) ; f_3(k)) \quad (3.10)$$

$$F_4(k) = F_2(k).F_3(k) \quad (3.11)$$

$$f_4(k) = F_4'(k) \quad (3.12)$$

La fonction de distribution du maximum entre le déplacement transversal et le temps de de glissement des racks est la suivante :

$$f_2(k) = \begin{cases} \frac{2t_r}{t_p} - \frac{t_r^2}{t_p^2}, & k = t_r \\ \frac{2t_p - 2k}{t_p^2}, & t_r < k \leq t_p \\ 0, & \text{Ailleurs} \end{cases} \quad (3.13)$$

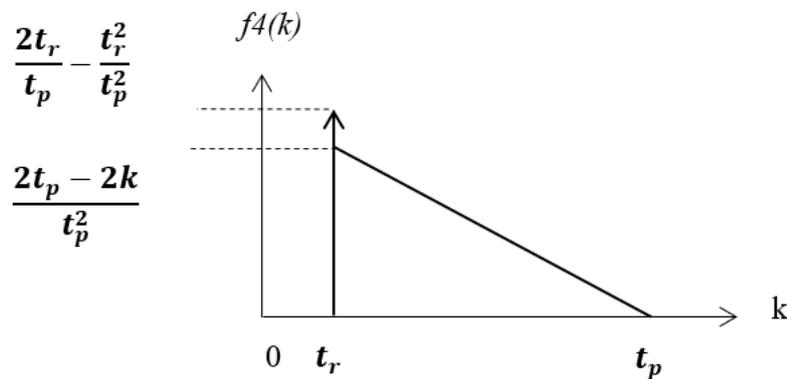


Figure 3.8: Distribution du maximum entre le déplacement transversal et le temps de de glissement des racks

Plusieurs cas se présentent lors du calcul de la distribution du temps de déplacement horizontale X_H de $E(TB)$

- 1^{ier} cas : $t_p > t_r$ et $t_h > t_p - t_r$
- 2^{ème} cas : $t_p > t_r$ et $t_h < t_p - t_r < 2t_h$
- 3^{ème} cas : $t_p > t_r$ et $t_p - t_r > 2t_h$
- 4^{ème} cas $t_p < t_r$

Finalement les expressions du temps de déplacement entre deux casiers $E(TB)$ de l'AS/RS à racks glissants sont présentés dans l'annexe A.2

3.4.4 Modèle continu du temps moyen multi cycles de l'AS/RS à racks glissants

Le temps moyen multi cycles de l'AS/RS à racks glissants comprend plusieurs opérations de stockage et de déstockage dans un même cycle. Le temps nécessaire pour effectuer un multi cycles contenant k opérations est égal au temps de simple cycle plus $k - 1$ temps intermédiaires comme présenté dans l'équation(2.1).

Dans ce travail nous nous intéressons à l'optimisation des dimensions de l'AS/RS à racks glissants pour un temps multi cycles minimal.

3.5 Détermination des dimensions optimales de l'AS/RS à racks glissants

3.5.1 Formulation du problème

L'objectif de ce travail est de trouver les dimensions optimales de l'AS/RS à racks glissants de telle sorte que le temps pour accéder à n'importe quel casier soit minimum.

Dans notre problème d'optimisation, on a deux types de contraintes :

- Des contraintes d'inégalités liées à la positivité des trois temps de déplacement de la machine de stockage/déstockage :

$$t_p > 0, t_h > 0, t_v > 0 \quad (3.14)$$

t_p, t_v , et t_h sont des variables représentant des temps. Elles sont positives et différentes de zéro.

- Une contrainte d'égalité liée à la constance de la taille du système de stockage (nombre total de casiers est constant) :

$$t_p \times t_h \times t_v = constant \quad (3.15)$$

Prenons cette constante arbitrairement égale à 1 et prenons ensuite $t_v = \frac{1}{t_p \times t_h}$

De plus nous avons le paramètre t_r . Il représente le temps de glissement des racks sa valeur est donnée et elle peut prendre des valeurs réelles positives.

La complexité des équations du temps multi cycles de l'AS/RS à racks glissants, rend le calcul analytique difficile. Pour cette raison nous avons choisi d'utiliser les Méta-heuristiques en particulier l'algorithme génétique. Ce dernier nous a déjà donné des résultats très satisfaisants pour l'optimisation des dimensions de l'AS/RS multi allées.

3.5.2 Résolution du problème

Le programme manipule aléatoirement une population initiale de solutions (ensemble de chromosomes) de taille 20. Chaque chromosome contient des gènes t_p et t_h choisis aléatoirement dans l'intervalle [0,3].

Nous avons fait varier le paramètre t_r de 0 à 8. Ainsi nous avons fixé le nombre de générations à 1000. Une fonction fitness $E(MC)$ minimale est maintenue pour chaque nouvelle génération. Ensuite une nouvelle population de solutions est créée à l'aide d'opérateurs évolutionnaires simples : La sélection, le croisement et la mutation.

Les étapes détaillées de l'algorithme génétique appliquées pour trouver les dimensions optimales de l'AS/RS multi allées du chapitre 2 sont les mêmes appliquées pour l'AS/RS à racks glissants. Sauf que dans ce système on a un paramètre t_r qui représente le temps de glissements des racks.

Les principales étapes du programme sont les suivantes :

Etape 1 : Définition des paramètres

- Le nombre d'opérations : on commence par $k=1$
- La population initiale est de taille 20
- Le nombre de générations a été fixé à 1000
- Les chromosomes contiennent des gènes t_p et t_h choisis aléatoirement dans l'intervalle $[0, 3]$.
- t_r varie de 0 à 8 et on commence par $t_r.=0$ avec un pas de 0.1
- La probabilité de croisement est $pc = 80 \%$.
- La probabilité de mutation est $pm = 10 \%$

Etape 2 : Le calcul du temps multi cycles $E(MC)$ équation(2.1) en utilisant les expressions de $E(SC)$ et $E(TB)$ du racks glissants qui représente la fonction fitness pour chaque chromosome.

Etape 3 : La sélection avec probabilité à l'aide de la formule suivante

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^S f_i} \quad (3.16)$$

Où : P_i est la probabilité du chromosome i ; S : est la taille de la population ; f_i : est la fitness du chromosome i .

Etape 4 : Le croisement avec probabilité de $pc = 80 \%$.

Etape 5 : La mutation avec probabilité de $pm = 10 \%$

Pour chaque valeur de t_r nous avons obtenus des dimensions optimales t_p , t_h et t_v . Ce processus est répété pour n'importe quelle valeur de k . Les résultats trouvés sont présentés dans la section suivante.

3.6 Résultats et interprétations

Le tableau 3.1 récapitule les résultats trouvés après l'application de l'algorithme génétique sur l'équation 2.1 pour un temps multi cycles de l'AS/RS à racks glissants.

Dans un premier temps nous avons traité le cas ou $k = 1$ c'est-à-dire pour un temps de simple cycle. Nous avons fait varier t_r de 0 à 8 avec un pas de 0.1 et on a considéré que le volume est constant et est égal à 1.

Pour chaque valeur de t_r on a trouvé les dimensions optimales t_p, t_h et t_v et leurs temps de cycle minimum $E(MC)$.

Tableau 3.1: Dimensions optimales de l'AS/RS à racks glissant pour $k = 1$

$t_r \backslash k = 1$	t_p	t_h	t_v	$E(SC)$
0	0.8785	0.8761	1.2993	1.9868
0.1	0.8737	0.8775	1.3042	1.989
0.2	0.8811	0.8648	1.3124	1.9967
0.3	0.898	0.8516	1.3077	2.0113
0.4	0.9113	0.8334	1.3168	2.0339
0.5	0.9336	0.8065	1.328	2.0654
0.6	0.963	0.7721	1.345	2.1063
0.7	0.9928	0.7385	1.3639	2.1566
0.8	1.0359	0.7011	1.377	2.2161
0.9	1.0796	0.6668	1.3892	2.2845
1	1.1211	0.6306	1.4145	2.3612
1.1	1.1694	0.5939	1.4398	2.4457
1.2	1.2148	0.5658	1.455	2.5372
1.3	1.2348	0.5482	1.4773	2.634
1.4	1.2334	0.5425	1.4946	2.7328
1.5	1.2326	0.5403	1.5204	2.8326
1.6	1.2273	0.5429	1.5009	2.9326
1.7	1.2367	0.5362	1.5079	3.0326
1.8	1.2347	0.5447	1.4868	3.1327
1.9	1.2299	0.5444	1.4936	3.2327
2	1.2282	0.5421	1.502	3.3326
3	1.2345	0.5381	1.5055	4.3326
4	1.2358	0.5368	1.5075	5.3326
5	1.2299	0.5395	1.507	6.3326
6	1.2364	0.5385	1.5021	7.3326
7	1.2325	0.5442	1.4908	8.3327
8	1.2343	0.5394	1.502	9.3326

Nous remarquons qu'en augmentant la valeur de t_r les valeurs de t_p et t_v augmentent et les valeurs de t_h diminuent jusqu'à ce qu'elles deviennent constante dans

$t_r = 1.4$ pour les valeurs $t_p \approx 1.2345$, $t_h \approx 0.5381$ et $t_v \approx 1.502$.

Pour $t_r = 0$ les dimensions optimales sont les mêmes que celles de l'AS/RS multi allée pour un temps de simple cycle. Pour des valeurs $t_p \approx 0.8785$, $t_h \approx 0.8761$ et $t_v \approx 1.2993$.

Les résultats trouvés pour $k = 1$ c'est-à-dire pour un temps de simple sont en accord avec celles trouvés dans (Kouloughli et al., 2022).

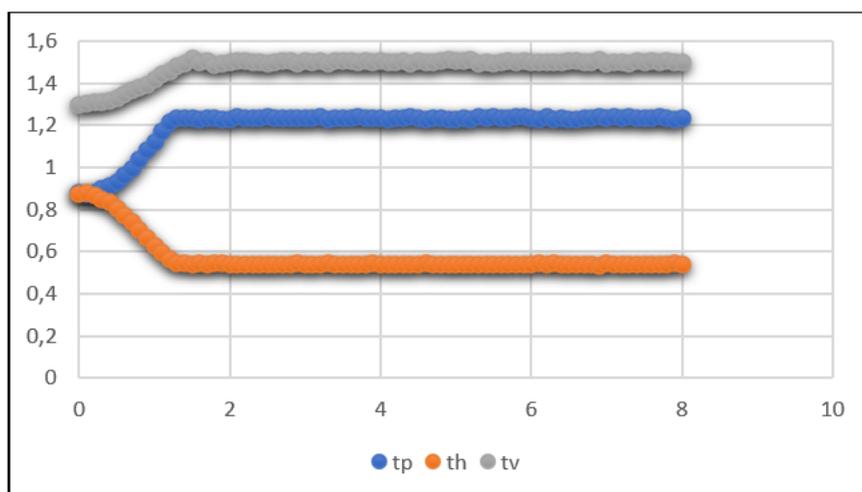


Figure 3.9: Dimensions optimales t_p t_h t_v en fonction de t_r pour $k = 1$

La figure 3.9 représente les dimensions optimales t_p , t_h et t_v en fonction du paramètre t_r pour le cas où la machine S/R effectue une seule opération de stockage ou de déstockage dans un même cycle (temps de simple cycle) c'est-à-dire pour $k = 1$.

Pour $t_r \in [0, 1.4]$, on observe que les valeurs de t_p et t_v augmente continuellement et les valeurs de t_h diminuent lorsque le paramètre t_r augmente.

Pour $t_r \in [1.4, 8]$, les trois dimensions restent quasiment inchangées lorsque le paramètre t_r augmente pour des valeurs de ($t_p \approx 1.2345$, $t_h \approx 0.5381$ et $t_v \approx 1.502$).

Le tableau 3.3 récapitule les dimensions optimales t_p , t_h et t_v et leurs temps de cycle minimums obtenus en appliquant l'algorithme génétique sur l'équation 2.1. Dans le cas où la machine S/R multi navettes effectue plusieurs opérations de stockage et déstockage dans un même cycle.

Nous avons pris $k=1,2,3$ et 4, et nous avons fait varier t_r de 0 à 8 avec un pas de 1 pour un volume constant.

Tableau 3.2: Dimensions optimales de l'AS/RS à racks glissants pour un temps multi cycles.

Nous remarquons que pour $t_r=0$ et $t_r=1$ les valeurs des dimensions optimales t_p , t_h et t_v restent presque les mêmes. Quelle que soit le nombre d'opérations k .

t_r	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$
0	$t_p=1.4199$ $t_h=0.8476$ $t_v=0.8309$ $E(MC)= 2.3261$	$t_p=1.4111$ $t_h=0.842$ $t_v=0.8414$ $E(MC)= 2.3323$	$t_p=1.4161$ $t_h=0.8452$ $t_v=0.8355$ $E(MC)= 2.3567$
1	$t_p=1.609$ $t_h=0.5095$ $t_v=1.2198$ $E(MC)= 2.5195$	$t_p=1.5839$ $t_h=0.4877$ $t_v=1.2945$ $E(MC)= 2.5018$	$t_p=1.5944$ $t_h=0.4943$ $t_v=1.2689$ $E(MC)= 2.5273$
2	$t_p=1.67310$ $t_h=0.3243$ $t_v=1.8431$ $E(MC)=5.7442$	$t_p=1.9844$ $t_h=0.2497$ $t_v=2.0184$ $E(MC)= 6.4397$	$t_p=1.985$ $t_h=0.2277$ $t_v=2.2122$ $E(MC)= 8.6785$
3	$t_p=1,6734$ $t_h=0.326$ $t_v=1.8331$ $E(MC)= 7.7442$	$t_p=1,9748$ $t_h=0,2435$ $t_v=2,08$ $E(MC)=11,0236$	$t_p=2.1893$ $t_h=0.199$ $t_v=2.2952$ $E(MC)=14.2425$
4	$t_p=1.6711$ $t_h=0.3257$ $t_v=1.8374$ $E(MC)= 9.7442$	$t_p=1.9776$ $t_h=0.2415$ $t_v=2.0935$ $E(MC)=14.0236$	$t_p=2.1961$ $t_h=0.1986$ $t_v=2.2931$ $E(MC)=18.2425$
5	$t_p=1.6714$ $t_h=0.3248$ $t_v=1.8423$ $E(MC)=11.7442$	$t_p=1.971$ $t_h=0.2423$ $t_v=2.0935$ $E(MC)=17.0236$	$t_p=2.1947$ $t_h=0.1977$ $t_v=2.3048$ $E(MC)=22.2425$
6	$t_p=1.6772$ $t_h=0.3251$ $t_v=1.834$ $E(MC)=13.7442$	$t_p=1.9721$ $t_h=0.2419$ $t_v=2.0964$ $E(MC)=20.0236$	$t_p=2.1989$ $t_h=0.1991$ $t_v=2.2839$ $E(MC)=26.2425$

7	$t_p=1.6685$	$t_p=1.9693$	$t_p=2.1919$
	$t_h=0.3275$	$t_h=0.2429$	$t_h=0.1989$
	$t_v=1.8301$	$t_v=2.0905$	$t_v=2.2937$
	$E(MC)=15.7442$	$E(MC)=23.0236$	$E(MC)=30.2425$
8	$t_p=1.6722$	$t_p=1.9716$	$t_p=2.1943$
	$t_h=0.3253$	$t_h=0.2425$	$t_h=0.1983$
	$t_v=1.8385$	$t_v=2.0915$	$t_v=2.2981$
	$E(MC)=17.7442$	$E(MC)=26.0236$	$E(MC)=34.2425$

Notons que, dans le cas où $t_r = 0$, les dimensions optimales t_p , t_h et t_v sont respectivement égales à 1.4199, 0.8476 et 0.8309. Cependant, pour $t_r=1$, ces dimensions optimales sont égales à 1.609, 0.5095 et 1.2198 pour $k=2$. Ainsi à 1.5839, 0.4877 et 1.2945 pour $k=3$ et 1.4161, 0.8452 et 0.8355 pour $k=4$.

Pour $t_r=2$ les dimensions optimales changent de valeurs dans le cas où la machine S/R multi navettes effectue 2,3 et 4 opérations ($k=2$, $k=3$ et $k=4$)

De $t_r=3$ à $t_r=8$ les dimensions optimales t_p , t_h et t_v restent constantes pour chaque valeur de k .

Ces dimensions optimales sont respectivement égales à 1.6734, 0.326 et 1.8331 pour $k=2$ et elles sont égales à 1.9748, 0.2435 et 2.08 pour $k=3$ et 2.1893, 0.199 et 2.2952 pour $k=4$.

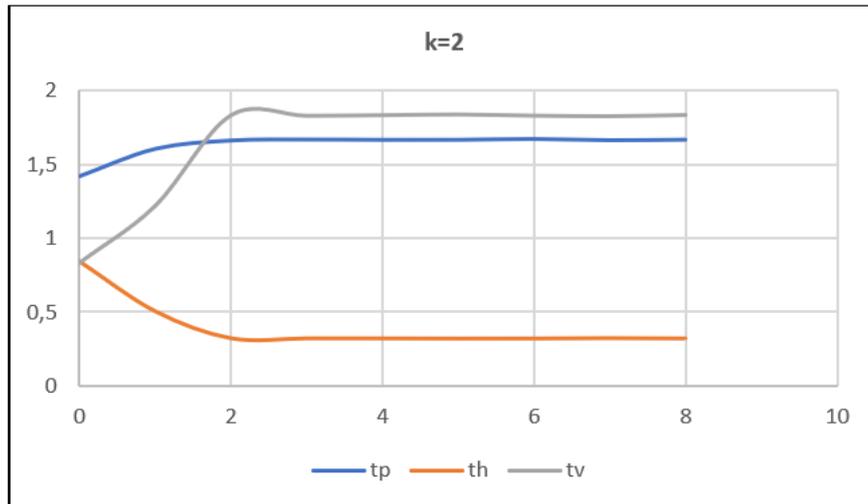


Figure 3.10: Dimensions optimales de t_p , t_h et t_v en fonction de t_r pour $k = 2$

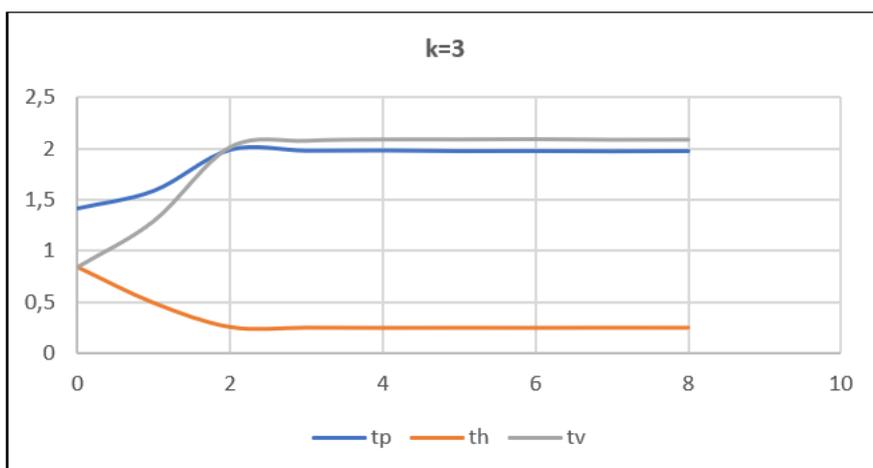


Figure 3.11: Dimensions optimales de t_p , t_h et t_v en fonction de t_r pour $k = 3$

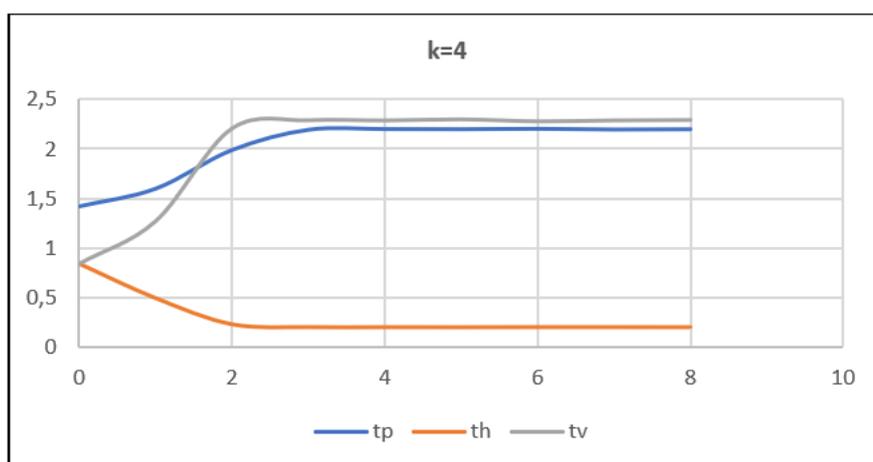


Figure 3.12: Dimensions optimales de t_p , t_h et t_v en fonction de t_r pour $k = 4$

Les figures 3.10, 3.11 et 3.12 montrent l'évolution des dimensions t_p , t_h et t_v en fonction du paramètre t_r pour $k = 2$, $k=3$ et $k=4$.

Pour $t_r \in [0, 3]$, on observe que les valeurs de t_p et t_v augmentent continuellement et les valeurs de t_h diminuent lorsqu'on augmente le paramètre t_r .

Pour $t_r \in [3, 8]$, les valeurs de t_p , t_h et t_v se stabilisent lorsqu'on augmente le paramètre t_r .

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à déterminer les dimensions optimales pour la conception d'un AS/RS à racks glissants. Ce dernier est une variété de l'AS/RS multi allées, la particularité de ce système est que l'allée de service ne s'ouvre que s'il y a une opération de stockage ou déstockage prévue dans le rack. Donc il est caractérisé par un temps d'ouverture de l'allée ou un temps de glissement des racks t_r .

Il convient de rappeler que les dimensions optimales ont été déterminées par la minimisation du temps multi cycles de l'AS/RS à racks glissants. En considérant la contrainte de la positivité des trois temps de déplacements et la contrainte de la constante du système.

La lourdeur des équations du temps multi cycles a rendu le calcul analytique difficile, pour cette raison nous avons utilisé la métaheuristique algorithme génétique pour déterminer les dimensions optimales t_p , t_h et t_v . Cela en faisant varier le paramètre t_r et pour k opérations.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons étudié deux types de systèmes automatisés de stockage/déstockage, le premier est l'AS/RS multi allées. Il est composé d'un ensemble de racks disposés en parallèle et séparés par des allées permettant l'accès à la machine S/R. Ce type de système est caractérisé par une seule machine S/R. Nous avons considéré une machine S/R multi navettes qui peut fonctionner en multi cycles, c'est-à-dire elle peut faire plusieurs opérations de stockage et déstockage dans un même cycle. L'objectif était de minimiser le temps multi cycles afin de déterminer les dimensions optimales pour la conception de ce type de système, pour le cas où la machine S/R effectue des opérations de stockage et déstockage dans la même allée et dans des allées différentes.

Nous avons commencé par présenter les modèles analytiques du temps de simple cycle, du temps de déplacements entre deux casiers et le temps multi cycles. Ce dernier est égal au temps de simple cycle plus $(k - 1)$ multiplié par le temps de déplacement entre deux casiers de l'AS/RS multi allées.

La lourdeur des équations du temps multi cycles rend le calcul analytique difficile pour cette raison nous avons utilisé l'algorithme génétique.

Le problème est soumis à deux types de contraintes : la première contrainte est liée à la positivité des trois temps de déplacement du système, correspondant respectivement au temps de déplacement sur les allées, au temps de déplacement dans le sens horizontal et au temps de déplacement dans le sens vertical ($t_p > 0, t_h > 0$ et $t_v > 0$). Et la deuxième contrainte est liée à la constance de la taille du système ($t_p \cdot t_h \cdot t_p = \text{constante}$). Enfin les dimensions optimales ont été déterminées pour chaque nombre d'opérations k .

Nous avons aussi appliqué la méthode des moindres carrés pour trouver des fonctions qui relient les dimensions optimales (t_p, t_h et t_v) au nombre d'opérations k , afin d'obtenir des expressions permettant une évaluation directe des trois dimensions optimales du système.

Ensuite notre étude a été portée sur un autre système qui est l'AS/RS à racks glissants. Celui-là est une variété de l'AS/RS multi allées. Il est composé d'un ensemble de racks disposés en parallèles et d'une seule machine S/R. La particularité de ce système est que les allées de service n'apparaissent que lorsqu'une opération de stockage ou de déstockage est prévue dans les racks correspondants. Donc il y a un temps correspondant au temps d'ouverture de l'allée donnée par un paramètre t_r . Comme dans le premier système nous avons commencé d'abord par présenter les modèles analytiques du temps de simple cycle, du temps de déplacements entre deux casiers et le temps multi cycles de l'AS/RS à racks glissants.

Le but du travail était de déterminer les dimensions optimales de l'AS/RS à racks glissants, en minimisant le temps multi cycles. Nous avons appliqué l'algorithme génétique en variant le paramètre t_r . Nous avons considéré les mêmes contraintes que celles de l'AS/RS multi allées.

Les dimensions optimales ont été déterminées pour chaque valeur donnée de temps de glissement des racks t_r et pour un nombre d'opérations k .

Finalement, les solutions proposées permettent une grande flexibilité dans le choix des dimensions pour la conception d'un AS/RS multi allées et pour la conception d'un AS/RS à racks glissants avec une machine S/R multi navettes.

Comme perspectives futures dans ce domaine, il serait intéressant de :

- Comparer les résultats trouvés en utilisant l'algorithme génétique avec d'autres métaheuristiques.
- Trouver les dimensions optimales pour un temps multi cycles pour d'autres types de système de stockage et de déstockage
- Faire une optimisation des dimensions de l'AS/RS multi allées pour un troisième cas ou la machine S/R effectue des opérations de stockage et déstockage dans la même allée et dans des allées différentes.

A

Annexes

Sommaire

A.1	Le temps de déplacement entre deux casiers $E(TB)$ de l'AS/RS multi allées	87
A.2	Le temps de déplacement entre deux casiers $E(TB)$ de l'AS/RS à racks glissants	88

A.1 Le temps de déplacement entre deux casiers $E(TB)$ de l'AS/RS multi allées

Nous présentons ci-dessous les 18 expressions de $E(TB)$ de l'AS/RS multi allées développées par (Djellouli & Hassaine, 2008) dans le cas où le stockage et les déstockages se font sur des allées différentes.

$E(TB) =$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{1260} \frac{420 th^2 tp^3 + 1260 th^3 tp^2 + 7 tv^4 tp - tv^5}{th^2 tp^2} && tp \leq th \text{ and } 0 < tv \text{ and } tv \leq tp \\ & \frac{1}{1260} \frac{21 tv^5 - 35 tv^4 tp + 35 tp^2 tv^3 - 21 tv^2 tp^3 + 1260 th^3 tv^2 + 7 tp^4 tv + 420 th^2 tp tv^2 - tp^5}{th^2 tv^2} && tp \leq th \text{ and } tp < tv \text{ and } tv \leq th \\ & -\frac{1}{1260} \frac{1}{th^2 tp^2 tv^2} (tp^7 - 84 th^5 tp tv - 7 tp^6 tv - 84 th tp tv^5 + 14 th tv^6 + 14 tp tv^6 + 14 th^6 tp - 14 th^6 tv - 21 tp^2 tv^5 - 42 th^2 tv^5 + 70 th^3 tv^4 + 35 tp^3 tv^4 \\ & - 70 th^4 tv^3 - 35 tp^4 tv^3 + 42 tv^2 th^5 + 21 tv^2 tp^5 + 210 th^2 tp tv^4 - 280 th^3 tp tv^3 + 210 tv^2 tp th^4 - 1260 th^3 tv^2 tp^2 - 420 th^2 tv^2 tp^3 - 2 tv^7 + 2 th^7) && tp \leq th \text{ and } th < tv \text{ and } tv \leq tp + th \\ & \frac{1}{1260} \frac{1}{th^2 tv^2} (21 tv^2 tp^3 - 21 tv^5 - 420 th^2 tv^3 - 35 tp^2 tv^3 - 7 tp^4 tv + 35 tv^4 tp + 210 th tv^4 - 210 th^4 tv - 280 tp th^3 tv - 210 tv th^2 tp^2 - 84 tv th tp^3 \\ & + 840 th^2 tp tv^2 - 280 th tp tv^3 + 14 th tp^4 + 42 th^5 + 70 tp th^4 + 70 th^3 tp^2 + 42 th^2 tp^3 + 1680 th^3 tv^2 + 210 tv^2 th tp^2 + tp^5) && tp \leq th \text{ and } tp + th < tv \text{ and } tv \leq 2 th \\ & \frac{1}{1260} \frac{1}{th^2 tp^2 tv^2} (-1344 th^5 tp tv + 420 th^2 tp tv^4 - tv^7 + tp^7 + 1680 th^3 tv^2 tp^2 + 672 tv^2 th^5 - 35 tp^4 tv^3 + 840 th^2 tv^2 tp^3 + 1680 tv^2 tp th^4 - 1120 th^3 tp tv^3 \\ & - 280 th tp^3 tv^3 + 210 th tp^2 tv^4 - 21 tp^2 tv^5 + 280 th^3 tv^4 - 448 th^6 tv - 280 th^3 tp^3 tv - 84 th tp^5 tv + 14 th tv^6 + 35 tp^3 tv^4 + 448 th^6 tp + 7 tp tv^6 + 42 th^2 tp^5 \\ & - 210 th^4 tv tp^2 + 42 tp^2 th^5 - 84 th tp tv^5 + 14 th tp^6 - 84 th^2 tv^5 + 210 tv^2 th tp^4 - 420 th^2 tp^2 tv^3 - 210 tp^3 tv th^2 - 560 th^4 tv^3 + 128 th^7 + 70 tp^3 th^4 - 7 tp^6 tv \\ & + 70 th^3 tp^4 + 21 tv^2 tp^5) && tp \leq th \text{ and } 2 th < tv \text{ and } tv \leq tp + 2 th \\ & -\frac{1}{90} \frac{-30 tv^3 - 60 th tp tv - 105 th^2 tv - 15 tp^2 tv + 45 th^3 + 35 th^2 tp + 15 th tp^2 + 3 tp^3}{tv^2} && tp \leq th \text{ and } tp + 2 th < tv \\ & -\frac{1}{1260} \frac{336 th^5 - 1680 tp th^4 + 2520 th^3 tp^2 - 840 th^2 tp^3 - 1050 th tp^4 + 2520 th tp^3 + 840 th^3 tp + tv^5 + 252 tp^5 - 420 tp^4 - 7 tv^4 tp - 3780 th^2 tp^2}{th^2 tp^2} && th < tp \text{ and } tp \leq 2 th \text{ and } 0 < tv \text{ and } tv \leq th \\ & -\frac{1}{1260} \frac{1}{th^2 tp^2 tv^2} (-84 th^5 tp tv + 70 th^3 tv^4 - 42 th^2 tv^5 - 14 th^6 tv + 14 th^6 tp - tv^7 - 84 th tp tv^5 + 210 th^2 tp tv^4 - 280 th^3 tp tv^3 + 42 tv^2 th^5 + 2 th^7 + 14 th tv^6 \\ & + 7 tp tv^6 - 70 th^4 tv^3 + 210 tv^2 tp th^4 - 1260 th^3 tv^2 tp^2 - 420 th^2 tv^2 tp^3) && th < tp \text{ and } tp \leq 2 th \text{ and } th < tv \text{ and } tv \leq tp \\ & -\frac{1}{1260} \frac{1}{th^2 tp^2 tv^2} (tp^7 - 84 th^5 tp tv - 7 tp^6 tv - 84 th tp tv^5 + 14 th tv^6 + 14 tp tv^6 + 14 th^6 tp - 14 th^6 tv - 21 tp^2 tv^5 - 42 th^2 tv^5 + 70 th^3 tv^4 + 35 tp^3 tv^4 \\ & - 70 th^4 tv^3 - 35 tp^4 tv^3 + 42 tv^2 th^5 + 21 tv^2 tp^5 + 210 th^2 tp tv^4 - 280 th^3 tp tv^3 + 210 tv^2 tp th^4 - 1260 th^3 tv^2 tp^2 - 420 th^2 tv^2 tp^3 - 2 tv^7 + 2 th^7) && th < tp \text{ and } tp \leq 2 th \text{ and } tp < tv \text{ and } tv \leq 2 th \end{aligned}$$

$\frac{1}{1260} \frac{1}{th^2 tp^2 tv^2} (630 tv^2 th^5 + 35 tp^4 tv^3 + 1260 th^3 tv^2 tp^2 - tp^7 + tv^7 - 1260 th^5 tp tv - 7 tp tv^6 + 126 th^7 + 420 th^2 tv^2 tp^3 + 210 th^2 tp tv^4 - 840 th^3 tp tv^3 + 1470 tv^2 tp th^4 - 434 th^6 tv - 35 tp^3 tv^4 + 210 th^3 tv^4 - 490 th^4 tv^3 + 21 tp^2 tv^5 + 7 tp^6 tv - 21 tv^2 tp^5 - 42 th^2 tv^5 + 434 th^6 tp)$	$th < tp \text{ and } tp \leq 2 th \text{ and } 2 th < tv \text{ and } tv \leq tp + th$
$\frac{1}{1260} \frac{1}{th^2 tp^2 tv^2} (-1344 th^5 tp tv + 420 th^2 tp tv^4 - tv^7 + tp^7 + 1680 th^3 tv^2 tp^2 + 672 tv^2 th^5 - 35 tp^4 tv^3 + 840 th^2 tv^2 tp^3 + 1680 tv^2 tp th^4 - 1120 th^3 tp tv^3 - 280 th tp^3 tv^3 + 210 th tp^2 tv^4 - 21 tp^2 tv^5 + 280 th^3 tv^4 - 448 th^6 tv - 280 th^3 tp^3 tv - 84 th tp^5 tv + 14 th tv^6 + 35 tp^3 tv^4 + 448 th^6 tp + 7 tp tv^6 + 42 th^2 tp^5 - 210 th^4 tv tp^2 + 42 tp^2 th^5 - 84 th tp tv^5 + 14 th tp^6 - 84 th^2 tv^5 + 210 tv^2 th tp^4 - 420 th^2 tp^2 tv^3 - 210 tp^4 tv th^2 - 560 th^4 tv^3 + 128 th^7 + 70 tp^3 th^4 - 7 tp^6 tv + 70 th^3 tp^4 + 21 tv^2 tp^5)$	$th < tp \text{ and } tp \leq 2 th \text{ and } tp + th < tv \text{ and } tv \leq tp + 2 th$
$-\frac{1}{90} \frac{-30 tv^3 - 60 th tp tv - 105 th^2 tv - 15 tp^2 tv + 45 th^3 + 35 th^2 tp + 15 th tp^2 + 3 tp^3}{tv^2}$	$th < tp \text{ and } tp \leq 2 th \text{ and } tp + 2 th < tv$
$\frac{1}{1260} \frac{420 th^2 tp^3 + 1260 th^3 tp^2 + 7 tv^4 tp - tv^5}{th^2 tp^2}$	$2 th < tp \text{ and } 0 < tv \text{ and } tv \leq th$
$-\frac{1}{1260} \frac{1}{th^2 tp^2 tv^2} (-84 th^5 tp tv + 70 th^3 tv^4 - 42 th^2 tv^5 - 14 th^6 tv + 14 th^6 tp - tv^7 - 84 th tp tv^5 + 210 th^2 tp tv^4 - 280 th^3 tp tv^3 + 42 tv^2 th^5 + 2 th^7 + 14 th tv^6 + 7 tp tv^6 - 70 th^4 tv^3 + 210 tv^2 tp th^4 - 1260 th^3 tv^2 tp^2 - 420 th^2 tv^2 tp^3)$	$2 th < tp \text{ and } th < tv \text{ and } tv \leq 2 th$
$\frac{1}{90} \frac{90 tv^2 th tp^2 - 60 th tp tv^3 + 9 th^5 + 15 tv^4 tp + 45 th^3 tv^2 - 31 th^4 tv + 31 tp th^4 - 3 tv^5 + 15 th tv^4 - 35 th^2 tv^3 + 105 th^2 tp tv^2 + 30 tv^2 tp^3 - 90 tp th^3 tv}{tp^2 tv^2}$	$2 th < tp \text{ and } 2 th < tv \text{ and } tv \leq tp$
$\frac{1}{1260} \frac{1}{th^2 tp^2 tv^2} (630 tv^2 th^5 + 35 tp^4 tv^3 + 1260 th^3 tv^2 tp^2 - tp^7 + tv^7 - 1260 th^5 tp tv - 7 tp tv^6 + 126 th^7 + 420 th^2 tv^2 tp^3 + 210 th^2 tp tv^4 - 840 th^3 tp tv^3 + 1470 tv^2 tp th^4 - 434 th^6 tv - 35 tp^3 tv^4 + 210 th^3 tv^4 - 490 th^4 tv^3 + 21 tp^2 tv^5 + 7 tp^6 tv - 21 tv^2 tp^5 - 42 th^2 tv^5 + 434 th^6 tp)$	$2 th < tp \text{ and } tp < tv \text{ and } tv \leq tp + th$
$\frac{1}{1260} \frac{1}{th^2 tp^2 tv^2} (-1344 th^5 tp tv + 420 th^2 tp tv^4 - tv^7 + tp^7 + 1680 th^3 tv^2 tp^2 + 672 tv^2 th^5 - 35 tp^4 tv^3 + 840 th^2 tv^2 tp^3 + 1680 tv^2 tp th^4 - 1120 th^3 tp tv^3 - 280 th tp^3 tv^3 + 210 th tp^2 tv^4 - 21 tp^2 tv^5 + 280 th^3 tv^4 - 448 th^6 tv - 280 th^3 tp^3 tv - 84 th tp^5 tv + 14 th tv^6 + 35 tp^3 tv^4 + 448 th^6 tp + 7 tp tv^6 + 42 th^2 tp^5 - 210 th^4 tv tp^2 + 42 tp^2 th^5 - 84 th tp tv^5 + 14 th tp^6 - 84 th^2 tv^5 + 210 tv^2 th tp^4 - 420 th^2 tp^2 tv^3 - 210 tp^4 tv th^2 - 560 th^4 tv^3 + 128 th^7 + 70 tp^3 th^4 - 7 tp^6 tv + 70 th^3 tp^4 + 21 tv^2 tp^5)$	$2 th < tp \text{ and } tp + th < tv \text{ and } tv \leq tp + 2 th$
$-\frac{1}{90} \frac{-30 tv^3 - 60 th tp tv - 105 th^2 tv - 15 tp^2 tv + 45 th^3 + 35 th^2 tp + 15 th tp^2 + 3 tp^3}{tv^2}$	$2 th < tp \text{ and } tp + 2 th < tv$

A.2 Le temps de déplacement entre deux casiers $E(TB)$ de l'AS/RS à racks glissants

Nous présentons ci-dessous les expressions de $E(TB)$ de l'AS/RS à racks glissants développées par (Bakdi & Medkour, 2018).

1^{ère} cas: $t_p > t_r$ et $t_h > t_p - t_r$

$$E(TB) = \begin{aligned} & \frac{1}{3} \frac{tp^3 + 3thtp^2 - tr^3 + 3tr^2tp}{tp^2} && 0 < tv \text{ and } tv < tr \\ & \frac{1}{1260} \frac{1}{tp^2 th^2 tv^2} (-105 tr^4 tv^3 + 35 tr^3 tv^4 - 35 tp tr^6 + 7 tp tv^6 + 1260 tv^2 tr^2 tp th^2 - 70 tv tr^6 + 168 tp tv tr^5 - 105 tr^2 tp tv^4 + 280 tr^3 tp tv^3 - tv^7 + 15 tr^7 \\ & + 126 tv^2 tr^5 - 315 tv^2 tp tr^4 - 420 tv^2 tr^3 th^2 + 420 tv^2 tp^3 th^2 + 1260 tv^2 tp^2 th^3) && tr < tv \text{ and } tv < tp \\ & \frac{1}{1260} \frac{1}{tv^2 tp^2 th^2} (7 tv tp^6 - 105 tr^4 tv^3 + 35 tr^3 tv^4 - 35 tp tr^6 + 1260 tv^2 tr^2 tp th^2 - 70 tv tr^6 + 21 tp^2 tv^5 - 35 tp^3 tv^4 + 35 tp^4 tv^3 + 168 tp tv tr^5 - 105 tr^2 tp tv^4 \\ & + 280 tr^3 tp tv^3 - tp^7 + 15 tr^7 + 126 tv^2 tr^5 - 315 tv^2 tp tr^4 - 420 tv^2 tr^3 th^2 + 420 tv^2 tp^3 th^2 + 1260 tv^2 tp^2 th^3 - 21 tv^2 tp^5) && tp < tv \text{ and } tv < tr + th \\ & - \frac{1}{1260} \frac{1}{tp^2 th^2 tv^2} (-7 tv tp^6 + 210 tv^2 tp th^4 - 105 tr^4 tv^3 + 35 tr^3 tv^4 - 35 tp tr^6 + 14 tp tv^6 - 2520 tv^2 tr^2 tp th^2 - 70 tv tr^6 + 630 tv^2 tr^4 th - 1680 tv^2 tr^3 tp th \\ & + 2 th^7 - 21 tp^2 tv^5 + 35 tp^3 tv^4 - 35 tp^4 tv^3 - 280 tp th^3 tv^3 - 280 tr^3 th tv^3 + 42 tv^2 th^5 + 1680 tp tv tr^3 th^2 + 14 tv^6 th + 168 tp tv tr^5 - 105 tr^2 tp tv^4 + 280 tr^3 tp tv^3 \\ & + tp^7 + 140 tr^6 th + 252 tr^5 th^2 + 210 tr^4 th^3 + 70 tr^3 th^4 - 70 th^4 tv^3 + 70 tv^4 th^3 + 1260 tp tv tr^4 th - 2 tv^7 + 15 tr^7 + 210 tv^4 tp th^2 - 84 tv^5 tp th - 336 tp tr^5 th \\ & - 630 tp tr^4 th^2 - 560 tp tr^3 th^3 - 210 tp tr^2 th^4 - 504 tv tr^5 th - 42 tv^5 th^2 - 630 tv tr^4 th^2 - 280 tv tr^3 th^3 - 84 tp tv th^5 + 126 tv^2 tr^5 + 14 tp th^6 - 14 tv th^6 \\ & - 315 tv^2 tp tr^4 + 840 tv^2 tr^3 th^2 - 420 tv^2 tp^3 th^2 - 1260 tv^2 tp^2 th^3 + 840 tp tr^2 th tv^3 + 21 tv^2 tp^5 + 840 tp tv tr^2 th^3) && tr + th < tv \text{ and } tv < tp + th \\ & \frac{1}{1260} \frac{1}{tp^2 th^2 tv^2} (-7 tv tp^6 + 14 th tp^6 - 420 tp^2 th^2 tv^3 + 105 tr^4 tv^3 - 35 tr^3 tv^4 + 35 tp tr^6 + 2520 tv^2 tr^2 tp th^2 - 280 th tp^3 tv^3 + 70 tv tr^6 - 630 tv^2 tr^4 th \\ & + 1680 tv^2 tr^3 tp th + 42 tp^5 th^2 + 70 tp^4 th^3 + 70 tp^3 th^4 + 42 tp^2 th^5 - 21 tp^2 tv^5 + 35 tp^3 tv^4 - 35 tp^4 tv^3 + 280 tr^3 th tv^3 - 1680 tp tv tr^3 th^2 - 168 tp tv tr^5 \\ & + 105 tr^2 tp tv^4 - 280 tr^3 tp tv^3 - 210 tp^2 tv th^4 - 280 tp^3 tv th^3 - 84 tv tp^5 th - 210 tv tp^4 th^2 + tp^7 - 140 tr^6 th - 252 tr^5 th^2 - 210 tr^4 th^3 - 70 tr^3 th^4 \\ & - 1260 tp tv tr^4 th - 15 tr^7 + 336 tp tr^5 th + 630 tp tr^4 th^2 + 560 tp tr^3 th^3 + 210 tp tr^2 th^4 + 504 tv tr^5 th + 630 tv tr^4 th^2 + 280 tv tr^3 th^3 - 126 tv^2 tr^5 + 315 tv^2 tp tr^4 \\ & - 840 tv^2 tr^3 th^2 + 840 tv^2 tp^3 th^2 + 1680 tv^2 tp^2 th^3 + 210 tv^2 th tp^4 - 840 tp tr^2 th tv^3 + 21 tv^2 tp^5 + 210 tv^4 th tp^2 - 840 tp tv tr^2 th^3) && tp + th < tv \text{ and } tv < tr + 2 th \\ & \frac{1}{1260} \frac{1}{tp^2 th^2 tv^2} (-7 tv tp^6 + 14 th tp^6 - 420 tp^2 th^2 tv^3 + 1680 tv^2 tp th^4 + 7 tp tv^6 - 280 th tp^3 tv^3 + 128 th^7 + 42 tp^5 th^2 + 70 tp^4 th^3 + 70 tp^3 th^4 + 42 tp^2 th^5 \\ & - 21 tp^2 tv^5 + 35 tp^3 tv^4 - 35 tp^4 tv^3 - 1120 tp th^3 tv^3 + 672 tv^2 th^5 + 1680 tp tv tr^3 th^2 + 14 tv^6 th - 210 tp^2 tv th^4 - 280 tp^3 tv th^3 - 84 tv tp^5 th - 210 tv tp^4 th^2 \\ & + tp^7 + 252 tr^5 th^2 + 630 tr^4 th^3 + 490 tr^3 th^4 - 560 th^4 tv^3 + 280 tv^4 th^3 - tv^7 + 420 tv^4 tp th^2 - 84 tv^5 tp th - 630 tp tr^4 th^2 - 1680 tp tr^3 th^3 - 1470 tp tr^2 th^4 \\ & - 84 tv^5 th^2 - 630 tv tr^4 th^2 - 840 tv tr^3 th^3 - 1344 tp tv th^5 + 448 tp th^6 - 448 tv th^6 + 840 tv^2 tp^3 th^2 + 1680 tv^2 tp^2 th^3 + 210 tv^2 th tp^4 + 21 tv^2 tp^5 + 210 tv^4 th tp^2 \\ & + 2520 tp tv tr^2 th^3) && tr + 2 th < tv \text{ and } tv < tp + 2 th \\ & - \frac{1}{90} \frac{1}{tp^2 tv^2} (45 tr^4 tv - 15 tp^4 tv - 105 tv tp^2 th^2 - 120 tp tr^3 tv + 15 th tp^4 - 35 tr^3 th^2 + 3 tp^5 - 18 tr^5 - 30 tp^2 tv^3 + 120 tp tr^3 th + 105 tp tr^2 th^2 + 35 tp^3 th^2 \\ & + 45 tp^2 th^3 + 60 tr^3 th tv - 180 tp tr^2 th tv - 60 tp^3 tv th + 45 tp tr^4 - 45 tr^4 th) && tp + 2 th < tv \end{aligned}$$

2^{ime} cas: $t_p > t_r$ et $t_h < t_p - t_r < 2t_h$

$$\begin{aligned}
 E(TB) = & \frac{1}{30} \frac{-120 t_p^3 t_r t_h^2 + 20 t_p^2 t_r t_h + 20 t_p^3 t_r^2 - 15 t_r^3 t_p^2 - 6 t_p^3 + 40 t_p t_h^4 - 15 t_p^4 t_h + 40 t_p^3 t_h^2 - 5 t_r^4 t_h - 70 t_r^2 t_h^2 - 70 t_r^2 t_h^3 - 40 t_r t_h^4 + t_r^3 - 20 t_p^3 t_h^3 + 180 t_p t_r^2 t_h^2 + 120 t_p t_r t_h^2}{t_p^3 t_h^2} & 0 < t_v \text{ and } t_r < t_r \\
 & \frac{1}{1260} \frac{1}{t_p^2 t_h^2 t_v^2} (168 t_r^3 t_p t_v - 210 t_r^4 t_v^2 t_h - 2940 t_r^2 t_v^2 t_h^2 - 315 t_r^4 t_v^3 t_p - 2940 t_r^2 t_v^2 t_h^3 - 1680 t_r^2 t_v^2 t_h^4 + 1680 t_p t_v^2 t_h^4 - 630 t_h t_v^2 t_p^4 + 1680 t_h^2 t_v^2 t_p^3 - 840 t_h^2 t_v^2 t_p^2 \\
 & + 840 t_r^2 t_p^2 t_r t_h - 5040 t_r^2 t_p^2 t_r t_h^2 + 840 t_r^2 t_p^2 t_r^2 - t_v^7 + 15 t_r^7 - 105 t_r^4 t_v^2 - 35 t_r^6 t_p + 7560 t_r^2 t_v^2 t_p t_h^2 + 5040 t_p t_r^2 t_r t_h^2 - 630 t_r^2 t_p^2 t_p^2 + 280 t_r^2 t_p t_v^4 + 35 t_r^2 t_v^4 \\
 & - 70 t_r^6 t_v + 7 t_p t_v^6 + 168 t_r^4 t_v^2 - 252 t_r^2 t_p^3) & t_r < t_v \text{ and } t_v < t_r + t_h \\
 & - \frac{1}{1260} \frac{1}{t_p^3 t_h^2 t_v^2} (-280 t_r^2 t_h t_v^2 + 2 t_h^7 + 168 t_r^3 t_p t_v + 840 t_r^4 t_v^2 t_h + 3360 t_r^2 t_v^2 t_h^2 - 315 t_r^4 t_v^3 t_p + 2940 t_r^2 t_v^2 t_h^3 + 1680 t_r^2 t_v^2 t_h^4 - 1470 t_p t_v^2 t_h^4 + 630 t_h t_v^2 t_p^4 - 1680 t_h^2 t_v^2 t_p^3 \\
 & + 840 t_h^2 t_v^2 t_p^2 - 840 t_r^2 t_p^2 t_r t_h + 140 t_r^6 t_h + 252 t_r^3 t_h^2 + 210 t_r^4 t_h^3 + 70 t_r^2 t_h^4 + 5040 t_r^2 t_p^2 t_r t_h^2 - 280 t_r t_p^2 t_h^2 - 280 t_p t_h^2 t_v^2 - 336 t_h t_r^2 t_p - 630 t_h^2 t_r^2 t_p - 560 t_h^2 t_r^2 t_p^2 \\
 & - 210 t_h^4 t_r^2 t_p - 84 t_h t_r^2 t_p + 210 t_r^4 t_p t_h^2 - 840 t_r^2 t_p^2 t_r^2 - 84 t_r t_p t_h^3 - 504 t_r^3 t_h t_v - 630 t_r^4 t_h^2 t_v + 14 t_r^6 t_h + 42 t_r^2 t_h^3 - t_v^7 + 15 t_r^7 + 1260 t_r t_p t_h t_r^4 + 1680 t_r t_p t_h^2 t_r^2 \\
 & + 840 t_r t_p t_h^2 t_r^2 + 840 t_r^4 t_p t_h t_v^2 - 105 t_r^4 t_v^2 - 35 t_r^6 t_p - 8820 t_r^2 t_v^2 t_p t_h^2 - 5040 t_p t_v^2 t_r t_h^2 + 630 t_r^2 t_v^2 t_p^2 - 1680 t_p t_v^2 t_r t_h + 280 t_r^2 t_p t_v^2 - 105 t_r^2 t_p t_v^4 - 70 t_r^4 t_v^2 - 14 t_r t_h^6 \\
 & + 14 t_p t_h^6 - 42 t_h^2 t_v^2 + 70 t_r^4 t_h^2 + 35 t_r^2 t_v^4 - 70 t_r^6 t_v + 7 t_p t_v^6 + 84 t_r^4 t_v^2 + 252 t_r^2 t_p^3) & t_r + t_h < t_v \text{ and } t_v < t_p \\
 & - \frac{1}{1260} \frac{1}{t_p^3 t_h^2 t_v^2} (-280 t_r^2 t_h t_v^2 + 2 t_h^7 + 168 t_r^3 t_p t_v + 630 t_r^4 t_v^2 t_h + 840 t_r^2 t_v^2 t_h^2 - 315 t_r^4 t_v^3 t_p + 210 t_p t_v^2 t_h^4 - 420 t_h^2 t_v^2 t_p^2 - 1260 t_h^2 t_v^2 t_p^3 + 140 t_r^6 t_h + 252 t_r^3 t_h^2 + 210 t_r^4 t_h^3 \\
 & + 70 t_r^2 t_h^4 - 280 t_r t_p^2 t_h^2 - 280 t_p t_h^2 t_v^2 - 336 t_h t_r^2 t_p - 630 t_h^2 t_r^2 t_p - 560 t_h^2 t_r^2 t_p^2 - 210 t_h^4 t_r^2 t_p - 84 t_h t_r^2 t_p + 210 t_r^4 t_p t_h^2 + 35 t_p^2 t_v^4 - 21 t_r^2 t_p^3 - 7 t_r t_p^6 - 84 t_r t_p t_h^3 \\
 & - 504 t_r^3 t_h t_v - 630 t_r^4 t_h^2 t_v + 14 t_r^6 t_h + 42 t_r^2 t_h^3 - 2 t_v^7 + 15 t_r^7 + 1260 t_r t_p t_h t_r^4 + 1680 t_r t_p t_h^2 t_r^2 + 840 t_r t_p t_h^2 t_r^2 + 840 t_r^2 t_p t_h t_v^2 - 35 t_r^4 t_v^2 - 105 t_r^4 t_v^2 - 35 t_r^6 t_p \\
 & - 2520 t_r^2 t_v^2 t_p t_h^2 - 1680 t_p t_r^2 t_h t_h + 280 t_r^2 t_p t_v^2 - 105 t_r^2 t_p t_v^4 - 70 t_r^4 t_v^2 - 14 t_r t_h^6 + 14 t_p t_h^6 - 42 t_h^2 t_v^2 + 70 t_r^4 t_h^2 + 35 t_r^2 t_v^4 - 70 t_r^6 t_v + 14 t_p t_v^6 + 126 t_r^2 t_v^2 + t_p^7 \\
 & + 21 t_r^2 t_p^3) & t_p < t_v \text{ and } t_v < 2 t_h + t_r \\
 & \frac{1}{1260} \frac{1}{t_p^3 t_h^2 t_v^2} (126 t_h^7 + 1470 t_p t_r^2 t_h^4 + 420 t_h^2 t_v^2 t_p^2 + 1260 t_h^2 t_v^2 t_p^3 + 252 t_r^3 t_h^2 + 630 t_r^4 t_h^2 + 490 t_r^2 t_h^4 - 840 t_r t_p^2 t_h^2 - 840 t_p t_h^2 t_v^2 - 630 t_r^2 t_p^4 t_p - 1680 t_h^2 t_r^2 t_p \\
 & - 1470 t_h^4 t_r^2 t_p + 210 t_r^4 t_p t_h^3 - 35 t_p^3 t_v^4 + 21 t_r^2 t_p^3 + 7 t_r t_p^6 - 1260 t_r t_p t_h^3 t_r^2 - 630 t_r^4 t_h^2 t_v + 630 t_r^2 t_h^3 + t_v^7 + 1680 t_r t_p t_h^2 t_r^2 + 2520 t_r t_p t_h^2 t_r^2 + 35 t_p^4 t_v^2 - 490 t_h^4 t_v^2 - 434 t_r t_h^6 \\
 & + 434 t_p t_h^6 - 42 t_h^2 t_v^2 + 210 t_r^4 t_h^2 - 7 t_r t_v^6 - t_p^7 - 21 t_r^2 t_p^3) & 2 t_h + t_r < t_v \text{ and } t_v < t_p + t_h \\
 & \frac{1}{1260} \frac{1}{t_p^3 t_h^2 t_v^2} (128 t_h^7 + 1680 t_p t_r^2 t_h^4 + 210 t_h t_v^2 t_p^4 + 840 t_h^2 t_v^2 t_p^3 + 1680 t_h^2 t_v^2 t_p^2 + 252 t_r^3 t_h^2 + 630 t_r^4 t_h^2 + 490 t_r^2 t_h^4 - 840 t_r t_p^2 t_h^2 - 1120 t_p t_h^2 t_v^2 - 630 t_h^2 t_r^4 t_p \\
 & - 1680 t_h^2 t_r^2 t_p - 1470 t_h^4 t_r^2 t_p - 84 t_r t_p^3 t_h - 210 t_r t_p^4 t_h^2 - 280 t_r t_p^3 t_h^2 - 210 t_r t_p^3 t_h^4 - 84 t_h t_r^2 t_p + 420 t_r^4 t_p t_h^3 + 35 t_p^2 t_v^4 - 21 t_r^2 t_p^3 - 7 t_r t_p^6 - 420 t_p^3 t_h^2 t_v^2 - 280 t_p^3 t_h t_v^2 \\
 & + 210 t_r^4 t_p^3 t_h - 1344 t_r t_p t_h^3 - 630 t_r^4 t_h^2 t_v + 14 t_r^6 t_h + 672 t_r^2 t_h^3 + 14 t_p^6 t_h + 42 t_p^3 t_h^2 + 70 t_p^4 t_h^3 + 70 t_p^3 t_h^4 + 42 t_p^2 t_h^3 - t_v^7 + 1680 t_r t_p t_h^2 t_r^2 + 2520 t_r t_p t_h^2 t_r^2 - 35 t_p^4 t_v^2 \\
 & - 560 t_h^4 t_v^2 - 448 t_r t_h^6 + 448 t_p t_h^6 - 84 t_h^2 t_v^2 + 280 t_r^4 t_h^2 + 7 t_p t_v^6 + t_p^7 + 21 t_r^2 t_p^3) & t_p + t_h < t_v \text{ and } t_v < t_p + 2 t_h \\
 & - \frac{1}{90} \frac{1}{t_p^2 t_v^2} (-18 t_r^3 - 45 t_r^4 t_h - 35 t_r^2 t_h^2 + 60 t_r^2 t_h t_v + 45 t_r^4 t_p + 120 t_h t_r^2 t_p + 105 t_p t_r^2 t_h^2 - 15 t_r t_p^4 - 60 t_r t_p^3 t_h - 105 t_r t_p^2 t_h^2 - 30 t_p^2 t_v^2 + 45 t_r^4 t_v + 3 t_p^3 + 15 t_p^4 t_h + 35 t_p^3 t_h^2 \\
 & + 45 t_p^3 t_h^2 - 120 t_r t_p t_v^2 - 180 t_r t_p t_h t_v^2) & t_p + 2 t_h < t_v
 \end{aligned}$$

3^{ime} cas: $t_p > t_r$ et $t_p - t_r > 2t_h$

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{3} \frac{tp^3 + 3tp^2tr - tr^3 + 3tp^2th}{tp^2} && 0 < tv \text{ and } tv < tr \\
 \\
 E(\text{TB}) = & \frac{1}{1260} \frac{1}{tv^2tp^2th^2} (126tv^2tr^5 - tv^7 + 15tr^7 + 420tv^2th^2tp^3 + 168tvtp^5 - 105tp^2tr^4 + 280tp^3tr^3 + 1260tv^2tp^2tr^2th^2 - 105tr^4tv^3 + 7tp^6 - 35tp^5 - 70tvtr^6 + 35tr^3tv^4 - 420tv^2tr^3th^2 - 315tv^2tp^4 + 1260tp^2tv^2th^3) && tr < tv \text{ and } tv < tr + th \\
 & - \frac{1}{1260} \frac{1}{tv^2tp^2th^2} (-630tr^4th^2tv + 210tr^4th^3 + 70tr^3th^4 + 2th^7 + 252tr^5th^2 - 280tvtr^3th^3 + 126tv^2tr^5 + 840tvtp^2tr^2th^3 - 630tp^2th^4 - tv^7 + 15tr^7 - 84tvtp^5 - 420tv^2th^2tp^3 - 70th^4tv^3 - 84tp^4th^5 - 336tp^5th^5 - 504tvth^5 + 168tvtp^5 - 105tp^2tr^4 - 280th^3tv^3 + 280tp^3tr^3 - 1680tv^3tp^2th^3 - 2520tv^2tp^2th^2 + 42th^5tv^2 - 14tvth^6 - 105tr^4tv^3 + 14th^6 + 140th^6 + 7tp^6 - 35tp^6 - 70tvtr^6 + 35tr^3tv^4 + 14tp^6 - 280tp^3th^3 + 210th^4tv^2tp - 210tp^2tr^2th^4 + 630tv^2th^4 + 840tv^2tr^3th^2 - 315tv^2tp^4 - 1260tp^2tv^2th^3 + 210tv^4th^2tp + 1260tvtp^2th^4 + 840tp^2th^2tv^3 + 70tv^4th^3 + 1680tr^3th^2tvtp - 560tp^3tr^3 - 42tv^3th^2) && tr + th < tv \text{ and } tv < tr + 2th \\
 & \frac{1}{90} \frac{1}{tv^2tp^2} (31tp^4th^4 - 31tvth^4 - 3tv^5 + 90tv^2tp^2th + 9th^5 + 18tr^5 + 45th^4 + 35tr^3th^2 - 90tvtp^3 + 105tv^2tp^2th^2 + 45tv^2th^3 + 15tp^4 + 15th^4 - 35th^2tv^3 + 120tvtp^3 + 180tvtp^2th^2 - 60th^3tp^3 + 30tv^2tp^2 - 60tvth^3 - 45tr^4tv - 105tp^2th^2tr^2 - 120tp^2th^3 - 45tp^4tr^4) && tr + 2th < tv \text{ and } tv < tp \\
 & \frac{1}{1260} \frac{1}{tv^2tp^2th^2} (-630tr^4th^2tv + 630tr^4th^3 + 490tr^3th^4 + 126th^7 + 252tr^5th^2 - 840tvtr^3th^3 + 35tp^4tv^3 + 7tvtp^6 - tp^7 + 2520tvtp^2tr^2th^3 - 630tp^2th^2tr^4 + tv^7 - 35tv^4tp^3 - 21tv^2tp^5 - 1260tvtp^5 + 420tv^2th^2tp^3 - 490th^4tv^3 + 630th^5tv^2 - 434tvth^6 - 7tp^6 + 434tp^6 - 840tp^3th^3 + 1470th^4tv^2tp - 1470tp^2tr^2th^4 + 1260tp^2tv^2th^3 + 210tv^4th^2tp + 210tv^4th^3 + 1680tr^3th^2tvtp + 21tv^5tp^2 - 1680tp^3th^3 - 42tv^3th^2) && tp < tv \text{ and } tv < tp + th \\
 & \frac{1}{1260} \frac{1}{tv^2tp^2th^2} (630tr^4th^2tv + 210th^2tp^4 - 280th^3tvtp^3 - 1470tr^4th^3 - 2345tr^3th^4 - 1890tr^2th^5 + 38th^7 - 378tr^5th^2 + 2625tvtr^2th^4 + 2100tvtr^3th^3 + 2100tp^2tr^2th^5 + 1050tvtr^5 - 35tp^4tv^3 - 7tvtp^6 + tp^7 - 2520tvtp^2tr^2th^3 + 630tp^2th^2tr^4 - 3360tvtp^2tr^4 - tv^7 + 35tv^4tp^3 + 21tv^2tp^5 + 42tp^5th^2 - 2016tvtp^5 + 1050tv^2th^2tp^3 - 560th^4tv^3 - 84tp^4th^5 - 210tvth^6 + 420th^4tv^2tr - 2100th^3tv^2tr^2 - 630tr^6 + 70tp^4th^3 - 420tv^3tp^2th^2 + 1260tv^2tp^2th^3 - 3150tv^2tp^2th^2 + 1218th^5tv^2 - 273tvth^6 + 14th^6 + 7tp^6 + 798tp^6 - 1120tp^3th^3 + 2835th^4tv^2tp + 2835tp^2tr^2th^4 - 420tv^2th^4 + 1680tv^2tr^3th^2 + 2520tp^2tv^2th^3 - 210tvtp^2th^4 + 14tp^6th + 42tp^2th^5 + 420tv^4th^2tp + 280tv^4th^3 + 1260th^2tv^2tp^2tr + 1260th^3tv^2tp^2tr + 420th^2tp^3tr - 1260th^2tp^2tr^2 + 210tv^4tp^2th - 840tr^3th^2tvtp - 280th^3tp^3 - 84tvth^5 - 21tv^5tp^2 + 2100tp^2tr^3th^3 - 84tv^5th^2 + 70tp^3th^4) && tp + th < tv \text{ and } tv < 2th + tp \\
 & - \frac{1}{90} \frac{1}{tp^2tv^2} (-30tp^2tv^3 + 105tp^2th^2tr^2 + 45tp^2th^3 - 18tr^5 - 45th^4 - 35tr^3th^2 + 3tp^5 - 120tvtp^3 - 180tvtp^2th^2 + 35th^2tp^3 + 45tp^4 + 120tp^2th^3 + 45tr^4tv - 15tvtp^4 + 60tvth^3 - 105tvtp^2th^2 - 60tvth^3 + 15th^4) && 2th + tp < tv
 \end{aligned}$$

–4^{ime} cas : $t_p < t_r$

$$E(TB) := \left\{ \begin{array}{ll} \frac{tr + th}{60} \frac{60 tv^2 th^3 - 10 tv^2 tr^3 + 10 tr^2 tv^3 + 5 tv tr^4 - 5 tr tv^4 + tv^5 - tr^5 + 60 tv^2 tr th^2}{th^2 tv^2} & 0 < tv \text{ and } tv < tr \\ \frac{1}{60} \frac{1}{th^2 tv^2} (10 tv^4 th - 10 tv th^4 + 10 tr th^4 - 10 tr^2 tv^3 - 5 tv tr^4 + 5 tr tv^4 - tv^5 + tr^5 + 20 tr^3 th^2 - 60 tv tr^2 th^2 - 40 tv tr th^3 + 20 tr^2 th^3 + 2 th^5 + 270 tv^2 tr th^2 + 10 tr^4 th - 40 th tv tr^3 - 40 tr th tv^3 - 20 th^2 tv^3) & tr < tv \text{ and } tv < tr + th \\ \frac{1}{6} \frac{3 th^3 + 2 tr^3 + 6 tr^2 th + 7 tr th^2 - 6 tr^2 tv - 12 tv tr th - 7 tv th^2 - 2 tv^3}{tv^2} & tr + th < tv \text{ and } tv < tr + 2 th \\ & tr + 2 th < tv \end{array} \right.$$

B

Bibliographie

Références

- Accorsi, R., Bortolini, M., Gamberi, M., Manzini, R., & Pilati, F. (2017). Multi-objective warehouse building design to optimize the cycle time, total cost, and carbon footprint [Publisher: Springer]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(1), 839–854.
- Azzi, A., Battini, D., Faccio, M., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2011). Innovative travel time model for dual-shuttle automated storage/retrieval systems [Publisher: Elsevier]. *Computers & Industrial Engineering*, 61(3), 600–607.
- Bakdi, K., & Medkour, M. (2018). *Modélisation de temps de double cycle d'un système automatisé de stockage/déstockage as/rs à racks glissants* (Doctoral dissertation). Université de Tlemcen Algérie.
- Bessenouci, H. N., Sari, Z., & Ghomri, L. (2012). Metaheuristic based control of a flow rack automated storage retrieval system [Publisher: Springer]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(4), 1157–1166.
- Borovinšek, M., Ekren, B. Y., Burinskienė, A., & Lerher, T. (2017). Multi-objective optimisation model of shuttle-based storage and retrieval system [Publisher: Taylor & Francis]. *Transport*, 32(2), 120–137.
- Bozer, Y. A., & White, J. A. (1984). Travel-time models for automated storage/retrieval systems [Publisher: Taylor & Francis]. *IIE transactions*, 16(4), 329–338.
- Cardin, O., Castagna, P., Sari, Z., & Meghelli, N. (2012). Performance evaluation of in-deep class storage for flow-rack AS/RS [Publisher: Taylor & Francis]. *International Journal of Production Research*, 50(23), 6775–6791.
- Chen, Z., Li, X., & Gupta, J. N. (2015). A bi-directional flow-rack automated storage and retrieval system for unit-load warehouses [Publisher: Taylor & Francis]. *International Journal of Production Research*, 53(14), 4176–4188.
- 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 [Publisher: Taylor & Francis]. *International Journal of Production Research*, 54(4), 984–998.
- Cheng, C.-Y., Chen, Y.-Y., Chen, T.-L., & Yoo, J. J.-W. (2015). Using a hybrid approach based on the particle swarm optimization and ant colony optimization to solve a joint order batching and picker routing problem [Publisher: Elsevier]. *International Journal of Production Economics*, 170, 805–814.
- Chetty, O., & Reddy, M. S. (2003). Genetic algorithms for studies on AS/RS integrated with machines [Publisher: Springer]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22(11), 932–940.
- Chung, E., & Lee, H. F. (2008). A genetic algorithm for the generalised sequencing problem for automated storage and retrieval systems [Publisher: Inderscience Publishers]. *International Journal of Services Operations and Informatics*, 3(1), 90–106.
- Cinar, Z. M. (2017a). Configuration Design and Optimization of Circular Automated Storage and Retrieval System (C-AS/RS) [Publisher: Eastern Mediterranean University EMU-Doğu Akdeniz Üniversitesi (DAÜ)].
- Cinar, Z. M. (2017b). Configuration Design and Optimization of Circular Automated Storage and Retrieval System (C-AS/RS) [Publisher: Eastern Mediterranean University EMU-Doğu Akdeniz Üniversitesi (DAÜ)].
- Çinar, Z. M., Zeeshan, Q., & Korhan, O. (2021). A framework for industry 4.0 readiness and maturity of smart manufacturing enterprises: A case study [Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute]. *Sustainability*, 13(12), 6659.
- Črepinšek, M., Liu, S.-H., & Mernik, M. (2013). Exploration and exploitation in evolutionary algorithms: a survey. *ACM computing surveys (CSUR)*, 45(3), 1–33.
- Cunkas, M., & Ozer, O. (2019). Optimization of location assignment for unit-load as/rs with a dual-shuttle. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 7(2), 66–71.
- D'Antonio, G., Bruno, G., Traini, E., & Lombardi, F. (2019). An analytical model to estimate AVS/RS energy consumption [Publisher: Elsevier]. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 24–29.
- Djellouli, F., & Hassaine, S. (2008). Modelisation d'un système automatisé de stockage /destockage as/rs multi allées. *Mémoire de fin d'étude pour l'obtention de diplôme d'ingénieur en automatique*.
- Dong, W., & Jin, M. (2021). Travel time models for tier-to-tier SBS/RS with different storage assignment policies and shuttle dispatching rules [Publisher: Elsevier]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 155, 102485.

- Dooly, D. R., & Lee, H. F. (2008). A shift-based sequencing method for twin-shuttle automated storage and retrieval systems [Publisher: Taylor & Francis]. *IIE Transactions*, 40(6), 586–594.
- Dornberger, R., Hanne, T., Ryter, R., & Stauffer, M. (2014). Optimization of the picking sequence of an automated storage and retrieval system (AS/RS), 2817–2824.
- Dube, C. (2021). Calculating the cost of Asrs: 5 contributing factors. <https://us.blog.kardex-remstar.com/asrs-cost-factors>
- Ekren, B. Y. (2020). A simulation-based experimental design for SBS/RS warehouse design by considering energy related performance metrics [Publisher: Elsevier]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 98, 101991.
- Fandi, W., Kouloughli, S., & Ghomri, L. (2022). Multi-shuttle AS/RS dimensions optimization using a genetic algorithm—case of the multi-aisle configuration [Publisher: Springer]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(1), 1219–1236.
- Gagliardi, J.-P., Renaud, J., & Ruiz, A. (2015). Sequencing approaches for multiple-aisle automated storage and retrieval systems [Publisher: Taylor & Francis]. *International Journal of Production Research*, 53(19), 5873–5883.
- Ghomri, L., Zaki, S., GUEZZEN, A., & Tewfik, S. (2009). Continuous models for single and dual cycle times of a multi aisle automated storage and retrieval system [Publisher: Elsevier]. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(4), 1061–1066.
- Ghomri, L., & Sari, Z. (2017). Mathematical modeling of the average retrieval time for flow-rack automated storage and retrieval systems [Publisher: Elsevier]. *Journal of Manufacturing Systems*, 44, 165–178.
- Guezzen, A. H., Sari, Z., Castagna, P., & Cardin, O. (2013). Travel time modeling and simulation of a mobile racks automated storage/retrieval system [Publisher: IACSIT Press]. *International Journal of Engineering and Technology*, 5(3), 420.
- Guo, X., Yu, Y., & De Koster, R. B. (2016). Impact of required storage space on storage policy performance in a unit-load warehouse [Publisher: Taylor & Francis]. *International Journal of Production Research*, 54(8), 2405–2418.
- Hachemi, K., & Besombes, B. (2013). Integration of products expiry dates in optimal scheduling of storage/retrieval operations for a flow-rack AS/RS [Publisher: Inderscience Publishers Ltd]. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 15(2), 216–233.
- Hamzaoui, M. A., & Sari, Z. (2020). Cycle time models for the bidirectional flow-rack AS/RS. *FME Transactions*, 48(1), 211–226.

- Han, M.-H., McGinnis, L. F., Shieh, J. S., & White, J. A. (1987). On sequencing retrievals in an automated storage/retrieval system [Publisher: Taylor & Francis]. *IIE transactions*, 19(1), 56–66.
- Hao, J., Yu, Y., & Zhang, L. L. (2015). Optimal design of a 3D compact storage system with the I/O port at the lower mid-point of the storage rack [Publisher: Taylor & Francis]. *International Journal of Production Research*, 53(17), 5153–5173.
- Hausman, W. H., Schwarz, L. B., & Graves, S. C. (1976). Optimal storage assignment in automatic warehousing systems [Publisher: INFORMS]. *Management science*, 22(6), 629–638.
- 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 [Publisher: Elsevier]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 270, 545–556.
- Hu, P., Chen, H., Wang, X., & Shi, M. (2019). Model and Algorithm for Co-scheduling of Stackers and Single RGV during retrieval Process in AS/RS [Issue: 5], 688, 055083.
- 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 [Publisher: Elsevier]. *Computers & Operations Research*, 32(6), 1515–1544.
- Hwang, H., & KO, C. S. (1988). A study on multi-aisle system served by a single storage/retrieval machine [Publisher: Taylor & Francis]. *The International Journal Of Production Research*, 26(11), 1727–1737.
- Keserla, A., & Peters, B. A. (1994). Analysis of dual-shuttle automated storage/retrieval systems [Publisher: Elsevier]. *Journal of Manufacturing Systems*, 13(6), 424–434.
- Khajehzadeh, M., Taha, M. R., El-Shafie, A., & Eslami, M. (2011). Modified particle swarm optimization for optimum design of spread footing and retaining wall [Publisher: Springer]. *Journal of zhejiang university-science A*, 12(6), 415–427.
- Kouloughli, S. (2014). *Optimisation de systèmes automatisés de stockage/déstockage multi-allées et à racks glissants* (PhD Thesis). Doctoral dissertation.
- Kouloughli, S., Korso Feciane, M., & Sari, Z. (2022). Mobile rack AS/RS dimensions optimization for single cycle time minimization [Publisher: Springer]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1–22.
- Kouloughli, S., & Sari, Z. (2015). Multi-aisle AS/RS dimensions optimization for cycle time minimization [Publisher: Springer]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79(1), 675–692.

- Lehmann, T., & Hußmann, J. (2022). Travel time model for multi-deep automated storage and retrieval systems with different storage strategies [Publisher: Taylor & Francis]. *International Journal of Production Research*, 1–16.
- Lerher, T. (2006). Design and evaluation of the class-based multi-aisle AS/RS. *International journal of simulation modelling*, 5(1), 25–36.
- Lerher, T., Ekren, B. Y., Dukic, G., & Rosi, B. (2015). Travel time model for shuttle-based storage and retrieval systems [Publisher: Springer]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(9), 1705–1725.
- Lerher, T., Potrč, I., Šraml, M., & Tollazzi, T. (2010). Travel time models for automated warehouses with aisle transferring storage and retrieval machine [Publisher: Elsevier]. *European journal of operational research*, 205(3), 571–583.
- Lerher, T., & Šraml, M. (2012). Designing unit load automated storage and retrieval systems. In *Warehousing in the Global Supply Chain* (pp. 211–231). Springer.
- Liu, T., Xu, X., Qin, H., & Lim, A. (2016). Travel time analysis of the dual command cycle in the split-platform AS/RS with I/O dwell point policy [Publisher: Springer]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 28(3), 442–460.
- Lu, X., Shi, H.-y., Wang, L., & Li, D.-w. (2016). Analytical travel time models for multi-aisle automated storage and retrieval systems, 1–6.
- Ma, Y., & Wang, J. (2019). Travel time analysis for shuttle-based storage and retrieval system with middle input/output location, 1–6.
- Malmberg, C. J. (2000). Interleaving models for the analysis of twin shuttle automated storage and retrieval systems [Publisher: Taylor & Francis]. *International journal of production research*, 38(18), 4599–4610.
- 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) [Publisher: Taylor & Francis]. *International Journal of Production Research*, 54(14), 4286–4304.
- Material Handling Institute. (1977). Consideration for planning and installing an automated storage/ retrieval systems, Inc AS/RS document.
- Meller, R. D., & Mungwattana, A. (1997). Multi-shuttle automated storage/retrieval systems [Publisher: Springer]. *IIE transactions*, 29(10), 925–938.
- Metahri, D. (2019). *Contribution à L'évaluation Des Performances D'un Flow-rack As/rs à Chute Libre* (PhD Thesis). Université Mohamed Ben Ahmed - Oran 2.
- Metahri, D., & Hachemi, K. (2018). Retrieval–travel-time model for free-fall-flow-rack automated storage and retrieval system [Publisher: Springer]. *Journal of Industrial Engineering International*, 14(4), 807–820.

- Pan, J. C.-H., Shih, P.-H., Wu, M.-H., & Lin, J.-H. (2015). A storage assignment heuristic method based on genetic algorithm for a pick-and-pass warehousing system [Publisher: Elsevier]. *Computers & Industrial Engineering*, *81*, 1–13.
- 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 [Publisher: Springer]. *Flexible services and manufacturing journal*, *26*(3), 432–453.
- Rajković, M., Zrnić, N., Kosanić, N., Borovinšek, M., & Lerher, T. (2017). A Multi-Objective Optimization model for minimizing cost, travel time and CO2 emission in an AS/RS. *FME Transactions*, *45*(4), 620–629.
- Roodbergen, K. J., & Vis, I. F. (2009). A survey of literature on automated storage and retrieval systems [Publisher: Elsevier]. *European journal of operational research*, *194*(2), 343–362.
- Sari, Z. (2003). Modélisation, analyse et évaluation des performances d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel [Publisher: Thèse de Doctorat d'état, Université de Tlemcen, Algérie].
- Sari, Z., & Bessenouci, N. H. (2012). Design & modeling of a single machine flow rack AS/RS.
- Sarker, B. R., Mann Jr, L., & Leal dos Santos, J. R. (1994). Evaluation of a class-based storage scheduling technique applied to dual-shuttle automated storage and retrieval systems [Publisher: Taylor & Francis]. *Production planning & control*, *5*(5), 442–449.
- Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., & Tanchoco, J. M. A. (2010). *Facilities planning*. John Wiley & Sons.
- Vasili, M. R., Tang, S. H., & Vasili, M. (2012). Automated Storage and Retrieval Systems: A Review on Travel Time Models and Control Policies. In R. Manzini (Ed.), *Warehousing in the Global Supply Chain* (pp. 159–209). Springer London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2274-6_8
- Wang, H.-M., & Chou, F.-D. (2010). Solving the parallel batch-processing machines with different release times, job sizes, and capacity limits by metaheuristics [Publisher: Elsevier]. *Expert Systems with Applications*, *37*(2), 1510–1521.
- Wu, K.-Y., Xu, S. S.-D., & Wu, T.-C. (2013). Optimal scheduling for retrieval jobs in double-deep as/rs by evolutionary algorithms. *2013*.
- Xu, X., Gong, Y., Fan, X., Shen, G., & Zou, B. (2018). Travel-time model of dual-command cycles in a 3D compact AS/RS with lower mid-point I/O dwell point policy [Publisher: Taylor & Francis]. *International Journal of Production Research*, *56*(4), 1620–1641.

- Yan, X., Zhang, Z., Liu, Q., Lv, C., Zhang, L., & Li, S. (2021). An NSABC algorithm for multi-aisle AS/RS scheduling optimization [Publisher: Elsevier]. *Computers & Industrial Engineering*, 156, 107254.
- Yang. (2011). Bat algorithm for multi-objective optimisation [Publisher: Inderscience Publishers]. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 3(5), 267–274.
- Yang, Deb, S., & Fong, S. (2014). Metaheuristic algorithms: optimal balance of intensification and diversification [Publisher: Natural Sciences Publishing Corp]. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 8(3), 977.
- Yang, P., Miao, L., Xue, Z., & Qin, L. (2015a). Optimal storage rack design for a multi-deep compact AS/RS considering the acceleration/deceleration of the storage and retrieval machine [Publisher: Taylor & Francis]. *International Journal of Production Research*, 53(3), 929–943.
- Yang, P., Miao, L., Xue, Z., & Qin, L. (2015b). An integrated optimization of location assignment and storage/retrieval scheduling in multi-shuttle automated storage/retrieval systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 26(6), 1145–1159. <https://doi.org/10.1007/s10845-013-0846-7>
- Yetkin Ekren, B. (2021). A multi-objective optimisation study for the design of an AVS/RS warehouse [Publisher: Taylor & Francis]. *International Journal of Production Research*, 59(4), 1107–1126.
- Yu, H., & Yu, Y. (2019). Optimising two dwell point policies for AS/RSs with input and output point at opposite ends of the aisle [Publisher: Taylor & Francis]. *International Journal of Production Research*, 57(21), 6615–6633.
- Yu, Y., Liu, Y., & Yu, H. (2022). Optimal two-class-based storage policy in an AS/RS with two depots at opposite ends of the aisle [Publisher: Taylor & Francis]. *International Journal of Production Research*, 60(15), 4668–4692.
- Yue, L., Guan, Z., He, C., Luo, D., & Saif, U. (2017). Slotting optimization of automated storage and retrieval system (AS/RS) for efficient delivery of parts in an assembly shop using genetic algorithm: a case Study [Issue: 1], 215, 012002.

Résumé : Dans cette thèse de doctorat, nous nous sommes intéressés à l'optimisation des dimensions de deux types de systèmes automatisés de stockage et de déstockage, le système multi allées et le système racks glissants et cela en considérant une machine de stockage/ déstockage multi navettes qui peut transporter plusieurs palettes à la fois dans un même cycle. Nous avons commencé par étudié le système multi allées pour le cas où la machine multi navettes effectue des opérations de stockage et de déstockage dans la même allée ensuite dans des allées différentes. Les dimensions optimales ont été déterminées pour les deux cas en faisant appel à l'algorithme génétique, et en utilisant le modèle continu du temps multi cycles du système. Par la suite, nous avons étudié le système de stockage / déstockage à racks glissants. La particularité de ce système est que l'allée correspondant au rack ne s'ouvre que s'il y a une opération de stockage ou déstockage prévu dans ce dernier. Nous avons donc un temps correspondant au temps d'ouverture de l'allée représenté par un paramètre t_r . En se basant sur le modèle continu du temps multi cycles et en appliquant l'algorithme génétique nous avons pu déterminer les dimensions optimales du système à racks glissants pour différents valeurs données du paramètre.

Mots clés : Système automatisé de stockage/déstockage, machine multi navettes, multi allées, racks glissants, algorithme génétique, optimisation, dimensions optimales, temps multi cycles, machine multi navettes.

Abstract: In this PhD thesis, we are interested in optimizing the dimensions of two types of automated storage and retrieval systems of the multi-aisle system, and the mobile rack system, and this considering a multi-shuttle storage/retrieval machine which can transport several pallets at the same time in the same cycle. We started by studying the multi-aisle system for the case where the multi-shuttle machine performs storage and retrieval operations in the same aisle and then in different aisles. The optimal dimensions optimal dimensions were determined for both cases using the genetic algorithm, and using the continuous multi-cycle time model of the system. Thereafter, we studied the storage / retrieval system with mobile racks. The particularity of this system is that the aisle corresponding to the rack only opens if there is a storage or retrieval operation planned in the latter. We therefore have a time corresponding to the opening time of the aisle represented by a parameter t_r . Based on the continuous multi-cycle time model and by applying the genetic algorithm genetic algorithm we were able to determine the optimal dimensions of the mobile rack system for different given parameter values.

Keywords: Automated storage/retrieval system, multi-shuttle machine, multi-aisle, mobile racks, genetic algorithm, optimization, optimal dimensions, multi-cycle time, multi-shuttle machine.

الملخص: في أطروحة الدكتوراه هذه ، نحن مهتمون بتحسين أبعاد نوعين من أنظمة التخزين والاسترجاع الآلية للنظام متعدد الممرات ، ونظام الرف المحمول ، وهذا مع الأخذ في الاعتبار آلة التخزين \ الاسترجاع متعددة المكوك والتي يمكنها نقل عدة منصات نقالة في نفس الوقت في نفس الدورة. بدأنا من قبل دراسة النظام متعدد الممرات للحالة التي تقوم فيها الماكينة متعددة المكوك بعمليات التخزين والاسترجاع في نفس الممر ثم في ممرات مختلفة. تم تحديد الأبعاد المثلى لكلتا الحالتين باستخدام الخوارزمية الجينية ، وباستخدام النموذج الزمني متعدد الدورات المستمر للنظام. بعد ذلك ، درسنا نظام تخزين \ استرجاع مع رفوف متحركة. خصوصية هذا النظام هو أن الممر المطابق للحامل يفتح فقط في حالة التخطيط لعملية تخزين أو استرجاع الأخير. لذلك لدينا وقت يتوافق مع وقت افتتاح الممر الممثل بواسطة المعلمة t_r . اعتماداً على النموذج الزمني متعدد الدورات المستمر وتطبيق الخوارزمية الجينية الخوارزمية الجينية تمكنا من تحديد الأبعاد المثلى لنظام الرف المحمول لقيم المعلمات المختلفة.

الكلمات الرئيسية: نظام تخزين \ استرجاع آلي ، آلة متعددة المكوك ، ممر متعدد ، رفوف متحركة ، خوارزمية جينية ، تحسين أبعاد مثالية ، وقت متعدد الدورات ، آلة متعددة المكوك