

*République Algérienne Démocratique Et Populaire*  
*Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique*  
*Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen*  
*Faculté De Technologie*  
*Département De Génie Electrique Et Electronique*

## **Thèse de Doctorat en Productique**

**Intitulée :**

# **Pilotage d'un système automatisé de stockage/déstockage (AS/RS) multi-allées**

Présentée par :

**M<sup>me</sup>. Amina OUHOUD**

*Soutenue le 15 /10/2015 devant le jury :*

Président :

**Djamila HADJ SLIMANE**      Professeur      Université de Tlemcen-Algérie

Examineurs:

**Khalid HACHEMI**      MCA      Université d'Oran-Algérie

**Ahmed HAFIFA**      MCA      Université de Djelfa-Algérie

**Abdellah Kouzou**      MCA      Université de Djelfa-Algérie

**Sidi Mohamed MELIANI**      MCA      Université de Tlemcen-Algérie

Directeur de thèse :

**Zaki SARI**      Professeur      Université de Tlemcen-Algérie

**2014-2015**



## RÉSUMÉ

Dans ce travail nous étudions les systèmes automatisés de stockage/déstockage multi-allées soumis à une politique de stockage par classe. Dans une première partie, nous avons développé une approche discrète. Nous avons détaillé la modélisation mathématique du temps moyen de simple cycle pour chaque classe du système : la classe A, la classe B et la classe C.

Par la suite, nous présentons l'approche continue développée. Cette dernière est une approche analytique basée sur une approximation continue des différentes distributions discrètes exactes modélisant les déplacements horizontaux et verticaux de la machine S/R dans chaque classe.

Enfin, nous développons des modèles de simulation qui sont utilisés pour valider les temps de déplacement de simple cycle. Ces modèles sont développés en tenant compte des deux méthodes de stockage : le stockage aléatoire et le stockage par classe. Les résultats obtenus indiquent que l'erreur entre la simulation et les modèles analytiques est très faible ne dépassant pas les 5%. Par contre la différence du temps entre les deux politiques est autour de 35%. Cela signifie que le stockage par classe est plus performant que dans un AS/RS multi allées en termes de temps moyen de simple cycle.

**MOTS-CLÉS :** AS/RS multi allées, temps de simple cycle, stockage par classe, stockage aléatoire, modélisation mathématique, simulation.

## ABSTRACT

In this work, we are interested to a problem of storage assignment in multi-aisles automated storage retrieval system. In the first part, we developed a discreet approach. We have detailed mathematical modeling of the average single cycle time for each class of the system, class A, class B and class C.

Subsequently, we introduce continuous approach. The latter is an analytical approach based on continuous approximation of the various discrete distributions modeling the exact horizontal and vertical movements of the S/R machine in each class.

Finally, we develop simulation models to validate the time of simple cycle time. These models are developed taking into account the two storage methods: random storage and class-based storage. The obtained results indicate the error between simulation and analytical models is very low and does not exceed 5%. As against the time difference between the two policies is around 35%. This means that storage per class is more efficient in an AS/RS multi aisle in terms of average cycle time than random storage.

**KEYWORDS:** Multi-aisles AS/RS, simple cycle time, class based storage, random storage, mathematical modeling, simulation.

## ملخص

في هذا العمل نقوم بدراسة نظام تخزين و تفريغ أوتوماتيكي ذو مسارات متعددة و خاضع لسياسة التخزين بالأقسام. في الجزء الأول من هذه المذكرة، قمنا بتطوير عبارات رياضية تحليلية منفصلة بحيث قمنا بدراسة تفصيلية للنمذجة الرياضية لمتوسط الوقت لدورة واحدة لكل قسم: القسم أ، القسم ب والقسم ج.

وفيما يلي، قمنا بتطوير عبارات رياضية مستمرة. وهذا الأخير هو نهج تحليلي على أساس التقريب المستمر لمختلف التوزيعات المنفصلة التي تمثل الحركات الأفقية والعمودية لآلة التخزين والتفريغ في كل قسم.

وأخيراً، قمنا بتطوير نماذج المحاكاة التي تستخدم للتحقق من صحة متوسط الوقت. تم تطوير هذه النماذج مع مراعاة طريقتي التخزين: التخزين العشوائي والتخزين بأقسام. وتشير النتائج إلى أن الخطأ بين المحاكاة والنماذج التحليلية منخفض جداً لا يتجاوز 5%. بالمقابل الفارق الزمني بين السياستين هو حوالي 35%. هذا يعني أن التخزين بسياسة الأقسام في نظام تخزين أوتوماتيكي ذو مسارات متعددة فعال من حيث متوسط الوقت.

**الكلمات المفتاحية:** نظام تخزين و تفريغ أوتوماتيكي ذو مسارات متعددة متوسط الوقت، تخزين عشوائي، تخزين بأقسام، النمذجة الرياضية المحاكاة.

# Remerciements

---

Entreprendre une thèse est un travail long et souvent difficile aussi, pour ceux qui m'ont aidée et accompagnée ces dernières années. Finalement, ce mémoire de thèse est une œuvre collective puisque de nombreuses personnes y ont participé, de près ou de loin, avec leur soutien scientifique, moral ou affectif.

Mes remerciements et toute ma gratitude vont tout d'abord à SARI Zaki, Professeur de l'Université de Tlemcen, pour avoir su me guider tout au long de ces cinq années et me communiquer tout l'enthousiasme qui le caractérise.

Ma reconnaissance se porte également vers Madame Djamila Hadj Slimane, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté d'évaluer ce travail en qualité de Président de jury. Son analyse du manuscrit a été d'une grande aide pour la valorisation de celui-ci.

Que Messieurs MELIANI Sidi Mohammed, Maître de conférences à l'Université de Tlemcen, HACHEMI Khalid, Maître de conférences à l'université d'Oran, KOUZOU Abdellah et HAFIFA Ahmed, Maîtres de conférences à l'Université de Djelfa, trouvent ici l'expression de toute ma gratitude pour avoir accepté d'examiner ces travaux et me faire profiter de leurs interrogations pertinentes.

Il ne m'est pas possible d'oublier l'ensemble du Département Génie Electrique et Electronique de l'Université de Tlemcen qui a su prendre, par son soutien tant matériel que moral, et par l'intérêt porté tout au long de ces travaux, une part importante dans la réussite finale de cette modeste recherche. Je remercie également les membres du laboratoire MELT pour m'avoir notamment éclairé sur les relations entre ces travaux et ceux des communautés scientifiques voisines.

Je n'oublierai pas ceux qui m'ont soutenue durant toutes mes études : mes parents.

Une pensée particulière va enfin et bien sûr à mon mari et à mon fils pour leur soutien et leur amour. Et encore une fois, je leur présente toutes mes excuses pour les heures que mon travail leur a volé.

# Table des matières

---

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1: Introduction aux systèmes automatisés de stockage/déstockage</b>	
<b>1. Introduction .....</b>	<b>7</b>
<b>2. Système de manutention (Material Handling System MH).....</b>	<b>8</b>
2.1. Définition.....	8
2.2. Objectif du système de manutention .....	9
1.1. Principes de la manutention.....	9
1.2. Les équipements d'un système de manutention .....	11
<b>3. Systèmes automatisés de stockages et de déstockages (AS/RS).....</b>	<b>12</b>
3.1. Définition.....	12
3.2. Composition .....	12
3.3. Terminologie .....	13
3.4. Avantages et inconvénients des AS/RS.....	15
3.5. Types d'AS/RS .....	16
3.6. Méthodologies de stockage .....	21
3.7. Critères de performances des AS/RS .....	24
<b>4. Etat de l'art.....</b>	<b>26</b>
4.1. Modèles de simulation .....	26
4.2. Modèles analytiques .....	29
4.3. Comparaison entre les différentes politiques de stockage.....	38
<b>5. Récapitulatif des travaux.....</b>	<b>38</b>
<b>6. Conclusion.....</b>	<b>41</b>
<b>Chapitre 2 : Stockage par classe dans un AS/RS multi-allées-Modélisation mathématique -</b>	
<b>1. Introduction .....</b>	<b>43</b>
<b>2. Stockage par classe dans un AS/RS multi-allées .....</b>	<b>43</b>
<b>3. Hypothèses et Notations.....</b>	<b>45</b>
3.1 Hypothèses .....	45
3.2 Notations .....	46
<b>4. Partie 1 : Modélisation discrète du temps de simple cycle : .....</b>	<b>47</b>

4.1 Politique de Stockage aléatoire .....	47
4.2 Politique de Stockage par classe.....	48
4.3 Exemple et discussion .....	53
<b>5. Partie 2 : Modélisation continue du temps moyen de simple cycle :.....</b>	<b>54</b>
5.1 Temps moyen de simple cycle dans la Classe A .....	54
5.2 Temps moyen de simple cycle dans la Classe B .....	66
5.3 Temps moyen de simple cycle dans la Classe C .....	66
<b>6. Comparaison avec l'expression discrète et validation .....</b>	<b>66</b>
<b>7. Conclusion.....</b>	<b>69</b>

### **Chapitre 3: Simulation et analyse des résultats**

<b>1. Introduction .....</b>	<b>71</b>
<b>2. Simulation dans les systèmes de production .....</b>	<b>72</b>
2.1. Définition.....	72
2.2. Objectif de la simulation .....	72
2.3. Etapes et critères de réalisation d'une simulation .....	73
2.4 Langage de simulation.....	74
<b>3. Application de la simulation dans les AS/RS.....</b>	<b>75</b>
3.1. Etat de l'art .....	75
3.2. Simulation d'un AS/RS multi allée avec stockage aléatoire et par classe.....	79
3.3. Analyse des résultats .....	85
<b>4. Conclusion.....</b>	<b>88</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>89</b>
<b>Annexe.....</b>	<b>91</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>98</b>

# Table des figures

---

<b>Figure 1.1</b>	Structure générique d'un AS/RS .....	13
<b>Figure 1.2</b>	La machine S/R. ....	14
<b>Figure 1.3</b>	AS/RS à charge unitaire .....	17
<b>Figure 1.4</b>	AS/RS multi- allée .....	18
<b>Figure 1.5</b>	AS/RS à rack glissant.....	19
<b>Figure 1.6</b>	Avantage d' AS/RS à rack glissant .....	19
<b>Figure 1.7</b>	AS /RS à mini charge .....	19
<b>Figure 1.8</b>	AS/RS à carrousel .....	20
<b>Figure 1.9</b>	AS/RS à personne Embarqué .....	20
<b>Figure 1.10</b>	AS/RS à étagères profondes.....	21
<b>Figure 1.11</b>	AS/RS à convoyeur gravitationnel.....	21
<b>Figure 1.12</b>	Stockage par classe.....	24
<b>Figure 1.13</b>	Stockage par 3 classes (Ashayeri et al.2002) .....	38
<b>Figure 2.1</b>	Stockage par classe dans un AS/RS multi-allées .....	44
<b>Figure 2.2</b>	Déplacement de la machine S/R.....	45
<b>Figure 2.3.</b>	Fonctionnement simple cycle d'un AS/RS multi allée .....	47
<b>Figure 2.4</b>	Cas 1 : classe A dans tout le système.....	49
<b>Figure 2.5</b>	Cas 2 : classe A dans quelques allées du système.....	49
<b>Figure 2.6</b>	Zone A.....	50
<b>Figure 2.7</b>	Zone B.....	51
<b>Figure 2.8</b>	Zone C.....	52
<b>Figure 2.9</b>	Déplacement horizontal de la machine S/R dans la zone A (vue de haut).....	55
<b>Figure 2.10</b>	Distribution discrète exacte des variables $i_{pa}$ et $i_{ha}$ .....	56
<b>Figure 2.11</b>	Distributions continues approchée des variables $i_{pa}$ et $i_{ha}$ .....	56
<b>Figure 2.12.</b>	Distribution aléatoire de la variable $i$ modélisant le déplacement horizontal de la machine S/R dans la zone A.....	61
<b>Figure 2. 13</b>	Fonction de répartition $G(k)$ .....	62
<b>Figure 2.14</b>	Distribution de probabilité de la variable aléatoire $j$ modélisant le déplacement vertical de la machine S/R.....	63
<b>Figure 2.15</b>	Différents cas possibles.....	64
<b>Figure 2.16</b>	Comparaison entre les résultats donnés par le modèle continu et le modèle discret pour les trois classes .....	68
<b>Figure 3.1</b>	Etapas de la simulation.....	73
<b>Figure 3.2</b>	Organigramme de stockage aléatoire .....	82
<b>Figure 3.3</b>	Organigramme de stockage par classe. ....	84
<b>Figure 3.4</b>	Animation d'une seule allée d'un AS/RS multi allées. ....	85
<b>Figure 3.5</b>	Comparaison entre la simulation et les résultats analytiques (Stockage aléatoire).....	87
<b>Figure 3.6</b>	Comparaison entre la simulation et les résultats analytiques (Stockage par classe) .....	87
<b>Figure 3.7</b>	Comparaison entre le stockage par classe et le stockage aléatoire.....	88

# Table des tableaux

---

<b>Tableau 1.1</b>	Quatre grandes catégories d'équipements de manutention .....	12
<b>Tableau 1.2</b>	Différents types d'AS/RS.....	17
<b>Tableau 2.1</b>	Notations utilisées dans le présent document .....	46
<b>Tableau 2.2</b>	Paramètres du système étudié.....	53
<b>Tableau 2.3</b>	Taux de rotation des produits .....	54
<b>Tableau 2.4</b>	Temps moyen de simple cycle .....	54
<b>Tableau 2.5</b>	Comparaison entre les résultats donnés par le modèle continu et le modèle discret .....	67
<b>Tableau 2.6</b>	Temps moyen de simple cycle (stockage par classe) .....	68
<b>Tableau 3.1</b>	Les paramètres communs du modèle .....	80
<b>Tableau 3.2</b>	Configurations et résultats de simulation .....	85



# Introduction générale

---

Le contexte économique dans lequel les entreprises évoluent aujourd'hui ne permet plus de produire efficacement à partir des systèmes de production basés sur les principes du Taylorisme qui ont fait largement leurs preuves. La mondialisation de l'économie, la concurrence accrue, la personnalisation des produits, leur durée de vie toujours plus courte, des clients exigeants et leur demande toujours plus volatile, la concentration et le poids de la grande distribution, ... sont autant de facteurs qui rendent le combat économique de plus en plus difficile et appellent des solutions innovantes et performantes rapidement. Donc, un système nécessite des systèmes de production basés sur d'autres principes, ayant de nouvelles caractéristiques telles que la flexibilité, la réactivité et la robustesse.

Le FMS (Flexible Manufacturing System ou en français Système de fabrication flexible) est une technologie qui vise à rendre flexible l'ensemble de l'outil de production. C'est-à-dire, le préparer à s'adapter aux divers changements de son environnement, sans qu'il ait besoin d'engager de nouveaux investissements en biens d'équipement ou d'engendrer de longues pertes de temps. Sa finalité est de réaliser une multitude d'opérations hétérogènes à partir d'un nombre très limité de ressources.

Le système de manutention (Material Handling System MHS) est un élément fondamental d'un système flexible de production FMS car il relie les différents processus de production. Il fournit des matières premières, des pièces, des produits finis etc .... En raison de la nature automatisée de l'ensemble du processus de production, le MHS doit répondre avec rapidité à toutes les exigences des processus du système.

Les cinq aspects reconnus de MHS sont:

- **Déplacement:** les pièces, les matériaux et les produits finis doivent être déplacés d'un endroit à l'autre et doivent être déplacés d'une manière efficace et à moindre coût.
- **Temps:** les matériaux doivent être là où on en a besoin au moment où on en a besoin.

- **Emplacement:** les matériaux doivent être disponibles au bon endroit et prêt pour l'utilisation.
- **Quantité:** le taux de la demande varie entre les différentes étapes de fabrication. Donc, les matériaux doivent être mis à jour.
- **Espace:** l'espace de stockage et son utilisation efficace est un facteur clé dans le coût global d'une opération ou d'un procédé.

Le MHS est composé d'entrepôts de stockage tel que les systèmes automatisés de stockage/déstockage, de stocks tampons, de convoyeurs, de véhicules de transport, d'AGV, d'opérateurs....

Un système automatisé de stockage/déstockage (AS/RS) est une combinaison d'équipements et de systèmes de contrôle qui prennent en charge, stockage et déstockage des produits avec précision, exactitude et célérité sous un certain degré d'automatisation (**Material Handling Institute**).

Entre 1994 et 2004, il y a eu une augmentation significative du nombre d'AS/RS utilisés dans l'environnement industriel aux Etats-Unis (**Roodbergen et al. 2009**). Pendant les dernières décennies, plusieurs types d'AS/RS ont été développés pour traiter le nombre croissant de différents types de produits à stocker. Leur classification est basée sur leurs structures et leurs applications: AS/RS à charge unitaire, AS/RS à mini charge ou à charge réduite, AS/RS à carrousel, AS/RS à convoyeur gravitationnel, AS/RS à racks glissants, AS/RS multi allées. Ce dernier comporte plusieurs allées, toutes desservies par une seule machine S/R. Ceci permet le stockage d'un nombre important de produits (à cause de l'existence de plusieurs allées), mais avec un faible débit (à cause de l'utilisation d'une seule machine). Parmi les principaux avantages des AS/RSs multi-allées, on peut citer leur coût réduit. Le coût des machines S/R représente approximativement 40% de l'investissement initial d'un AS/RS. Le fait qu'un AS/RS multi-allées utilise une seule machine S/R lui confère un coût réduit par rapport aux autres types. Ceci représente l'un des principaux avantages des AS/RS multi-allées.

Dans un AS/RS, la machine S/R se déplace simultanément dans les deux directions, horizontale et verticale, pour réduire le temps de déplacement. Ceci est dit déplacement de Tchebychev. La machine S/R peut opérer soit en simple ou en double cycle. Dans un simple cycle, la machine S/R effectue, soit une opération de stockage, soit une opération de déstockage par cycle. Tandis que dans un double cycle, la machine S/R effectue une opération de stockage suivie d'une opération de déstockage dans le même cycle.

Plusieurs mesures de performances peuvent être utilisées pour évaluer un AS/RS. Les plus importantes sont: le taux d'utilisation de la machine S/R et le temps moyen nécessaire pour servir une requête de stockage ou de déstockage définie comme étant le temps qui sépare l'apparition de la requête jusqu'à la fin de son exécution.

Le temps de cycle est parmi les paramètres les plus importants d'un AS/RS. Il influe sur les performances du système global. Beaucoup de travaux ont été consacrés au temps de cycle de la machine S/R. La plupart de ces travaux concernent les AS/RS à charge unitaire. **Hausman et al. 1976** ont été parmi les premiers à développer un modèle analytique pour l'analyse des AS/RS à charge unitaire. Il aborde le problème de l'assignement optimal de stockage.

La politique de stockage des produits dans les casiers de stockage est un ensemble de règles qui sont utilisées pour attribuer les articles à des emplacements de stockage.

Plusieurs stratégies de stockage peuvent être trouvées dans la littérature pour l'AS/RS. Les quatre politiques souvent utilisées sont:

- Stockage dédié (dedicated storage assignment)
- Stockage aléatoire (random storage assignment)
- Stockage aléatoire ouvert (closest open location storage assignment)
- Stockage par classe (class-based storage assignment)

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

Cette thèse est donc une tentative dans ce sens où elle cherche à montrer la différence entre le stockage aléatoire et le stockage par classe dans un AS/RS multi allées par rapport au temps moyen de simple cycle.

Pour atteindre notre objectif, nous allons essayer :

- De développer deux modèles mathématiques, discrets et continus pour calculer le temps moyen de simple cycle d'un AS/RS multi-allées avec le stockage par classe (**Ouhoud et al.2015a**).

- Comparer les résultats trouvés avec ceux trouvés dans **Guezzen 2014**(le stockage aléatoire).

Un outil qui a rapidement gagné une bonne réputation dans la conception et l'analyse des systèmes automatisés de stockage /déstockage est la simulation par ordinateur. La simulation est un outil d'analyse puissant qui aide les ingénieurs et les planificateurs à prendre dans le temps des décisions intelligentes concernant la conception et l'opération d'un système. Par elle-même, la simulation ne résout pas les problèmes, mais elle les identifie clairement et évalue quantitativement les solutions alternatives. Comme un outil pour analyser "Quoi Si", la simulation offre des mesures quantitatives sur n'importe quel nombre de solutions proposées pour aider rapidement à restreindre la meilleure solution alternative.

En plus de notre modélisation mathématique, nous proposons une simulation avec le logiciel software SIMAN ARENA estimant et validant le temps de cycle et ceci, pour les deux politiques d'assignement citées précédemment. (**Ouhoud et al. 2015b**)

Le travail de recherche présenté dans cette thèse vise à modéliser analytiquement et par simulation le temps moyen de simple cycle d'un AS/RS multi-allées avec le stockage par classe.

Le travail s'est déroulé en trois étapes:

- Introduction aux systèmes automatisés de stockage déstockage
- Stockage par classe dans un AS/RS multi-allées : modélisation mathématique.
- Simulation et analyse des résultats.

Dans le premier chapitre, on reprend des généralités sur les systèmes de stockage ainsi que leurs principaux types d'applications dans l'industrie. Dans ce chapitre, nous introduisons quelques notions fondamentales relatives au système de stockage/déstockage. Par la suite, nous exposons une classification des AS/RS permettant de bien positionner les types de systèmes étudiés dans ce travail, les typologies de ces systèmes et quelques méthodologies de stockage. Enfin, nous présenterons un état de l'art comportant une étude réalisée sur les différents types d'AS/RS.

Dans le second chapitre, on donne des définitions plus précises sur les AS/RS multi-allées et le stockage par classe. Nous présenterons initialement la configuration d'un AS/RS multi-allées avec trois classes de stockage nommées A, B et C, les hypothèses et les notations utilisées dans le présent document. Par la suite, nous présenterons la formulation

du modèle mathématique enrichi par quelques exemples numériques. Une première approche de modélisation considère le temps de cycle exact comme la moyenne de tous les temps de déplacement de la machine S/R de chaque classe. Une deuxième méthode de modélisation sera basée sur une loi de probabilité représentant la distribution des différents temps de déplacement de la machine S/R et déterminera une valeur approchée du temps moyen de simple cycle de chaque classe. Une simulation numérique sera réalisée pour comparer les résultats des deux méthodes et valider la seconde par rapport à la première.

Le troisième chapitre de ce manuscrit est dédié au développement d'un générateur de modèles pour simuler les deux méthodologies de stockage dans un AS/RS multi-allées afin d'étudier et de mieux comprendre le comportement et la dynamique du modèle étudié. En premier lieu, nous avons procédé à l'implémentation du modèle développé dans le logiciel de simulation des systèmes de production ARENA. Par la suite, les différentes simulations réalisées nous ont permis d'exposer les résultats obtenus sous forme de graphes. Enfin, nous procédons à l'analyse des résultats et à la validation du modèle de simulation.

Finalement, la conclusion générale fait la synthèse des trois chapitres présentés dans cette thèse et revient sur les résultats obtenus.

# Chapitre 1

## Introduction aux systèmes automatisés de stockage /déstockage

---

<b>1. Introduction</b> .....	<b>7</b>
<b>2. Le système de manutention (Material Handling System MH)</b> .....	<b>8</b>
2.1. Définition.....	8
2.2. Objectif du système de manutention .....	9
1.1. Principes de la manutention.....	9
1.2. Equipements d'un système de manutention .....	11
<b>3. Les systèmes automatisés de stockages et de déstockages (AS/RS)</b> .....	<b>12</b>
3.1. Définition.....	12
3.2. Composition .....	12
3.3. Terminologie .....	13
3.4. Avantages et inconvénients des AS/RS.....	15
3.5. Types d'AS/RS.....	16
3.6. Méthodologies de stockage .....	21
3.7. Critères de performances des AS/RS .....	24
<b>4. Etat de l'art</b> .....	<b>26</b>
4.1. Modèles de simulation .....	26
4.2. Modèles analytiques .....	29
4.3. Comparaison entre les différents politiques de stockage.....	38
<b>5. Récapitulatif des travaux</b> .....	<b>38</b>
<b>6. Conclusion</b> .....	<b>41</b>

## 1. Introduction

Le système de manutention (**material handling**) constitue l'ossature d'un processus de production. En effet, bien que l'on rencontre quelques cas dans des ateliers flexibles d'usinage, la manutention est devenue l'élément essentiel des lignes d'assemblage correspondant aux critères de production suivants :

- Flexibilité importante : assemblage d'une famille de produits en petites séries;
- Cadence moyenne : 20 à 60 opérations par minute;
- Différence de temps opératoires sur les différents postes de travail;
- Faible durée de vie du produit assemblé;
- Fréquents changements de produits;
- Qualité optimale;
- Automatisation progressive du processus, les postes de travail pouvant être manuels ou automatisés;

Un système automatisé de stockage déstockage (AS/RS) est considéré comme l'un des principaux systèmes de manutention, il est largement utilisé dans les centres de distribution et les environnements de production automatisés. Les AS/RSs ont été utilisés, non seulement, comme des alternatives aux entrepôts traditionnels mais aussi comme une partie de systèmes de fabrication moderne grâce aux avantages importants qu'ils présentent: à savoir, un faible coût de main d'œuvre; un faible coût de stockage; une meilleure exploitation de l'espace de stockage; une meilleure traçabilité des produits stockés et un haut débit du système.

Ces systèmes fournissent la manutention rapide et efficace et peuvent fonctionner 24 heures par jour avec une supervision humaine minimale. Les AS/RSs nécessitent une analyse sérieuse pendant la phase de conception initiale (**Rouwenhorst et al. 2000; De Koster et al. 2007; Gu et al. 2010**), car au niveau de cette phase les concepteurs déterminent la capacité et le débit du système. Par exemple, pendant la phase de conception, les gestionnaires prennent des décisions sur la configuration de rack et la capacité (simple ou double profondeur), le nombre d'allées et de machines de stockage/déstockage (S/R machine) ainsi que l'emplacement de la station d'entrée/ sortie ou la station dépôt/livraison (I/O station). Une fois que les AS/RSs sont mis en œuvre, un certain nombre de décisions de contrôle doit être fait pour obtenir la performance (**Roodbergen et Vis. 2009**). Ces décisions de contrôle

comprennent les décisions sur les politiques de stockage, le point de repos de la machine S/R et l'ordonnancement etc ...

Beaucoup de questions et approches relatives à l'amélioration de l'efficacité des AS/RSs ont été abordées dans la littérature. Ce chapitre est structuré en trois sections. La section 1 nous donne des brèves informations sur le système de manutention (**Material handling**). La Section 2 nous présente un équipement parmi les équipements de MH qui est le système automatisé de stockage déstockage AS/RS. Cette présentation nous fournira des généralités ainsi que les principaux types, les avantages et les inconvénients des AS/RS etc... Enfin, la section 3 présente un aperçu de littérature des 40 dernières années. Elle présente une description détaillée de l'état de l'art des AS/RSs. L'accent est mis principalement sur les estimations de temps de cycle et les différentes politiques de contrôle telles que: la station de repos de la machine S/R, la méthodologie du stockage et ainsi de suite.

## **2. Système de manutention (Material Handling System MH)**

### **2.1. Définition**

Le système de manutention est un système intégré qui comprend tous les mouvements de matériaux<sup>1</sup> dans un processus de fabrication. Il a été défini par le **Materials Handling Division of American Society of Mechanical Engineers**, comme suit: *"la manutention des matériaux est l'art et la science impliquant le déplacement, l'emballage et le stockage de substances sous n'importe quelle forme "*. La définition utilisée actuellement de la manutention a été présentée par **Tompkins et al. 1996** comme étant la fonction de *" Délivrer le bon matériau en bonne quantité, au bon lieu, à la bonne date et avec les bonnes méthodes"*. Cependant, ces dernières années, elle a pris une connotation plus large. La manutention pouvant être considérée comme ayant cinq dimensions distinctes : mouvement, quantité, temps, espace et contrôle (**Meyers et Stephens.2005**). Les matières premières et les pièces doivent être livrées à l'atelier de travail et les produits finis doivent être livrés vers les clients. La manutention est aussi définie par le **Material Handling Industry of America** comme: *" Le déplacement, le stockage, la protection et le contrôle des matériaux pendant le processus de fabrication et de distribution"*. Nous remarquons que commençant avec n'importe quelle définition de manutention, elle devrait inclure la notion de temps et de lieu. La manutention devrait également être étudiée dans un contexte de système. En plus de cela, une définition approfondie de manutention doit inclure l'aspect humain. En outre, l'installation

---

<sup>1</sup> Matériaux : Les matières premières+les encours (Work-in-process) +Les produits finis+les ressources mobiles+ les déchets



de l'espace dans lequel sont logées les opérations doit être considérée comme une partie du système. Enfin, la définition de manutention doit contenir une contrepartie économique. Compte-tenu de tous ces facteurs, une définition plus complète pourrait être la suivante (**Kulwiec. 1985**)" *Le système de manutention est un système ou une combinaison de méthodes, des installations, de la main-d'œuvre et de l'équipement pour le transfert, l'emballage et le stockage de matériaux pour atteindre des objectifs spécifiques* ". Il est important de noter les facteurs qui ne font pas partie de la définition ainsi que celles qui le sont. Par exemple, la taille et le degré de mécanisation ne sont pas des parties de la définition. L'opération de manutention peut être à la fois simple et petite, et implique seulement quelques équipements de base ou elle peut être vaste, complexe ou automatisée.

## **2.2. Objectif du système de manutention**

L'objectif principal d'un système de manutention est de réduire le coût unitaire de production. Les autres objectifs sont subordonnés:

- Réduire le temps de cycle de fabrication: Le temps total nécessaire pour fabriquer un produit à partir de la réception des matières premières aux produits finis peut être réduit par manutention efficace.
- Réduire les délais et les dégâts.
- Favoriser la sécurité et améliorer les conditions de travail.
- Maintenir ou améliorer la qualité des produits.
- Améliorer la productivité et l'efficacité : Cette amélioration peut être réalisée par des matériaux qui déplacent d'une manière rapide, efficace et avec des moyens économiques si possibles.

## **1.1. Principes de la manutention**

Généralement, un ingénieur de MH a besoin de plusieurs années d'expérience qui peuvent être exercées pour trouver la solution des problèmes de MH ou pour concevoir un système de manutention. Ce qui fait que lors de la conception d'un système de manutention, il est important de se référer aux meilleurs cas pratiques pour s'assurer que tous les équipements et les processus —y compris manuel, semi-automatique et automatique — travaillent ensemble comme un système unifié. En analysant les objectifs du processus de manutention et en les alignant aux directives, telles que les principes de la manutention, un système bien conçu améliore le service à la clientèle, réduit les stocks et les délais de livraison ainsi que les coûts

globaux de traitement dans la fabrication, de la distribution et du transport. Ces principes comprennent:

- L'orientation : Il encourage l'étude de toutes les relations du système disponible avant d'aller vers une planification préliminaire. L'étude comprend les méthodes existantes, les problèmes à gérer etc...
- La planification : Tout MH devrait être le résultat d'un plan tenant compte des besoins, des objectifs de performance et des spécifications fonctionnelles et les es méthodes proposées sont complètement définies dès le début.
- Les systèmes: Les activités de la manutention et de stockage des matériaux devraient être pleinement intégrées pour former un système opérationnel coordonné qui couvre la réception, l'inspection, le stockage, la production, l'assemblage, l'emballage, la sélection des commandes, l'expédition et le transport.
- La charge unitaire: Les charges unitaires doivent être de taille appropriée et configurée d'une manière qui permet d'atteindre les flux de matériels et des objectifs à chaque étape de la chaîne d'approvisionnement.
- L'utilisation de l'espace: Utilisation efficace et efficiente de tout l'espace disponible.
- La standardisation: elle encourage la normalisation des méthodes et l'équipement de manutention.
- L'ergonomie: Les capacités humaines doivent être reconnues et respectées dans la conception des tâches et des équipements de la manutention pour assurer des opérations sûres et efficaces.
- L'énergie: La consommation d'énergie doit être considérée comme un critère lors de la conception.
- L'écologie: en encourageant un impact minimal sur l'environnement au cours de la manipulation de matériaux.
- La mécanisation: les opérations de MH devraient être mécanisées et/ou automatisées lorsque qu' est possible d'améliorer l'efficacité opérationnelle, d'accroître la réactivité, d'améliorer la cohérence et la prévisibilité, de diminuer les coûts d'exploitations, et d'éliminer le travail manuel répétitif ou potentiellement dangereux.

- La flexibilité<sup>2</sup>:elle encourage les méthodes et le matériel que l'on peut utiliser dans tous les types de conditions.
- La simplification: cette simplification des méthodes et des processus éliminent les déplacements inutiles.
- Le flux dans le système: il encourage l'intégration de flux de données (flux d'information) avec des flux de matière physique (flux physique).
- Le coût: Une analyse économique approfondie doit tenir compte du cycle de vie de tous les MHS et les solutions disponibles.
- La maintenance: permet une préparation du plan d'entretien préventif et des réparations planifiées.

### **1.2. Equipements d'un système de manutention**

Les équipements d'un système de manutention sont des équipements qui se rapportent au déplacement, au stockage, au contrôle et à la protection des matériaux tout au long du processus de fabrication, de distribution et de consommation. Selon (**Groover. 2001**) MH contient :

- des matériaux de transport,
- des systèmes de stockage,
- des systèmes de contrôle.

Material Handling a été regroupé en quatre catégories qui sont résumées dans le *tableau 1.1*.

- La première catégorie comprend les équipements qui circulent dans des chemins fixes (point à point) comme les véhicules auto-guidés (AGV).
- La deuxième catégorie comprend les équipements qui occupent des surfaces fixes par exemple les systèmes automatisés de stockage et de déstockage (AS/RSs).
- La troisième catégorie comprend les équipements qui occupent des surfaces flexibles et qui circulent dans des chemins flexibles tels que les chariots élévateurs.
- La quatrième catégorie regroupe tous les outils auxiliaires et les équipements (**Meyers et Stephens. 2005**).

---

<sup>2</sup> Flexibilité (*flexibility*) : C'est la faculté d'un système à s'adapter réellement au changement de l'environnement.

**Tableau 1.1** Les quatre grandes catégories d'équipements de manutention (**Meyers et Stephens.2005**)

types	Description	Exemple
Equipement à chemin fixe (point à point)	Cet équipement sert MH. Il besoin d'une longueur prédéterminé ou chemin d'accès fixe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Train</li> <li>• Convoyeur</li> <li>• AGVs</li> </ul>
Equipement avec surface fixe	Cette classe d'équipements peut servir n'importe quel point dans une zone 3D	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AS/RS</li> <li>• Jib cranes</li> <li>• Bridge cranes</li> </ul>
Equipement à routage flexible et surface flexible	Cette catégorie d'équipement peut se déplacer dans n'importe quelle zone de l'installation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chariots</li> <li>• Clark</li> <li>• Véhicules manuels</li> </ul>
Outils auxiliaires	Cette catégorie d'équipement comporte tous les outils auxiliaires	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Palette</li> <li>• Contenaire</li> </ul>

Depuis 1950, les AS/RSs ont été les principaux équipements utilisés pour le stockage dans les systèmes de manutention et le contrôle des stocks. Les AS/RSs sont largement utilisés dans les centres de production et de distribution automatisés et jouent un rôle essentiel dans les systèmes de production intégrée ainsi que dans des usines modernes.

### 3. Systèmes automatisés de stockages et de déstockages (AS/RS)

#### 3.1. Définition

Selon **Material Handling Institute** un AS/RS peut être défini comme « *une combinaison d'équipements et de système de contrôle qui prennent en charge, le stockage et le déstockage des produits avec précision, exactitude et célérité sous un certain degré d'automatisation* ».

En terme général, un AS/RS peut transporter, stocker et déstocker des articles (produit, outil, palette...) sans intervention humaine. Toutes ces opérations sont contrôlées à l'aide d'un système de contrôle sophistiqué.

#### 3.2. Composition

La définition précédente couvre une grande variété de systèmes automatisés de stockage et de déstockage avec différents degrés de complexité<sup>3</sup> et avec différentes tailles. Cependant, le

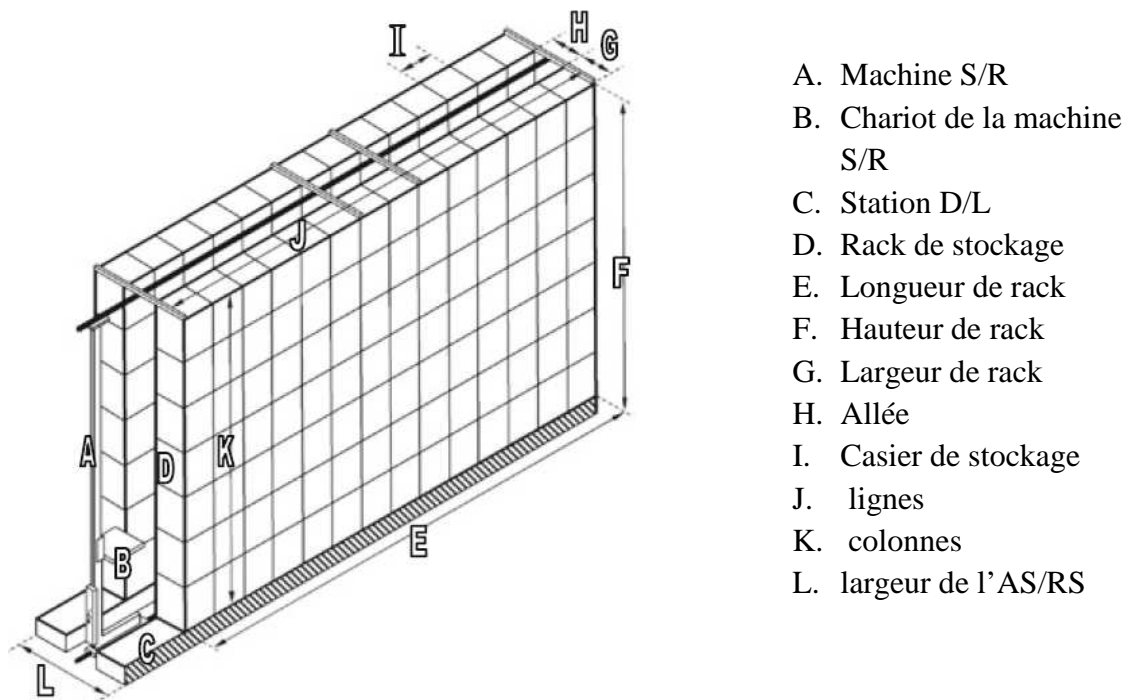
<sup>3</sup> La complexité d'un système varie exponentiellement avec sa taille. Si M est le nombre de composants d'un système et N le nombre d'états de chaque composant, le système aura donc  $N^M$  états et le nombre de lien entre les composants sera de  $M(N-1)/2$ .

terme “système automatisé de stockage et de déstockage “ signifie un type de système comprenant : (Lee et al. 1996 ; Van den Berg et Gademann. 2000).

- Une ou plusieurs allées parallèles comportant un rack sur chaque côté et chaque rack comporte un certain nombre de casiers;
- Une machine de stockage et de déstockage (également dénommée machine S/R) ;
- Des stations d'entrée/sortie (I/O) (également dénommées la station dépôt/livraison (P/D)) ;
- Un convoyeur ;
- Un ordinateur central de surveillance et de contrôle.

Certains des composants cités dans le paragraphe précédent sont indiqués dans la *Figure 1.1*.

Pour décrire les différents composants d'un AS/RS nous allons utiliser les terminologies suivantes



*Figure 1.1* Structure générique d'un AS/RS

### 3.3. Terminologie

- Casier(ou cellule de stockage) :c'est l'espace tridimensionnel nécessaire au stockage d'un produit ou d'un ensemble de produits.

- Rack : formé d'un ensemble de casiers placés l'un à côté de l'autre formant les lignes et l'un au-dessus de l'autre formant les colonnes
- Allée : l'allée est l'espace entre deux racks où circule la machine de stockage/déstockage.
- Machine S/R : la machine de stockage/déstockage (Storage/Retrieval machine, S/R machine) est une structure mobile qui se déplace d'une allée à une autre et d'un casier à un autre pour stocker ou déstocker des produits.

La machine S/R se compose d'une armature droite rigide dans laquelle est montée un système de rail pour le mouvement vertical du plateau. Des roues sont attachées à la base de l'armature pour permettre le glissement horizontal le long d'un système de rail installé en bas de l'allée. Un rail parallèle situé au dessus de la structure de stockage est utilisé pour maintenir l'alignement de l'armature à la structure.

Le plateau est constitué d'un mécanisme de navette pour déposer et extraire les produits de leurs casiers de stockage. La conception du système de navette doit permettre aux produits de transiter du plateau de la machine S/R à la station dépôt/livraison et vice-versa.

La machine S/R est conçue pour des charges allant de 50 kg pour les colis, à 1 000 ou 1 500 kg pour les palettes, voire à plusieurs tonnes pour les bobines d'acier. Leur propre poids est d'environ 15 tonnes pour les versions transportant des palettes. De plus, certains modèles pour les colis peuvent atteindre des vitesses de 6 m/s.



**Figure 1.2** Machine S/R.

- La station D/L : la station de dépôt/livraison (*Pickup/Deposit station, P/D station*), est aussi appelée station d'entrée/sortie. C'est le point par où les charges sont transférées dans et hors des AS/RS. Le transfert des produits de

l'AS/RS aux autres systèmes de production se fait soit manuellement soit en utilisant des systèmes de transfert tels que les AGVs et les convoyeurs.

- **Système de Contrôle** : comme tous les systèmes de contrôle, c'est un système de contrôle doté d'une interface homme-machine pour la supervision et la coordination de tous les équipements en temps réel. Nous pouvons, par exemple voir sa nécessité dans le stockage dédié car il indique à la machine S/R l'emplacement exact du produit et s'il est libre ou non pour le stockage et la guide vers l'emplacement du produit à déstocker. Le système de contrôle est composé de deux entités principales :
- Des ordinateurs à base de microprocesseurs dotés de mémoire et de puissances de calculs plus ou moins grandes.
- Un réseau de communication numérique

### **3.4. Avantages et inconvénients des AS/RS**

**Lambert et al. 1998** indiquent qu'il y a plus de 750 000 installations d'AS/RS à travers le monde. Les AS/RSs impliquent souvent des investissements importants et des coûts de fonctionnement (par exemple les coûts du terrain, le coût d'installation des équipements, coût de la main-d'œuvre). Alors, la question qui se pose est de savoir pourquoi ces entrepôts existent-ils et pour quelles raisons ?

#### **3.4.1 Avantages**

Les raisons sont nombreuses, nous pouvons citer :

- La réduction de l'espace utilisé ;
- L'amélioration de la gestion des stocks et du contrôle : supervision et contrôle en temps réel ;
- La réduction des temps de réponse : réponse rapide à la localisation, le stockage ou le déstockage des produits.
- La réduction des stocks ;
- La réduction des risques de rupture de stocks du fait que le stock est contrôlé en temps réel ;
- La réduction de la main d'œuvre à cause de l'automatisation.

- La diminution des coûts de fonctionnement : un degré d'automatisation très élevé implique la diminution de nombres du personnel donc la réduction des coûts.
- L'amélioration de la sécurité : pas d'intervention humaine.
- La grande flexibilité de production : grâce à la possibilité d'interfaçage avec les systèmes flexibles de production (FMS), AGV...

### **3.4.2 Inconvénients**

Si les AS/RS offrent des avantages, elles présentent quand même quelques inconvénients tels que :

- Les coûts d'investissement élevés (environ \$ 634,000 pour une seule allée et environ \$ 103,000 pour le système de contrôle **Zollinger. 1999**),
- Une faible flexibilité : une fois installés. Ils sont très difficiles à modifier.

### **3.5. Types d'AS/RS**

Pendant les dernières décennies, plusieurs types d'AS/RS ont été développés pour traiter la variance des produits à stocker. Ces AS/RS se différencient suivant le poids, la taille et le volume des charges à stocker. Ils sont classés selon leur configuration physique, à savoir :

- Le nombre de machines S/R ;
- La disposition des racks et des allées dans le système ;
- Les positions des stations D/L ;
- La profondeur des racks (nombre maximum de produits pouvant être stockés dans un même casier).

Les AS/RS sont classés suivant leurs structures et leurs applications. Nous pouvons citer parmi les plus importants :


- Les AS/RS à charge unitaire.
- Les AS/RS multi-allées.
- Les AS/RS à racks glissants.
- Les AS/RS à mini charge ou à charge réduite.
- Les AS/RS à carrousel.
- Les AS/RS à personne embarquée.
- Les AS/RS à étagères profondes.



- Les AS/RS à convoyeur gravitationnel.

Le Tableau 1.2 est une description détaillée de chaque type avec ses applications et ses avantages.

**Tableau 1.2** Les différents types d'AS/RS

Types	Description
AS/RS à charge unitaire	<p>Les AS/RS à charge unitaire sont constitués de racks parallèles séparés par des allées (<i>Figure 1.3</i>) qui permettent aux machines S/R de circuler pour stocker et déstocker les produits.</p> <p>Chaque machine S/R se déplace horizontalement et verticalement, elle est guidée par des rails au sol et dotée d'un mécanisme qui prend des charges à l'emplacement du stockage et aux stations de dépôt livraison</p> <p>Un AS/RS à charge unitaire est utilisé pour stocker et récupérer des charges qui sont palettisées ou stockées dans des conteneurs de taille standard. Dans ce type de système, les charges ont généralement plus de 250 kg par unité (<b>Singh. 1996</b>).</p> <p>Le système à charge unitaire est le système générique des systèmes AS/RS, les autres types d'AS/RS ne sont que des variations de celui ci.</p>
 <p><i>Figure 1.3</i> AS/RS à charge unitaire</p>	
AS/RS multi-allées	<p>Un AS/RS multi-allée est composé d'un ensemble de racks fixes disposés deux à deux en parallèle et séparés par des allées.</p> <p>Chacune de ces allées appelées 'allée de desserte' donne accès à deux racks.</p> <p>Une allée commune placée perpendiculairement aux racks relie toutes les allées de desserte (<i>figure 1.4</i>).</p> <p>Une machine de stockage/déstockage dessert l'ensemble des racks ; de ce fait cette machine S/R 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 dont l'une des extrémités est équipée d'une station de dépôt/livraison.</p>

Ce type d'AS/RS permet le stockage d'un nombre important de produits en raison de l'existence de plusieurs allées, mais avec un faible débit à cause de l'utilisation d'une seule machine. Parmi les principaux avantages des AS/RS multi allées, on peut citer leur coût réduit. Le coût des machines S/R représente approximativement 40% de l'investissement initial d'un AS/RS. Le fait qu'un AS/RS multi-allées utilise une seule machine S/R lui confère un coût réduit par rapport aux autres types.

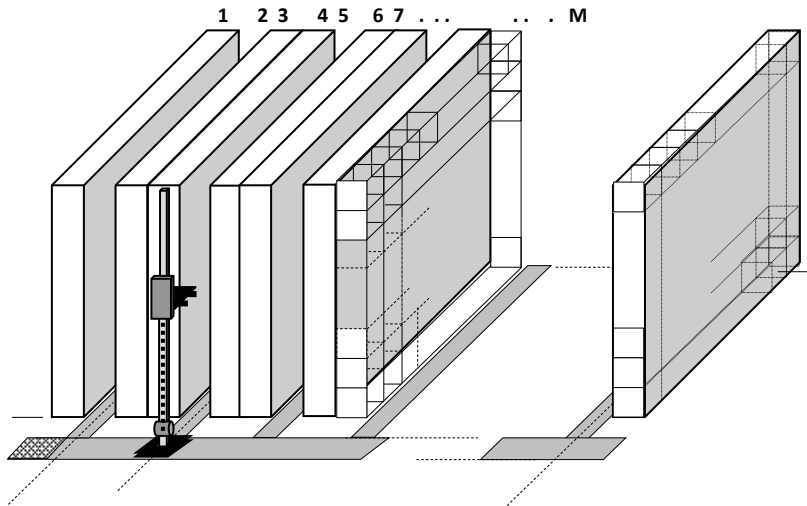


Figure 1.4 AS/RS multi- allées

AS/RS à racks glissant ou rayonnage mobile

Ce type de système est une variation des AS/RS multi allées .Les allées de service dans un AS/RS à rack glissant n'apparaissent que lorsqu'une opération de stockage ou de déstockage est prévue dans les racks correspondants. (figure 1.5).

Au repos, il existe une seule allée de service. Les racks formant le système glissent latéralement par un mécanisme sur des rails de telle sorte que l'on puisse ouvrir une allée entre deux racks mitoyens

Un AS/RS à rayonnages mobiles est très utilisés pour l'archivage et le classement de documents. Lorsqu'on dispose d'une surface relativement limitée ou qu'on possède un stock dont les entrées ou sorties sont relativement variables, il peut être utile d'acquérir des systèmes de stockage pratiques et peu encombrants. Ceux-ci permettent d'augmenter la capacité de l'entrepôt de 80 à 90 % par rapport à des équipements fixes (figure 1.6). Les rayonnages mobiles sont fixés sur des chariots et se déplacent ensuite sur des rails.

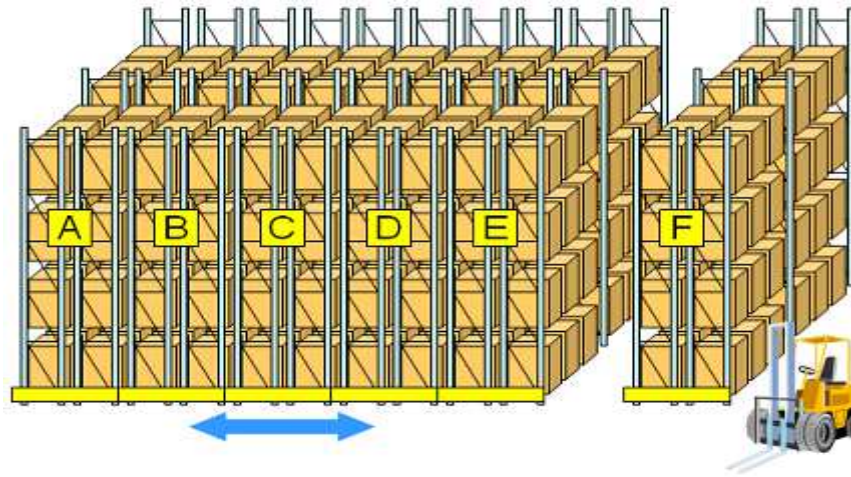
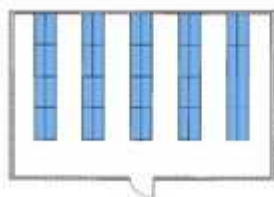
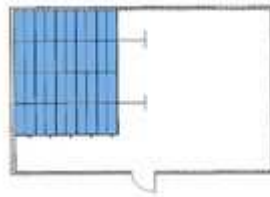


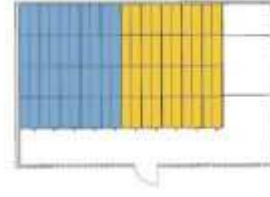
Figure 1.5 AS/RS à rack glissant



Solution initiale



Economie d'espace



Augmentation du stockage

Figure 1.6 Avantage d'AS/RS à rack glissant

AS/RS à mini charge ou à charge réduite

Ce système est conçu pour stocker de petites charges telles que les pièces individuelles, les outils et les fournitures qui sont contenus dans des bacs ou tiroirs dans le système de stockage (un casier peut contenir un ou plusieurs produits). Un tel système est recommandé lorsque la disponibilité de l'espace est limitée. Ce système, nécessitant un investissement relativement faible, et présentant la possibilité de traiter de petites charges, est très utilisé dans l'industrie.

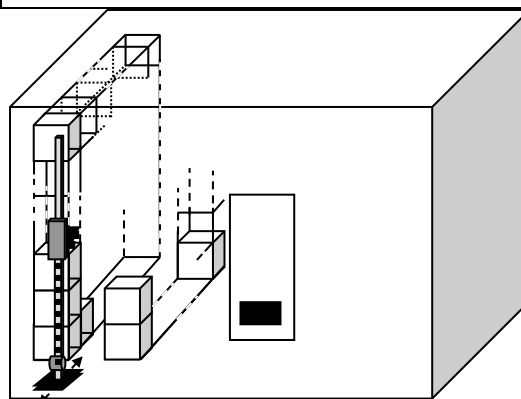


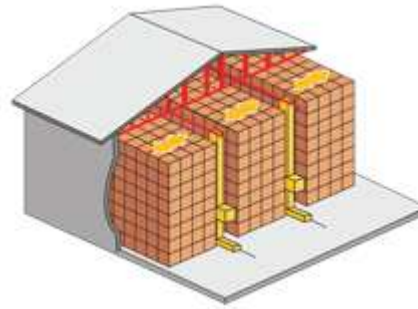


Figure 1.7 AS/RS à mini charge (Guezzen 2014)

AS/RS à carrousel

Les carrousels sont une bonne alternative aux systèmes à mini charge (Tompkins. 84). Dans ces systèmes, ce sont les casiers qui se déplacent vers l'extrémité du rack où un opérateur (personne ou robot) stocke/déstocke les produits. Le système consiste en un

	<p>ensemble de casiers montés en carrousel et se déplaçant horizontalement ou verticalement vers une extrémité du rack où l'opération de stockage /déstockage sera réalisée.</p>
<div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;"><b>Figure 1.8</b> AS/RS à carrousel</p>	
<p>AS/RS à personne embarquée</p>	<p>Les AS/RS à personne embarquée sont des systèmes permettant de stocker plusieurs petits produits dans chaque casier. Une personne montée sur une plate-forme mobile, choisit dans chaque casier les produits à déstocker, elle emmagasine aussi dans le casier adéquat, les produits à stocker.</p> <p>Ce système permet de stocker/déstocker plusieurs produits en une seule opération. Ce qui permet de réduire les temps de stockage/déstockage. L'opérateur, après les avoir déstocké, charge les produits sur la machine S/R qui les transporte vers la station de dépôt/livraison.</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;"><b>Figure 1.9</b> AS/RS à personne embarquée</p>
<p>AS/RS à étagères profondes</p>	<p>Les AS/RS à étagères profondes sont une variation de l'AS/RS à charge unitaire. La différence est que dans les AS/RS à étagères profondes, plusieurs charges unitaires peuvent être stockées dans le même casier l'une après l'autre.</p> <p>Les produits sont entreposés en multicouche plutôt qu'en une seule ou double couche jusqu'à 10 produits par ligne. Cela amène à une haute densité de stockage autorisant un haut usage de l'espace.</p>



**Figure 1.10** AS/RS à étagères profondes

AS/RS à convoyeur gravitationnel

L'AS/RS à convoyeur gravitationnel est composé d'un rack profond composé d'un ensemble de casiers pouvant contenir plusieurs produits placés les uns à la suite des autres. Chaque casier est muni d'un convoyeur gravitationnel à base de rouleaux ou roues libres inclinés de telle façon à permettre le glissement des produits d'un bout à l'autre du casier, donc d'une face à l'autre du rack. Les produits sont stockés d'un côté du rack (face de stockage) par la machine de stockage. Ils glissent sur les convoyeurs gravitationnels et sont déstockés de l'autre côté du rack (face de déstockage) par la machine de déstockage. Ce système est une variation des AS/RS à étagères profondes. Il est conçu pour stocker soit des produits individuels, soit des charges en palettes ou container.



**Figure 1.11** AS/RS à convoyeur gravitationnel

### 3.6. Méthodologie de stockage

Les produits doivent être mis dans des endroits de stockage avant d'être retirés pour satisfaire les commandes des clients. La politique d'assignement des produits dans les casiers de stockage est un ensemble de règles qui sont utilisés pour attribuer les articles à des emplacements de stockage.

Il existe plusieurs méthodes pour attribuer les produits vers les casiers de stockage dans des racks. Cinq stratégies de stockage souvent utilisés pour les AS/RS sont décrites en détail dans **Hausman et al. 1976** ou **Graves et al. 1977** .Ces règles sont :

- Stockage dédié (dedicated storage assignment)
- Stockage aléatoire (random storage assignment)
- Stockage aléatoire ouvert (closest open location storage assignment)
- Full turnover (full-turnover-based storage assignment)
- Stockage par classe (class-based storage assignment)

### **3.6.1. Stockage dédié**

Pour la méthode de stockage dédié, chaque type de produit est affecté à un emplacement fixe bien déterminé par le système de contrôle. Cette méthode de stockage a des avantages et des inconvénients. Les principaux inconvénients sont :

- Ses besoins en espace élevés et une faible utilisation de cet espace. Cela est dû au fait que les emplacements sont réservés, même pour les produits qui sont en rupture de stock.
- Une augmentation dans l'espace de stockage parce qu'il faut donner suffisamment d'espace pour les stocks maximum de chaque produit. La somme des stocks maximums de chaque produit étant supérieure au stock maximum de tous les produits. Puisque les stocks maxima pour chaque produit sont de l'ordre du double des stocks moyens, le taux de remplissage du système de stockage sera relativement bas. (**Sari. 2003**).

Parmi les avantages de cette politique de stockage il y a :

- Une très bonne localisation des produits qui facilite l'opération de déstockage.
- Une gestion du stock très simple.
- Le contrôle du système très simple car chaque produit a une aire de stockage prédéterminée.

### **3.6.2. Stockage Aléatoire**

Cette méthode de stockage assigne d'une manière aléatoire les articles à des emplacements ou casiers de stockage disponibles. C.-à-d. que tous les emplacements vides ont une probabilité égale pour stocker ou déstocker un

produit.

Cette méthode est très étudiée dans la littérature, elle est utilisée comme point de référence pour l'amélioration des performances des AS/RS en utilisant d'autres méthodes d'assignation de stockage.

### **3.6.3. Stockage aléatoire ouvert**

Avec cette méthodologie, le premier emplacement vide que l'on rencontre sera utilisé pour stocker les produits. Cela conduit généralement à un AS/RS où les racks sont pleins autour de la station d'E/S et progressivement plus vides vers l'arrière. Dans certaines études, il est montré que le stockage aléatoire et le stockage aléatoire ouvert sont en convergence dans un long terme (**Schwarz et al. 1978**).

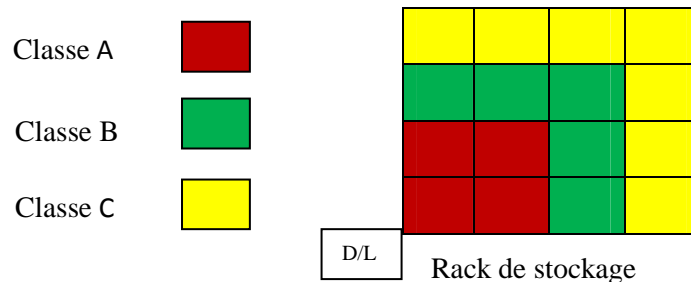
### **3.6.4. Full turnover**

Avec la politique de stockage full turnover, les produits sont stockés dans des emplacements de stockage en fonction de leur demande ou de la fréquence de rotation. Les produits fréquemment demandés sont stockés dans des endroits accessibles, généralement près de la station D/L. Les Produits à faible rotation sont stockés plus loin de la station D/L. Une hypothèse importante de cette règle est que les fréquences de rotation doivent être connues à l'avance. Le stockage aléatoire et le Full turnover sont en fait des cas extrêmes de la politique de stockage par classe.

Le stockage aléatoire ne considère qu'une seule classe et le full turnover considère une classe pour chaque produit. Le stockage par classe et le full turnover tentent à réduire les temps moyens de déplacement de la machine S/R pour une opération de stockage et de déstockage en stockant les produits avec une forte demande aux endroits qui sont plus proches de la station D/L.

### **3.6.5. Le stockage par classe**

Le principe de cette méthode est de diviser l'espace de stockage en groupes. Il divise les produits et les casiers de stockage en un nombre identique de classes. Les classes des produits sont basées sur la fréquence de rotation. La *figure 1.12* montre un exemple de répartition des produits dans trois classes.



*Figure 1.12 Stockage par classe.*

Les classes des produits sont triées par la diminution de la fréquence de rotation et les classes des casiers de stockage par l'augmentation de la distance/temps de déplacement du point d'E/S. Ensuite, les classes des produits sont affectées aux classes des casiers de stockage. Dans cette séquence, dans une classe de stockage, les produits sont stockés d'une manière aléatoire.

Un concepteur est confronté à trois grandes décisions lors de l'application de la stratégie de stockage par classes dans un AS/RS :

- Le nombre de classes
- le nombre de produits à affecter à chaque zone classe.
- l'emplacement de chaque classe.

### **3.7. Critères de performances des AS/RS**

L'amélioration des performances des différents types d'AS/RS a toujours été un sujet du développement continu pour de nombreux chercheurs, Nous citons **Bozer et White.1994** et **Bozer. 1996, Lee. 1997,...**

La performance des AS/RSs varie selon les mesures et les politiques de fonctionnement utilisé (**El Sayed et Lee. 1996**), Les Mesures de performance peuvent inclure:

- Le temps de déplacement pour servir une requête de stockage ou de déstockage
- Le temps total nécessaire pour stocker ou déstocker un lot de requête;
- Le temps d'attente moyen pour une opération de stockage ou de déstockage;

De nombreux paramètres affectent la performance des ASRS. Bien que certains des paramètres soient interdépendants, ils sont divisés en trois groupes qui sont :

- Les exigences de la demande,



- La conception physique,
- Les méthodologies de fonctionnement,

### **3.7.1. Les exigences de la demande**

Les exigences de la demande représentent les commandes qui doivent être stockées ou déstockées afin de respecter le calendrier de production (distribution). La demande peut être définie par plusieurs paramètres:

- Nombre de commandes reçues par unité de temps.
- Nombre de produit à stocker/déstocker par commande (taille des lots).
- Les poids et les dimensions des produits à stocker/déstocker.
- La date d'échéance des commandes (La date due).

### **3.7.2. Conception physique d'un AS/RS**

Lors de la conception d'un système automatisé de stockage/déstockage, il faut s'assurer que ce dernier soit capable de satisfaire les demandes actuelles et futures et d'éviter les goulots d'étranglement<sup>4</sup> au niveau de la production. Dans les environnements de fabrication, l'AS/RS a pour but de fournir tout matériel requis au bon moment pour assurer l'achèvement de la production.

Material Handling Institute (MHI 1977) ainsi que **Bozer et White. 1980** ont rassemblé les paramètres qui doivent être pris en considération pour une bonne conception d'un AS/RS dans une liste. Parmi les plus importants paramètres, nous citons :

- Les dimensions de la charge : largeur, hauteur, profondeur, poids,
- Les dimensions du casier : largeur, hauteur, profondeur,
- Le nombre total de casiers,
- La structure de des racks : charge utile, charge admissible,...
- Le rendement : le nombre d'opération de stockage/déstockage par unité de temps
- Le nombre de machine S/R, d'allées, d'étagères,...
- La durée de cycle : simple cycle simple, double cycle, ...
- Le taux d'utilisation des machines.

---

<sup>4</sup> Les goulots d'étranglement : Le goulot d'étranglement, qu'on appelle aussi « ressource goulot », est défini par l'étape de production qui a la plus faible cadence dans un flux de production.

- La position de la station D/L.

### **3.7.3. Méthodologies de fonctionnement**

Le troisième groupe des paramètres qui affecte la performance des AS/RSs est la politique de fonctionnement du système qui implique :

- La règle d'ordonnement pour le séquençement (Exemple : SPT)
- Le type d'opération (simple ou double cycle)
- L'approche de planification
- La méthodologie de stockage (stockage aléatoire, stockage dédié, stockage par classe)
- Le nombre de classes de stockage
- Le positionnement des classes de stockage

## **4. Etat de l'art**

L'amélioration des performances des différents types d'AS/RS a toujours été un sujet de développement continu. Il est nécessaire de connaître le fonctionnement du système sur une période appropriée afin de juger son comportement. Ces informations sur le fonctionnement du système considéré sont utiles. Elles lui permettent d'établir les meilleures politiques pour atteindre les objectifs attendus. Mais, il est parfois difficile et long d'obtenir ces informations directement du système réel.

Dans cette partie du chapitre, nous essayons d'élaborer une synthèse des différents travaux concernant les critères de performance des AS/RS. Nous tenons au compte de la simulation, la conception, la modélisation mathématique du temps de cycle de la machine de stockage/déstockage, l'optimisation des dimensions des AS/RS, le positionnement du point de repos de la machine S/R, les différentes méthodologies de stockage appliquées dans ces systèmes,...

### **4.1. Modèles de simulation**

Différents modèles de simulation de l'AS/RS sont disponibles dans la littérature. Ces études évaluent le choix de conception alternative pour une configuration donnée du système.

#### **4.1.1. Problème de la conception**

Le problème de conception des AS/RSs est un problème combiné qui est causé non seulement par la disposition interne ou les politiques de stockage, mais aussi par de nombreux autres facteurs. **Rosenblatt et Roll. 1984** ont appliqué des techniques d'optimisation pour

déterminer le coût total de conception d'un AS/RS avec deux variables de décision: la capacité d'AS/RS et la politique de stockage. Ils ont étendu ce travail dans **Rosenblatt et Roll. 1988** en développant un modèle de simulation pour mesurer la relation entre la taille de l'AS/RS et divers paramètres pertinents. La demande stochastique et le réapprovisionnement nous oblige à déterminer la capacité de stockage en spécifiant un niveau de service souhaité. Le niveau de service souhaité indique la proportion du temps que l'entrepôt est capable de répondre à la demande à partir du stock. Un autre terme dans **Rosenblatt et Roll. 1988** est l'exigence de la capacité nominale *nominal capacity requirement* (NCR) qui se réfère à la taille moyenne d'un AS/RS calculé sur la base de la quantité moyenne de chaque produit. **Rosenblatt et Roll. 1988** ont remarqué qu'un entrepôt avec une capacité NCR fournira seulement un niveau de service de 50%.

Il existe différents paramètres qui ont un effet sur la taille de l'AS/RS pour un niveau de service donné. Ils ont été étudiés en utilisant un modèle de simulation.

Le système automatisé de stockage/déstockage multi-allée a été étudié par **Hwang et Ko. 1988** afin de réduire l'investissement initial de l'installation d'un AS/RS. Le système multi-allées peut réduire le coût d'installation de façon considérable à la moitié du coût d'un AS/RS à charge unitaire tant que les déplacements de la machine S/R sont relativement faibles.

**Hwang et al. 2002** ont considéré la conception des AS/RS à mini charge en combinaison avec les véhicules autoguidés. Les auteurs ont proposé un modèle non-linéaire et une heuristique pour déterminer le nombre de charges optimal pouvant être transférées par chaque AGV vers les machines S/R en tenant compte de la conception optimale de l'AS/RS.

**Inman. 2003** étudie l'utilisation des AS/RS dans le secteur automobile. La fonction de l'AS/RS est de rétablir l'ordre dans lequel les travaux sont traités dans les différents processus du système de production. Un modèle est proposé pour déterminer la capacité de l'AS/RS basé sur le nombre de tâche qui doivent être réordonnées. En conséquence, la conception de l'AS/RS est totalement subordonnée aux procédés d'assemblage du système de production.

**Bafna et Reed. 1972** ont proposé un programme de simulation pour évaluer la conception alternative des systèmes automatisés de stockage de grande hauteur. **Koeing. 1980** a recherché les configurations optimales d'AS/RS sachant que certaines grandeurs de conception sont connues. **West. 1993** a développé un modèle de simulation pour aider à la sélection de systèmes de manutention lors de la conception de l'AS/RS. **Perry et al. 1984** ont développé une procédure de recherche optimale qu'ils ont appliqué de manière interactive à des modèles de simulation de systèmes automatisés de stockage.

#### 4.1.2. Problème de blocage

Un grand nombre d'études a examiné des problèmes opérationnels classiques tels que les points de repos de la machine S/R, le temps moyen de simple cycle et l'optimisation des opérations de stockage ou de déstockage **Berg et Gademann. 2000**. Cependant, il y a relativement peu de documents, dans la littérature, traitant le problème de blocage par exemple : Comment éviter les blocages de véhicules dans les AS/RS. Le blocage dans les systèmes de production est très défavorable parce que l'accès d'une pièce aux ressources est retardé par d'autres parties. Une méthode de la résolution de blocage consiste à abandonner une ou plusieurs parties impliquées dans le blocage et libérer les ressources à d'autres parties **Fanti et al. 1997**.

**Lee et al. 1996** ont discuté d'un problème de blocage dans un AS/RS à charge unitaire desservi par véhicules ferroviaires guidés. Ils ont résolu le problème du blocage en augmentant la capacité du convoyeur dans le modèle de simulation, qui est une méthode de détection/récupération de blocage (*deadlock detection/recovery* (DDR)). Cependant, la solution des problèmes de blocage n'a pas été formellement décrite. Afin de caractériser correctement le blocage dans les AS/RS, un modèle doit être correctement mis en place.

A l'aide de réseaux de Pétri colorés et temporisés (RdPCT) (*colored timed Petri nets* (CTPN)), **Dotoli et Fanti. 2005** ont proposé un cadre de modélisation modulaire et unifiée pour les systèmes automatisés de stockage/Déstockage hétérogènes, comprenant des véhicules ferroviaires guidés et des machines S/R dans chaque allée. Le RdPCT peut décrire le comportement dynamique du système qui est modulaire et orienté ressources. Bien que le RdPCT soit orienté ressources et apte à être utilisé au niveau opérationnel, il est trop compliqué pour caractériser le blocage et définir des méthodes efficaces de résolution pour les AS/RSs.

**Dotoli et Fanti. 2007** ont présenté leur travail étendu de détection et d'évitement de blocage dans l'AS/RS. L'AS/RS est modélisé comme un système à événement discret, dynamique, temporisé (SEDT), dans lequel l'information de chemins et les emplacements des véhicules sont stockés dans un état. L'état peut être changé chaque fois qu'un événement se produit. Cette caractérisation peut être utilisée dans l'analyse des blocages dans les AS/RSs.

**Dotoli et al. 2004** comparent deux stratégies pour résoudre le problème de blocage en temps réel pour différents AS/RSs: une stratégie d'évitement de blocage et une stratégie de détection/récupération de blocage (DDR). La stratégie d'évitement de blocage a été proposée par **Fanti. 2002** pour garantir une performance de système efficace à l'aide du système à événement discret et dynamique (SEDD). La stratégie DDR a été proposée par **Lee et al. 1996**

pour résoudre le problème de blocage en utilisant des stocks tampon pour stocker les produits bloqués.

#### 4.1.3. Problème de temps de cycle :

Le temps de déplacement de la machine S/R pour une opération de stockage ou de déstockage comprend, à la fois, le temps de déplacement de la machine S/R vers le casier de stockage ou déstockage plus le temps de dépôt ou récupération du produit. Le temps de dépôt/récupération d'un produit est supposé être déterministe en raison de la nature de la machine S/R. Le temps de déplacement est variable et il est donc utilisé pour mesurer les performances d'un AS/RS.

Dans un AS/RS à une seule navette (single shuttle AS/RS), la machine S/R peut effectuer jusqu'à un stockage et un déstockage en double commande (DC). Mais, en multi-navettes AS/RS avec deux charges unitaires, la machine S/R peut effectuer jusqu'à deux opérations dans un cycle comme un cycle quadruple (QC). **Potrac et al. 2004** a présenté un modèle de simulation multi-navette AS/RS en utilisant une nouvelle heuristique au lieu de la stratégie du premier arrivé, premier servi (*First come first served*) FCFS utilisé dans un AS/RS à une seule navette.

Ce modèle de simulation indique qu'un AS/RS multi-navettes porte des améliorations importantes en temps de cycle en comparaison avec une seule navette.

**Hu et al. 2005** a présenté un modèle de temps de cycle continu pour un nouveau type d'AS/RS, AS/RS à plateforme partagée (*split-platform AS/RS*) (SP-AS/RS). En introduisant un nouveau mécanisme à la machine S/R pour la manutention efficace de charges lourdes supplémentaires, le SP-AS/RS montre l'amélioration des temps de déplacement de la machine S/R.

#### 4.2. Modèles analytiques

Différents modèles analytiques pour estimer le coût d'un AS/RS ont été proposés.

Une fois un AS/RS installé, la performance de l'ensemble du système dépend des méthodes de contrôle appliquées. Les méthodes de contrôle comprennent les méthodes de stockage, l'ordre de séquence et la station de repos de la machines S/R. La recherche dans le domaine de la station de repos de la machine S/R et le temps de déplacement de la machine S/R sont examinés dans cette section.

#### 4.2.1. Le point de repos de la machine S/R

Le point de repos dans un AS/RS est l'emplacement où la machine S/R réside, ou repose, lorsque le système est inactif (**Van den Berg, 1999**). **Hu et al. 2005** ont défini la politique du point de repos comme la politique qui décide où le transstockeur restera quand il devient inactif.

Les règles de positionnement du point de repos ont été formulées pour différents types d'AS/RS. Des règles de bases ont été proposées par **Bozer et White, 1984** qui ont développé quatre règles statiques de positionnement du point de repos de la machine S/R pour un AS/RS à charge unitaire qui sont :

- Station d'entrée : la station de repos se trouve toujours à la station d'entrée,
- Milieu : la station de repos se trouve toujours à l'emplacement milieu du rack,
- Station Entrée/Sortie : -Si on a des requêtes de stockage, le point de repos se trouve à la station d'entrée

-Si on a des demandes de déstockage ou des doubles demandes sont prévues alors le point de repos est positionné à la station de sortie.

- Dernier emplacement : Rester à l'emplacement de stockage à l'issue d'un simple cycle de stockage, rester au niveau de la station D/L après l'achèvement d'un déstockage soit dans un simple ou double cycle.

**Egbelu, 1991** a utilisé la programmation linéaire pour étudier le problème de positionnement du point de repos de la machine S/R pour minimiser le temps de cycle. **Egbelu et Wu, 1993** ont ensuite utilisé la simulation pour comparer les règles de positionnement du point de repos. Ils ont considéré six règles de positionnement du point de repos de la machine S/R. Les quatre premières règles ont été proposées par **Bozer et White, 1984** et les deux dernières par **Egbelu et al. 1991** qui sont :

- La machine S/R est positionnée de telle sorte qu'elle minimise le temps de déplacement entre la station de repos et le point de stockage/déstockage
- La machine S/R est positionnée de telle sorte qu'elle minimise le maximum de temps de déplacement entre la station de repos et le point de stockage/déstockage.

**Hwang et Lim. 1993** ont utilisé les règles développées par **Egbelu.1991** et les ont modélisées en un problème de positionnement unique en utilisant les distances de Tchebyshev pour la première règle et le min-max de Tchebyshev pour la seconde. **Peters et al. 1996** ont développé une expression analytique de la position du point de repos sous une variété de configurations d'AS/RS concluant que le meilleur point de repos de la machine de stockage/déstockage se trouve au milieu du rack pour le déstockage et au point de dépôt pour le stockage. **Chang et Egbelu. 1997** ont développé deux algorithmes pour la détermination du point de repos optimal d'une machine S/R desservant un AS/RS multi allées. Le premier algorithme prend en compte le point de repos optimal pour minimiser le temps de cycle de la prochaine opération de stockage ou de déstockage (**Chang, 1997a**). Dans le deuxième algorithme (**Chang, 1997 b**), la recherche du point de repos optimal vise à minimiser le temps de cycle moyen sur l'ensemble des opérations de stockage et de déstockage.

**Park et al. 2001** a proposé une stratégie de détermination du point de repos optimal pour des racks à distribution non uniforme. Il a présenté des relations analytiques basées sur la probabilité que la prochaine opération soit un stockage ou un déstockage. Différents chemins pour revenir au point de repos après une opération ont été étudiés pour un fonctionnement efficace de la machine S/R.

Sur la base de l'examen de cette littérature, bien que de nombreuses stratégies du point de repos aient été proposées, il ne semble pas qu'il existe une étude de calcul qui illustre les avantages de l'utilisation du point de repos optimal sur les règles plus simples suggérées par **Bozer et White. 1984**. En outre, pour les AS/RS avec une utilisation élevée, il n'est pas possible de profiter des stratégies du point de repos puisque la machine S/R ne sera pas libre très souvent. (**Meller et Mungwattana. 2005**).

#### 4.2.2. Position de la station dépôt /livraison (D/L)

La position de la station D/L est également un facteur qui affecte la performance des AS/RS. **Bozer et al. (1984)** ont étudié le temps de cycle moyen avec quatre différentes positions de la station D/L qui sont:

- La station dépôt se trouve à l'extrémité de l'allée et la station de livraison à l'extrémité opposée de la même allée ;
- La station dépôt et la station de livraison se trouvent dans la même extrémité;
- La station dépôt et la station de livraison se trouvent au centre de l'allée ;
- La station D/L se trouve à la fin de l'allée.

**Randhawa et al. 1991** ont analysé et comparé l'effet du nombre de stations D/L sur le temps d'attente moyen et le temps d'attente maximum, pour trois AS/RSs à charge unitaire différente opérant sous un double cycle.

**Randhawa et Shroff. 1995** ont étendu l'étude de **Randhawa et al. 1991** au moyen d'une étude de simulation très étendue. Ils ont évalué et analysé six configurations différentes avec une seule station D/L en utilisant trois politiques différentes. **Vasili et al. 2008** ont proposé une nouvelle configuration de station D/L dans un système (SP-AS/RS) afin de réduire le temps de traitement moyen dans ce système. Dans leur configuration proposée, la station D/L est située au centre du rack. Ils ont développé un modèle continu de temps de cycle pour cette nouvelle configuration. Les résultats et les comparaisons montrent que cette nouvelle configuration est préférable à celles introduites par **Chen et al. 2003** et **Hu et al. 2005**.

#### 4.2.3. Temps de cycle :

Plusieurs mesures de performance peuvent être appliquées pour évaluer un AS/RS. Les plus importantes sont : le taux d'utilisation de la machine S/R et le temps moyen nécessaire pour servir une requête de stockage ou de déstockage sont définis comme étant le temps qui s'écoule depuis l'apparition de la requête, jusqu'à la fin de son exécution. Le temps de cycle figure parmi les paramètres les plus importants d'un AS/RS étant donné qu'il influence directement sur les performances du système global. La modélisation du temps de cycle a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche et ceci depuis l'année 1976. **Hausman et al. 1976** ont modélisé le temps de simple cycle pour un AS/RS à charge unitaire carré en temps par des expressions analytiques continues pour différentes stratégies de stockage. Ces travaux ont été étendus par **Graves et al. 1977** en introduisant un modèle pour le temps de double cycle pour le même type de système et avec les mêmes hypothèses. **Bozer et White. 1984** ont étudié, eux aussi, l'AS/RS à charge unitaire mais qui n'est pas forcément carré en temps. Ils ont utilisé une approximation continue du rack de stockage pour développer une expression mathématique calculant le temps de simple et de double cycle sous un stockage aléatoire et pour plusieurs positions d'entrée/ sortie. **Hwang et lee 1990** ont reproché aux travaux cités précédemment le fait qu'ils considèrent une vitesse uniforme pour la machine S/R et ont affirmé que toute conception se basant sur ces modèles est loin d'être optimale. Ils ont donc proposé un modèle tenant compte des caractéristiques opérationnelles de la machine S/R, à savoir l'accélération, la décélération et la vitesse maximale. **Chang et al. 1995** ont proposé un modèle du temps de cycle avec plusieurs vitesses et en tenant compte de l'accélération décélération de la machine S/R. **Wen et al. 2001** ont étendu les travaux de **Chang et al. 1995**



en considérant les stratégies de stockage par classes et full-turnover. **Ashayeri et al. 2002** ont proposé une approche géométrique pour modéliser le temps de cycle dans un AS/RS utilisant le stockage par classe. **Potrč et al. 2004** ont proposé un modèle heuristique du temps de cycle sous un stockage aléatoire pour les AS/RS à charge unitaire classiques et multi allées. Les AS/RS multi-allées diffèrent des AS/RS à charge unitaire uniquement dans le fait qu'ils utilisent une seule machine S/R pour servir toutes les allées. **Hwang et Ko. 1988, Lerher et al. 2005 et Ghomri et al. 2008**, se sont intéressés à la modélisation du temps de cycle des AS/RS multi allées : en s'inspirant du modèle de **Bozer et White. 1984, Hwang et 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. Le modèle de **Lerher et al. 2005** prend en considération l'accélération et la décélération de la machine S/R. **Ghomri et al. 2008** ont approché l'AS/RS multi allées par un parallélépipède –rectangle et ont modélisé son temps de cycle par une expression purement continue. Ils ont utilisé une approche statistique basée principalement sur l'approximation des distances des casiers du rack en fonction continue. Leur étude est construite sur l'hypothèse que la face du rack est considérée comme étant une surface continue où les produits peuvent être stockés ou déstockés en n'importe quel point. **Sari. 2008** a établi les expressions analytiques discrètes pour les AS/RS multi allées et pour les AS/RS à racks glissants. Dans deux travaux différents, **Guezzen et al. 2011a, 2011b**, ont développé deux modèles analytiques continus permettant l'estimation du temps moyen de simple cycle pour les AS/RS à racks glissants. Dans le premier modèle, les auteurs considèrent le cas où le temps de glissement des racks est inférieur au temps de déplacement sur les allées ainsi, dans le deuxième modèle, ils ont considéré le cas où le temps de glissement des racks est supérieur au temps de déplacement sur les allées. Les auteurs ont ensuite établi une simulation pour comparer les résultats des modèles continus aux résultats des modèles discrets développés par **sari. 2008**. Ils ont conclu que, pour un système à 200, casiers l'erreur était autour de 3%, et plus la taille du système augmentait plus l'écart entre le discret et le continu diminuait. **Sari et al. 2003 et Sari. 2005** ont établi l'expression du temps de cycle moyen d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel pour quatre différentes positions du convoyeur de restockage et des stations de dépôt/livraison. Une étude comparative entre l'AS/RS à convoyeur gravitationnel et à charge unitaire **Sari, 2003 et Sari et al. 2008** a été établie. Les auteurs dans **Gaouar. 2004**, ont développé une heuristique de stockage/déstockage pour l'AS/RS à convoyeur gravitationnel en vue de réduire son temps

de cycle. Cette heuristique permet de stocker les produits de mêmes références dans un même casier au plus près de la station de livraison. L'utilisation de l'heuristique réduit le temps moyen de déstockage. Après cela, **Bensenouci et al. 2010** ont étendu ce travail et ont développé deux métaheuristicques, appelées la recherche taboue et le recuit simulé. Ces métaheuristicques sont mis au point pour contrôler la machine de déstockage de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel afin de minimiser le temps de cycle de déstockage. Les résultats de ces métaheuristicques sont comparés à des heuristiques classiques et des modèles analytiques trouvés dans **Gaouar et al. 2006**.

Dans le même type d'AS/RS, **Hachemi et al. 2008** ont proposé une structure de pilotage basé sur un modèle réseau de Pétri Coloré (RdPC). Le modèle RdPC de l'AS/RS développé est utilisé comme observateur d'état pour fournir l'état du rack dans un système de contrôle en boucle fermée. Ils ont introduit dans le système de contrôle un bloc d'optimisation comme processus de décision qui effectue, périodiquement, une optimisation en temps réel. L'objectif de la méthode d'optimisation proposée est de trouver les meilleurs emplacements à déstocker dans le rack pour un lot de demande de clients et ceci en minimisant le nombre de cycles de déstockage et par conséquent d'améliorer le débit de sortie du système.

**Han et al. 1987** ont développé une expression mathématique pour estimer le temps du double cycle, sous la règle "plus proche voisin" (nearest-neighbour). Sous cette règle, les requêtes de stockage et les requêtes de déstockage les plus proches sont appariées. Ce qui permet de minimiser le temps de double cycle. **Dallari et al. 2000** ont évalué les performances de différentes méthodologies de stockage et procédures de construction dans un AS/RS à personne à bord. Ils ont déterminé les temps de cycle pour chaque méthodologie en fonction de la forme des aires de stockage, du nombre d'opérateurs et de l'algorithme d'ordonnancement utilisé. **Ashayeri et al. 2002** ont proposé une approche géométrique pour modéliser le temps de cycle dans un AS/RS utilisant le stockage par classe. Dans **Sari et al. 2010**, les auteurs ont développé une expression analytique pour le temps de cycle d'un nouveau type d'AS/RS composé d'une seule machine de stockage/déstockage (S/R) et de convoyeurs gravitationnels. Cet AS/RS est à profondeur multiple. **Le-Duc et De Koster. 2004**, **Le-Duc et De Koster. 2005**, **De Koster et Le-Duc. 2007**, ainsi que **Roodbergen. 2001** ont estimé le temps de cycle d'un déstockage par lots, c'est-à-dire regroupant plusieurs demandes de déstockage en une livraison afin de réduire le temps de réponse moyen.

L'optimisation des expressions analytiques du temps de cycle a été traitée dans les travaux de **Azzouz et al. 2001a** qui ont appliqué la méthode Branch and Bound à l'optimisation des

dimensions d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel. Dans **Azzouz 2001b**, l'auteur a fait une optimisation des dimensions d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel pour un temps de cycle minimum. Dans un autre travail de **Azzouz et al. 2001c** une synthèse sur l'optimisation des dimensions d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel a été faite. **Azzouz et al. 2001a, 2001b** ont défini l'optimalité des dimensions du rack de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel en vue de minimiser le temps moyen de déstockage.

**Le-Duc et al. 2006**, ont considéré un système automatisé de stockage/déstockage tridimensionnel compact nouvellement conçu. Le système se compose d'un pont automatisé prenant en considération les mouvements dans le sens horizontal et dans le sens vertical. Un mécanisme de transport prend soin du mouvement en profondeur. Les auteurs ont optimisé les dimensions de l'AS/RS en minimisant le temps de cycle. Ils ont estimé le temps de déplacement de la machine S/R en simple cycle. A partir du temps estimé, ils calculent le rapport optimal entre les trois dimensions qui minimisent le temps de parcours. La méthodologie de stockage utilisée est aléatoire. Ensuite, ils déduisent une expression mathématique pour temps de double cycle.

Les expressions analytiques du temps moyen de simple cycle et du temps moyen de double cycle de l'AS/RS multi-allées développées par **Ghomri et al. 2008** ont été utilisées par **Kouloughli et al. 2009, 2010** pour trouver les dimensions optimales du système pour un temps de simple cycle minimal et pour un temps de double cycle minimal. Dans **kouloughli et al. 2015**, les auteurs ont considéré une contrainte supplémentaire au problème d'optimisation initial du système multi allées. Ils ont supposé que l'une des trois dimensions du système était fixe et ils ont déterminé les deux dimensions optimales restantes. Dans **Kouloughli 2013**, les auteurs proposent d'optimiser les modèles analytiques continus représentant les temps de stockage et de déstockage d'un système automatisé de stockage/déstockage à racks glissants. Ils cherchent à déterminer les dimensions temporelles optimales de ce système qui sont : le temps de déplacements dans le sens horizontal, le temps de déplacement dans le sens vertical et le temps de déplacement de la première à la dernière allée sachant que le temps de glissement des racks est donné. 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.

#### 4.2.4. Politiques ou méthodologies de stockage

Un autre sujet, qui a reçu une attention considérable dans la littérature, est la politique du stockage dans les AS/RS. Cette politique du stockage sert à déterminer les endroits de stockage des produits. (Roodbergen et Vis. 2009).

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

La stratégie du stockage est basée sur les besoins des opérations de fabrication qui peuvent augmenter non seulement la performance des AS/RS mais aussi la performance du système de production Hsieh et Tsai. 2001. Plusieurs stratégies de stockage peuvent être trouvées dans la littérature pour l'AS/RS. Les cinq politiques souvent utilisées sont: le stockage dédié, le stockage aléatoire, le stockage aléatoire ouvert (closest open location storage), le stockage full-turnover et le stockage par classes. (Hausman et al. (1976); Graves et al. 1977; Schwarz et al. 1978; Goetschalckx Ratliff. 1990; Van den Berg. 1999; Roodbergen et Vis. 2009).

Hausman et al. 1976 sont parmi les premiers à avoir considéré le problème du stockage par classes dans un AS/RS à charge unitaire, en utilisant la courbe ABC. Graves et al.1976 ont démontré, en utilisant la simulation, que la forme en L des différentes régions, pour un stockage par classes, n'est pas nécessairement optimale pour un rack carré. Jarvis. 1991, Tang.1997, Chew et al. 1999 ont estimé le temps de cycle moyen dans un entrepôt utilisant un stockage par classes. Van den Berg. 1996 a proposé un algorithme qui assigne à chaque référence de produits sa classe. Caron et al.1998, Caron. 2000 ont proposé un modèle de temps de cycle pour un entrepôt à 2-blocks avec un stockage COI-par classes (cube-order-index, COI). Ashayeri et al. 2002 ont utilisé une approche géométrique pour calculer le temps de cycle pour un stockage par classe comme le montre la *Figure1.13* .Les résultats ont montré que le troisième type de stockage a le plus court temps de traitement tandis que la seconde disposition a la plus longue durée de traitement.

Park et al. 2003, Park et al. 2006 ont étudié et analysé les performances d'un AS/RS à mini-charge à 2-classes. Le-Duc et al. 2004, Le-Duc et al. 2005, Le-Duc et al. 2007 ainsi que Roodbergen. 2007 ont estimé le temps de cycle d'un déstockage par lots, c'est-à-dire regroupant plusieurs demandes de déstockage en une livraison afin de réduire le temps de réponse moyen.

L'ensemble de ces études montre l'importance des performances des méthodes de stockage dans les magasins, avec plus particulièrement un critère de performance relatif au temps moyen de simple cycle.

Plusieurs travaux ont également démontré que le stockage par classes permet une réduction considérable en temps de déstockage par rapport aux autres méthodes de stockage telles que le stockage dédié et le stockage aléatoire. Dans la plupart de ces recherches, l'AS/RS utilisé est à charge unitaire. Ainsi, **Guenov. 1992** compare trois configurations de la forme des zones dans un AS/RS. Il a conclu que la configuration des zones pour le stockage par classes dépend de la position du point d'entrée/sortie d'un AS/RS à charge unitaire. **Rosenblatt. 1989 et Eynan et al. 1994** ont essayé de déterminer le nombre de classes optimal pour un AS/RS en utilisant la méthode de **Hausman et al. 1976** et ils ont conclu qu'il est préférable d'utiliser des AS/RS avec un facteur de forme  $b \geq 0.6$  et moins de 7 classes. **Ashayeri et al. 2002** ont développé une approche heuristique pour déterminer l'emplacement des zones de stockage pour le stockage par classes dans un AS/RS. L'algorithme détermine la taille et le nombre de zones, ainsi que leur disposition relative dans l'AS /RS. **Ha et Hwang. 1994** ont montré que le stockage par classes à 2 classes réduit le temps de stockage et le temps de déstockage par rapport à un stockage aléatoire pour un simple et double cycle pour un système de stockage à carrousel.

**Eldemir, Graves et Malmberg. 2004** ont proposé un nouveau modèle analytique pour les AS/RS afin de déterminer le temps de cycle et l'espace requis pour un stockage par classes. Ils ont conclu qu'il nécessite moins d'espace de stockage par rapport à un stockage aléatoire ou un stockage dédié. **Muppani et al. 2008** ont développé un modèle non-linéaire de programmation en nombre entier et un algorithme de type Branch & Bound pour comparer le stockage par classes au stockage dédié, en considérant l'espace de stockage et son coût, le coût de manutention et de préparation de commande pour un stockage par classes. L'approche présentée a permis de démontrer qu'il existe des économies importantes en utilisant le stockage par classes, bien que le stockage dédié et le stockage aléatoire soient couramment utilisés dans la planification de stockage en entrepôt.

Une heuristique de stockage a été développée par **Gaouar et al. 2005, Gaouar et al. 2006** pour réduire le temps de déstockage dans un AS/RS à convoyeur gravitationnel. Cette heuristique a permis une amélioration de la durée de déstockage. Dans le même type de système, une nouvelle méthode de stockage/déstockage, appelée In- Deep Storage Class a été créée par **Cardin et al. 2012**. Pour cela, deux algorithmes ont été développés pour prouver la

faisabilité de la mise en œuvre de cette méthode. Cette étude a montré une réduction de plus de 60% du temps moyen de déstockage par rapport à un stockage aléatoire.

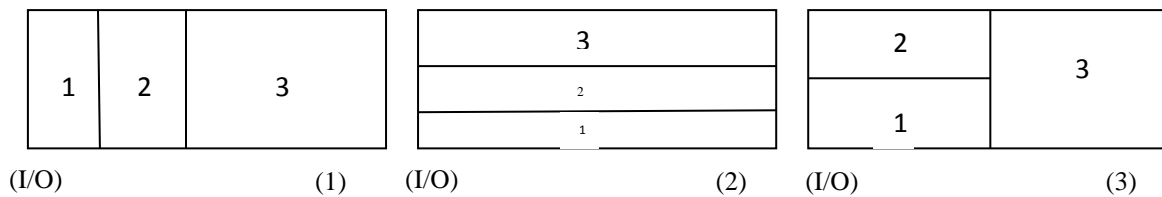


Figure 1.13 Stockage par 3 classes (Ashayeri et al.2002)

### 4.3. Comparaison entre les différents politiques de stockage

- Le stockage par classe et le stockage dédié tentent à réduire les temps moyen de stockage et de déstockage en stockant des produits avec une forte demande aux endroits qui sont facilement accessibles (**Van den Berg et al. 1999**).
- Le stockage dédié nécessite plus d'espace que le stockage aléatoire. S'il existe un autre produit différent à la gamme de produit déjà réalisé, l'emplacement vide continue à rester vide avec un stockage dédié, alors, que ce ne serait pas le cas avec le stockage aléatoire. Si plusieurs emplacements sont affectés pour une référence donnée de produit, le niveau des stocks diminue et le nombre de casier vides augmente (**Koster et al. 2007**).

### 5. Récapitulatif des travaux

Dans cette section, nous avons présenté un état de l'art détaillé des recherches sur les approches (approche analytique, simulation ou les deux en même temps) utilisées pour étudier les systèmes automatisés de stockage/déstockage. Un grand nombre de travaux de recherche utilisent des méthodes dérivées de la simulation. Pourtant, il n'est pas facile de déterminer les hypothèses utilisées dans ces études car, souvent, elles ne sont pas mentionnées. Le *tableau 1.3* ci-dessous résume ces différents travaux. En outre, étant donné qu'un bon nombre de règles de contrôle des AS/RS (politiques de stockage ont été mentionnées dans la section précédente), nous avons recueilli ces règles et nous avons essayé de les présenter dans le même tableau.

Auteurs	Problème étudié				Configurations				Machine S/R		Station de repos		Temps de cycle		séquen-cement		Politique de stockage															
	Séquen-cement	Temps de cycle	Position de la station de repos	Politique die stockage	Position d'I/O	Application spécifique	AS/RS à charge unitaire	AS/RS multi -allées	AS/RS à convoyeur gravitationnel	AS/RS à personne embarquée	AS/RS à étagère profonde	AS/RS à carrousel	AS/RS à rack glissant	AS/RS à minie charge	Déplacement chebyshev	Accélération constante	Temps de dépôts et récupération constant	Au milieu	input	output	Input/output	Simple cycle	Simple ou double cycle	Double cycle	FIFO pour le stockage	FIFO pour le déstockage	Stockage aléatoire	Stockage aléatoire ouvert	Stockage dédié	Full turnover	Stockage par classe	
Hausman et al. 1976				x		x								x	x	x				x	x					x			x	x		
Graves et al. 1977	x	x		x		x								x	x	x				x		x				x			x	x		
Bozer et White. 1984			x	x		x								x	x	x	x	x	x	x		x				x						
Schwarz et al. 1978	x	x		x		x								x	x	x				x		x				x			x	x		
Linn et Wysk .1984	x	x		x		x								x	x											x				x		
Linn et Wysk. 1987	x	x				x										x										x						
Van den Berg et Gareman. 2000	x			x		x								x	x	x			x			x				x	x	x	x	x		
Han et al. 1987	x					x								x	x	x							x			x						
Eden Chaime et Pliskin 1997		x				x								x	x	x						x				x						
Egbelu et Wu .1993			x			x								x	x	x	x	x	x				x			x						
Meller et Mungwat tana.2005			x			x								x	x	x	x	x	x			x				x	x	x				
Azadivar. 1984				x		x								x	x	x				x		x				x			x	x		
Kulturani et Malmborg. 2008				x		x								x	x	x				x		x				x			x	x		
Fuurani et Malmborg. 2008				x		x								x	x	x				x		x				x						
Gagliardi et al 2010				x		x								x	x					x		x				x			x	x		
Randhaa et al. 1991	x				x	x								x	x					x						x						
Kay lan et Medeiiros 1988				x		x								x	x	x																
Guenov et Raeside 1992	x			x		x								x	x					x										x		
Taboun et Bohle. 1993				x		x							x	x								x				x						
Rosenblatt et al 1993						x								x	x							x					x				x	
Linn et Xie 1993	x					x							x	x	x	x							x			x						
Ekren et Eragu						x																				x						

<b>2010</b>																					
<b>Gagliardi 2012</b>		x		x	x	x													x	x	x
<b>Xialong Guo 2014</b>	x		x			x			x	x	x			x	x						
<b>Sari 2008</b>	x	x			x		x														
<b>Kouloughli et al. 2015</b>	x					x															
<b>Guezzen 2014</b>	x					x															
<b>Gaouar et al. 2006</b>	x		x																		
<b>Cardin et al. 2012</b>	x		x																		
<b>De Koster et al. 2007</b>	x		x			x															
<b>Ashayeri et al 2002</b>	x		x			x															
<b>Park et al.2006</b>	x		x																		
<b>Azzouz et al 2001</b>	x																				
<b>Le-Duc et De Koster 2005</b>	x	x		x																	
<b>Dallari et al. 2000</b>	x																				
<b>Muppani et Adil, 2008</b>	x	x			x																
<b>Azzou et al 2001a, 2001b</b>	x																				
<b>Hwang et al. (2002)</b>	x																				
<b>Lee et al. 1999, 2005</b>	x																				
<b>Park 2001</b>	x	x				x															
<b>Potrč et al. 2004</b>	x		x			x	x														
<b>Yugang et de Koster 2009</b>	x		x																		
<b>Eldemi et al. 2004</b>			x		x																
<b>Ghomri et al. 2008</b>	x																				



## **6. Conclusion**

Cette première partie de thèse a été consacrée à une description générale des systèmes automatisés de stockage déstockage Nous avons traité les différents aspects de ces systèmes comme leur conception, leurs composants, leurs différents types, les méthodologies de stockage appliquées à ces systèmes. Un aperçu des principaux avantages qu'ils apportent aux systèmes de productions a été présenté.

L'état de l'art fait ressortir un grand nombre de travaux concernant les AS/RS. L'intérêt que portent les chercheurs aux systèmes de stockage a été illustré. Cet intérêt est justifié par le fait que les AS/RS ont une importance capitale dans les systèmes de production.

Le plus important de cet état de l'art est qu'aucun chercheur n'a entamé le problème de stockage par classe dans un AS/RS multi-allées. C'est pour cela que nous nous sommes intéressées à appliquer ce type de stockage à ce type d'AS/RS.

## Chapitre 2

# Stockage par classe dans un AS/RS multi-allées-Modélisation mathématique -

---

<b>1. Introduction</b> .....	<b>43</b>
<b>2. Stockage par classe dans un AS/RS multi-allées</b> .....	<b>43</b>
<b>3. Hypothèses et Notations</b> .....	<b>45</b>
3.1 Hypothèses .....	45
3.2 Notations .....	46
<b>4. Partie 1 : Modélisation discrète du temps de simple cycle :</b> .....	<b>47</b>
4.1 Politique de Stockage aléatoire .....	47
4.2 Politique de Stockage par classe.....	48
4.3 Exemple et discussion .....	53
<b>5. Partie 2 : Modélisation continue du temps moyen de simple cycle :</b> .....	<b>54</b>
5.1 Temps moyen de simple cycle dans la Classe A.....	54
5.2 Temps moyen de simple cycle dans la Classe B .....	66
5.3 Temps moyen de simple cycle dans la Classe C .....	66
<b>6. Comparaison avec l'expression discrète et validation</b> .....	<b>66</b>
<b>7. Conclusion</b> .....	<b>69</b>

## 1. Introduction

Les systèmes automatisés de stockage/déstockage sont des éléments clés dans les chaînes d'approvisionnement modernes et jouent un rôle vital dans le succès ou l'échec des entreprises d'aujourd'hui (**Frazelle. 2002**).

La gestion efficiente et efficace des stocks aide les entreprises à maintenir un avantage concurrentiel, surtout en période de mondialisation accélérée (**Silver E. 1998**). Le nombre de produits stockés détenus par les grandes entreprises peut facilement atteindre des dizaines de milliers. De toute évidence, il est nécessaire d'adopter une politique de gestion des stocks économique, robuste et efficace en termes de temps et d'investissement. Dans ce chapitre, nous limitons notre attention sur les politiques de stockage par classes. La méthode de stockage par classes organise les positions de stockage par les fréquences de demande des différents produits.

Généralement, le nombre de classes est limité à trois : " A " représente la classe des articles qui ont une rotation plus rapides, " B " comprend la classe de seconds articles les plus rapides, et " C " couvre le reste. Le temps de cycle moyen de la machine S/R est un paramètre important dans cette politique car il permet l'optimisation lors de la conception de nouveaux systèmes pour le dimensionnement des classes ainsi que le calcul du débit (throughput) du système.

Plusieurs modèles ont été développés pour étudier la stratégie de stockage par classe dans les AS/RS à charge unitaire, mais il n'existe pratiquement aucun modèle dans la littérature pour le stockage par classes dans les AS/RS Multi-allées.

Dans le présent chapitre nous développons initialement un modèle discret pour déterminer le temps moyen de simple cycle de la machine S/R pour chaque classe d'un système multi-allées. Par la suite, nous développerons un modèle continu approché. Les modèles développés comprennent de nombreux résultats théoriques et pratiques. Ils constituent un support mathématique approprié pour analyser, évaluer et optimiser la stratégie de stockage par classes.

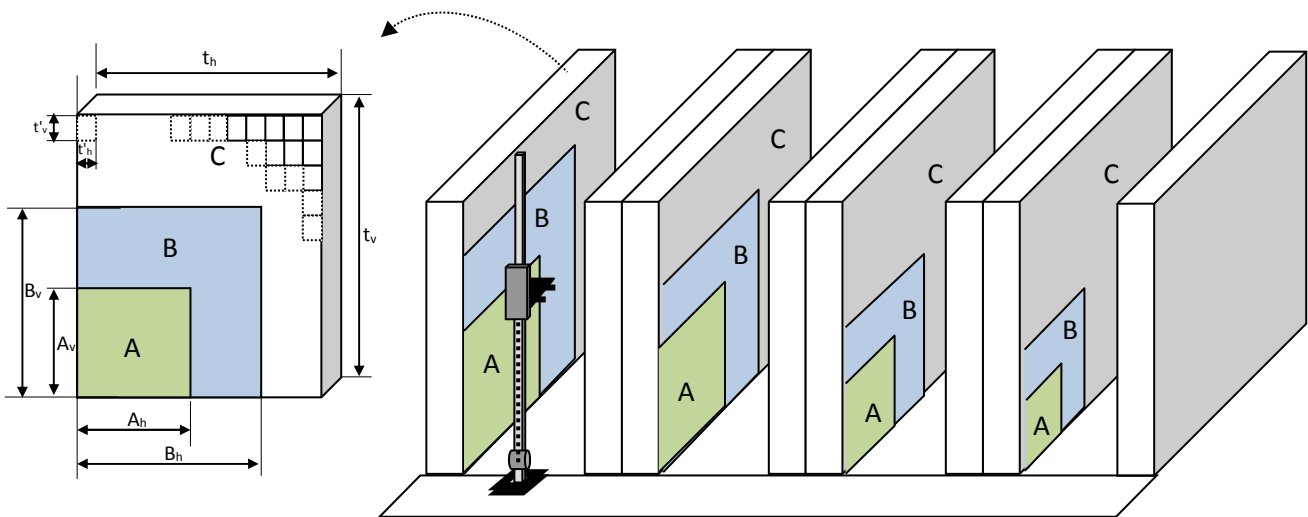
## 2. Stockage par classe dans un AS/RS multi-allées

Dans cette recherche, nous considérons un système de stockage/déstockage automatisé, où il existe plusieurs allées. Chaque allée contient un rack de stockage dans les deux côtés. Toutes ces allées de desserte sont reliées par une allée commune placée perpendiculairement aux racks. Le système comporte une station de dépôt/livraison (station D/L) qui se trouve

dans le coin inférieur gauche de l'AS/RS. Il y a aussi une seule machine de stockage/déstockage (S/R) dédiée à toutes les allées du système, qui peut se déplacer simultanément dans des directions verticales et horizontales. Ce mouvement est appelé déplacement de Tchebychev (*Figure 2.2*).

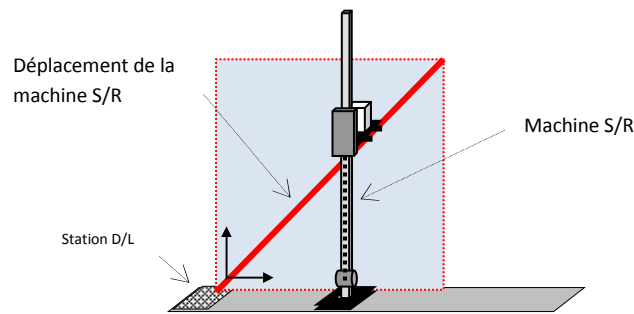
Par conséquent, le temps de voyage entre deux points est égal au maximum des déplacements horizontaux et verticaux. L'utilisation d'une seule machine S/R, réduit considérablement le coût du système par rapport à d'autres types d'AS/RS. Car le coût des machines S/R représente approximativement 40% de l'investissement initial d'un système de stockage.

La *figure 2.1* illustre un AS/RS multi-allées avec une stratégie de stockage par classes, ainsi que ses composants et les notations adoptées pour ses dimensions.



*Figure 2.1* Stockage par classe dans un AS/RS multi-allées

La machine S/R dessert l'ensemble des racks. Elle se déplace verticalement le long des colonnes formant les racks et horizontalement, le long des allées de desserte et le long de l'allée commune. (*Figure 2.2*)



**Figure 2.2** Déplacement de la machine S/R

La machine S/R peut fonctionner, soit en simple cycle, soit en double cycle. Dans le simple cycle, la machine S/R exécute, soit un stockage, soit un déstockage par cycle. Le temps nécessaire pour exécuter une seule commande est dit temps de simple cycle. Alors que dans le double cycle, la machine S/R exécute une opération de stockage, suivie par une opération de déstockage dans le même cycle. Le temps nécessaire pour exécuter un double cycle est dit ‘temps de double cycle’.

Nous considérons que le point de repos de la machine S/R est positionné à la station de dépôt/livraison (D/L) avant la réception d'une commande. Après l'accomplissement de chaque opération de stockage ou de déstockage, la machine S/R revient à la station (D/L) en attendant un nouvel ordre.

Une commande peut comprendre plus d'un article. De plus, chaque produit peut se trouver dans plusieurs lieux de stockage dans le magasin. Dans ce cas, la machine S/R doit se rendre dans de nombreux endroits de stockage pour déterminer chaque commande. Notre objectif est de calculer le temps moyen total parcouru par la machine S/R pour visiter tous les casiers possibles de chaque classe.

### 3. Hypothèses et notations

#### 3.1 Hypothèses

Les hypothèses suivantes ont été utilisées dans le présent document:

1. La machine S/R se trouve à la station de dépôt/livraison à l'état initial.
2. La station D/L se trouve dans le coin inférieur gauche de l'AS/RS.
3. La machine doit terminer son cycle avant d'effectuer une nouvelle requête.
4. Le système suit une stratégie de stockage par classe (ABC)

5. Les délais dus à l'accélération/décélération de la machine S/R ne sont pas pris en considération.
6. La machine S/R est capable de se déplacer simultanément dans le sens horizontal et vertical à vitesse constante. Donc, le déplacement nécessaire pour atteindre n'importe quel endroit dans le système est approximé par un déplacement de Tchebyshev.
7. La machine S/R ne peut faire qu'une seule opération à la fois et ne peut fonctionner que dans le mode simple cycle.
8. Les temps de dépôt/livraison associés à la manutention des produits par la machine S/R ne sont pas pris en considération dans le calcul du temps de cycle. Ces temps sont généralement indépendants de la forme du rack et de la vitesse de la machine S/R. Ils sont souvent déterministes et donc peuvent être ajoutés aux expressions des temps de cycles à posteriori.
9. Dans l'approche continue, les faces des racks sont considérées comme étant une surface continue où les produits peuvent être stockés/déstockés en n'importe quel point.

### 3.2 Notations

Pour le développement mathématique des deux modèles présentés par la suite, nous avons besoin des notations suivantes spécifiques à cette section:

**Table 2.1.**Notations utilisées dans le présent document:

---

$M$	Nombre de racks dans un AS/RS multi-allées
$M/2$	Nombre d'allées dans un AS/RS multi-allées
$A_k$	Nombre d'allées qui comprennent la classe A
$B_k$	Nombre d'allées qui comprennent la classe B
$N_H$	Nombre de casiers par ligne (casiers horizontaux)
$N_V$	Nombre de casiers par colonne (casiers verticaux)
$N$	Nombre de casiers total dans le système $N= M.N_L.N_V$
$N_A$	Nombre de casiers dans la classe A
$N_B$	Nombre de casiers dans la classe B
$N_C$	Nombre de casiers dans la classe C
$t'_h$	Temps de déplacement horizontal d'un casier au suivant
$t'_v$	Temps de déplacement vertical d'un casier au suivant
$t'_p$	Temps de déplacement d'une allée à la suivante ( $t'_p=3t'_h$ )

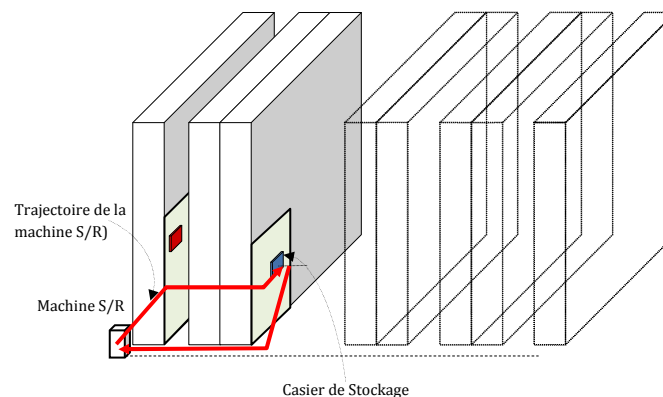
---

$t_h$	Temps nécessaire pour parcourir la longueur d'un rack ou d'une allée
$t_v$	Temps nécessaire pour parcourir la hauteur d'un rack
$t_p$	Temps nécessaire pour parcourir l'allée principale du système
$\overline{E(SC)}$	Temps moyen de simple cycle (stockage aléatoire)
$\overline{E(sca)}$	Temps moyen de simple cycle dans la classe A
$\overline{E(scb)}$	Temps moyen de simple cycle dans la classe B
$\overline{E(scc)}$	Temps moyen de simple cycle dans la classe C
$\overline{E(SCBS)}$	Temps moyen de simple cycle (stockage par classe)

---

#### 4. Partie 1 : Modélisation discrète du temps de simple cycle :

Dans un système automatisé de stockage/déstockage, la machine S/R peut opérer en deux modes : le simple ou le double cycle. Dans le simple cycle, la machine se déplace depuis le point de dépôt/livraison jusqu'au casier de stockage/déstockage, elle dépose ou récupère le produit et revient au point de dépôt/livraison. La *figure 2.3* illustre cette opération.



**Figure 2.3.** Fonctionnement du simple cycle d'un AS/RS multi-allées

Plusieurs modèles mathématiques modélisant le temps de cycle moyen de la machine S/R existent dans la littérature. Dans cette section, nous présentons d'abord le modèle discret développé par **Sari. 2003**, ensuite, nous présenterons une étude approfondie et détaillée des modèles continus que nous avons développés.

##### 4.1 Politique de stockage aléatoire

Dans un système automatisé de stockage/déstockage multi-allées avec une politique de stockage aléatoire, **Sari. 2003** a proposé une approche exacte permettant le calcul du temps

moyen de simple cycle. L'idée de cette approche consiste à calculer la moyenne des temps de déplacements vers tous les casiers du système.

Pour déplacer, horizontalement, vers un casier avec les coordonnées (i, j) dans la k<sup>ème</sup> allée, il nous faut un temps égal à :

$$t'_{h,i} + t'_{p,(k-1)} \quad (1)$$

Le déplacement vertical nécessaire pour atteindre le même emplacement (i, j) est donné par :

$$t'_{v,(j-1)} \quad (2)$$

Puisque le système étudié fonctionne avec un déplacement de Tchebychev, alors pour rejoindre un casier de coordonnées (i, j) dans la k<sup>ème</sup> allée, la machine S/R met un temps total t(i, j) égal au maximum entre le déplacement vertical et le déplacement horizontal.

$$t(i, j) = \text{Max}((t'_{h,i} + t'_{p,(k-1)}), t'_{v,(j-1)}) \quad (3)$$

Par conséquent le temps de cycle moyen réalisé par la machine S/R pour visiter tous les casiers du système peut être donné par l'expression discrète suivante :

$$\overline{E(SC)} = \frac{4}{N} \sum_{k=1}^{M/2} \sum_{i=1}^{N_H} \sum_{j=1}^{N_V} \max [ ( t'_{h,i} + t'_{p,(k-1)} ), t'_{p,(j-1)} ] \quad (4)$$

## 4.2 Politique de stockage par classe

Dans cette section, nous calculons le temps moyen de simple cycle pour chaque classe ; sachant que le temps moyen dépend du nombre de cassiers visités, il est nécessaire de calculer le nombre total de casiers dans chaque classe.

### 4.2.1 Temps moyen de simple cycle pour la classe A

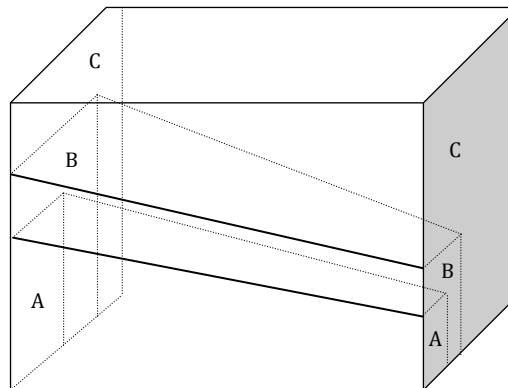
#### a. Nombre de casiers dans la classe A

Avant de calculer le nombre de casiers dans la classe A ( $N_A$ ), nous devons connaître d'abord le nombre d'allées pouvant atteindre cette classe. Nous pouvons distinguer deux cas :



**Cas n°1:  $t_p < t_{ha}$**

Dans le cas où le temps nécessaire pour parcourir l'allée principale du système ( $t_p$ ) est inférieur au temps nécessaire pour parcourir la longueur de la classe A ( $t_{ha}$ ), alors la classe A va apparaître dans M racks du système. Par ailleurs, le nombre d'allées qui contient la classe A est égal au nombre d'allées du système  $M/2$ . Comme le montre la figure suivante (figure 2.4)



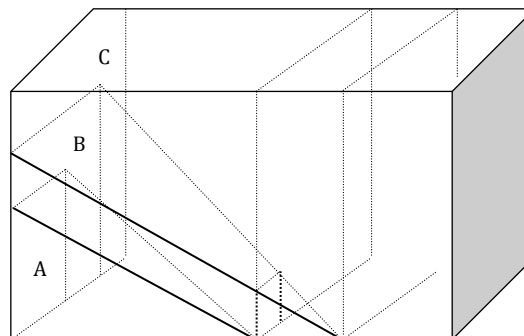
**Figure 2.4** Cas 1 : classe A dans tout le système

**Cas n°2:  $t_p > t_{ha}$**

Dans ce cas, la classe A est située dans un ensemble de racks inférieur à M. Ainsi; le nombre d'allées  $M_A$  qui comprend la catégorie A peut-être trouvé par la méthode proposée suivante:

Calcul de  $M_A$  :

- 
1. Calculer  $\frac{A_H \cdot t_h}{t_p}$
  2. Arrondir la valeur trouvée à l'entier inférieur.
  3. Augmenter ce chiffre d'une unité si  $A_H$  n'est pas un multiple de  $t_p$ .
- 



**Figure 2.5** Cas 2 : classe A dans quelques allées du système

Par conséquent, le nombre d'allées contenant la classe A noté ( $A_k$ ) est égal au minimum entre  $M/2$  et  $M_A$ .

$$A_k = \min\left(\frac{M}{2}, M_A\right)$$

Après calcul, le nombre de casier dans la classe A notée ( $N_A$ ) peut être calculé de la façon suivante :

$$N_A = 2 \sum_{k=1}^{A_k} A_V (A_H - 3(k-1)) \quad (5)$$

Pour calculer le temps de cycle moyen, il suffit, alors de calculer le temps total que met la machine S/R pour atteindre l'ensemble de casiers dans la classe A et de le diviser par le nombre de casiers  $N_A$ . La figure suivante montre la variation de la classe A dans les différentes allées qui comportent cette dernière (*Figure 2.6*).

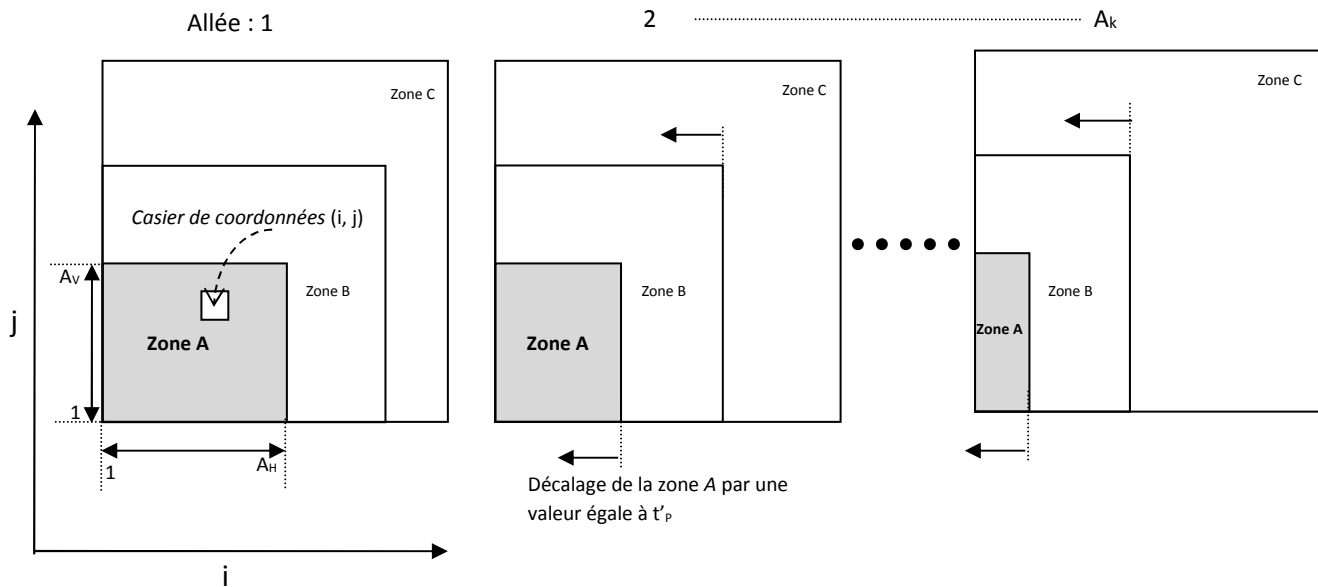


Figure 2.6 Zone A

Alors, le temps de cycle moyen que met la machine de stockage/déstockage pour visiter tous les casiers de la classe A peut être donné par l'expression discrète suivante :

$$\overline{E(sca)} = \frac{4}{N_A} \cdot \sum_{k=1}^{A_k} \sum_{i=1}^{A_H - 3(k-1)} \sum_{j=1}^{A_V} t(i, j) \quad (6)$$

#### 4.2.2 temps moyen de simple cycle pour la classe B

##### a. Nombre de casier dans la classe B

De la même manière, nous calculons  $B_k$  et  $N_B$  qui représentent respectivement le nombre d'allées où se trouve la classe B et le nombre total de casiers dans cette classe :

Calcul de  $M_B$  :

1. Calculer  $\frac{B_H \cdot t_h}{t_p}$
2. Arrondir la valeur trouvée à l'entier inférieur
3. Augmenter ce chiffre d'une unité si  $B_H$  n'est pas un multiple de  $t_p$

Ce qui donne le nombre d'allées qui couvre la classe B :

$$B_k = \min\left(\frac{M}{2}, M_B\right)$$

En conséquence, le nombre global des casiers dans la zone B est égal à :

$$N_B = 2 \sum_{k=1}^{B_k} B_V (B_H - 3 * (k - 1)) - N_A \quad (7)$$

Passons maintenant au calcul du temps moyen de simple cycle dans la zone B. la variation de la taille de la zone B d'une allée à l'autre contribue encore à accroître la complexité du calcul. A cet effet, nous avons divisé la classe B en deux zones, zone B1 et zone B2 comme illustré sur la *figure 2.7*.

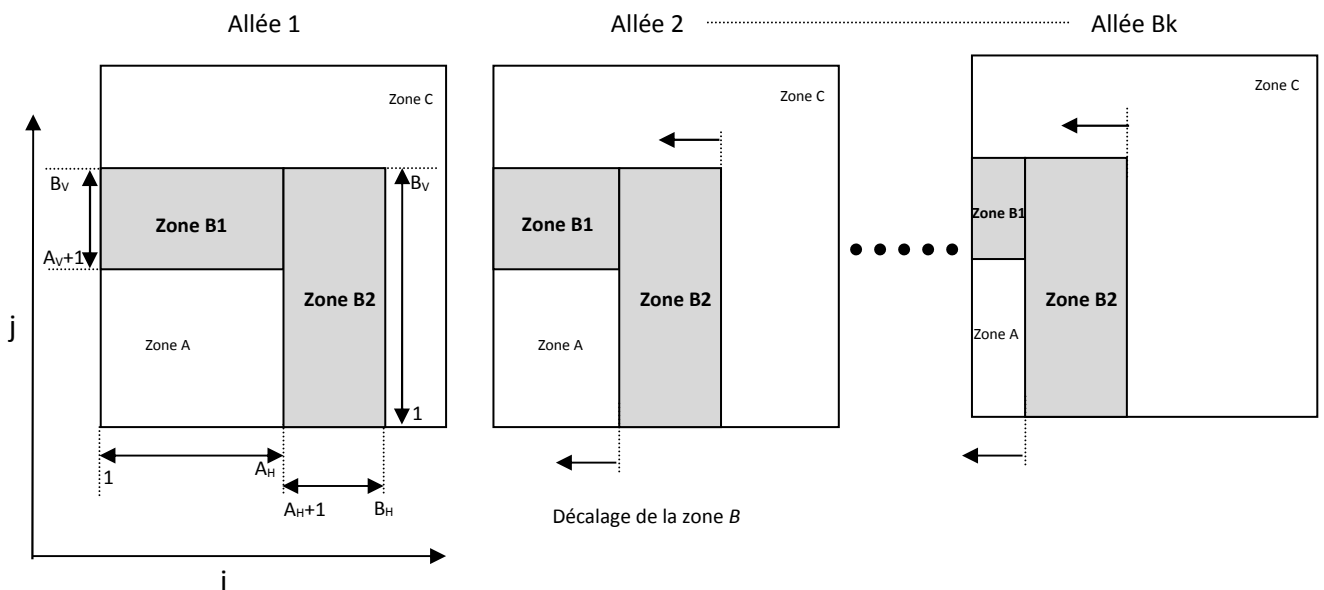


Figure 2.7 Zone B

Par conséquent, pour visiter tous les casiers de la classe B, la machine S/R met un temps moyen de simple cycle égal à :

$$\overline{E(scb)} = \frac{4}{N_B} \sum_{k=1}^{B_K} \left[ \sum_{i=A_H-3(k-1)+1}^{B_H-3(k-1)} \sum_{j=1}^{B_V} t(i, j) + \sum_{i=1}^{A_H-3(k-1)} \sum_{j=A_V+1}^{B_V} t(i, j) \right] \quad (8)$$

### 4.2.3 Temps moyen de simple cycle pour la classe C

#### a. Nombre de casiers dans la classe C

Concernant la classe C, le nombre de casiers dans cette classe sera:

$$N_C = N - N_A - N_B \quad (9)$$

De la même façon, nous pouvons calculer le temps moyen dans la classe C, après avoir divisé cette dernière en deux zones, la classe C peut être schématisée sur la *figure 2.8*

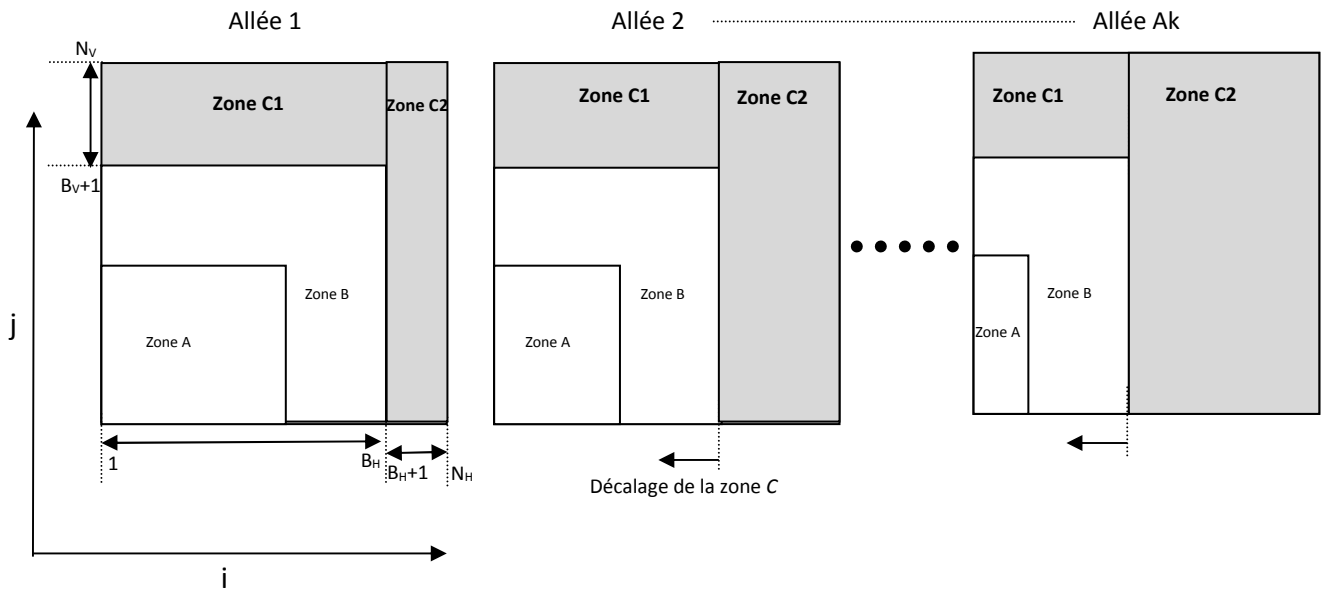


Figure 2.8 Zone C

Ce qui donne un temps moyen de simple cycle dans la zone C égal à:

$$\overline{E(scc)} = \frac{4}{N_C} \sum_{k=1}^M \left[ \sum_{i=B_H-3(k-1)+1}^{N_H} \sum_{j=1}^{N_V} t(i, j) + \sum_{i=1}^{B_H-3(k-1)} \sum_{j=B_V+1}^{N_V} t(i, j) \right] \quad (10)$$

### 4.2.4 Temps moyen de simple cycle pour le système global

Nous avons calculé précédemment les temps moyens de simple cycle pour les trois classes. La multiplication des trois expressions développées (6), (8) et (10) par le taux de rotation des produits dans chaque classe  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  respectivement, nous donne finalement le temps moyen de simple cycle dans une politique de stockage par classe E(SCBS) :

$$\overline{E(SCBS)} = \alpha \overline{E(sca)} + \beta \overline{E(scb)} + \gamma \overline{E(scc)}$$

$$\begin{aligned} \overline{E(SCBS)} = & \alpha \left[ \frac{4}{N_A} \cdot \sum_{k=1}^{A_k} \sum_{i=1}^{A_H - 3(k-1)} \sum_{j=1}^{A_V} t(i, j) \right] + \beta \left[ \frac{4}{N_B} \sum_{k=1}^{B_K} \left[ \sum_{i=A_H - 3(k-1) + 1}^{B_H - 3(k-1)} \sum_{j=1}^{B_V} t(i, j) + \right. \right. \\ & \left. \left. \sum_{i=1}^{A_H - 3(k-1)} \sum_{j=A_V + 1}^{B_V} t(i, j) \right] \right] + \gamma \left[ \frac{4}{N_C} \sum_{k=1}^M \left[ \sum_{i=B_H - 3(k-1) + 1}^{N_H} \sum_{j=1}^{N_V} t(i, j) + \sum_{i=1}^{B_H - 3(k-1)} \sum_{j=B_V + 1}^{N_V} t(i, j) \right] \right] \end{aligned} \quad (11)$$

Avec

$\alpha$ : taux de rotation des produits dans la classe A

$\beta$ : taux de rotation des produits dans la classe B

$\gamma = (1 - \alpha - \beta)$ : taux de rotation des produits dans la classe C

### 4.3 Exemple et discussion

Dans cette section, nous présentons un exemple illustratif pour calculer le temps moyen de simple cycle  $E(SCBS)$  et comparer les deux stratégies étudiées et présentées auparavant (**Ouhoud et al. 2014**). La configuration du système AS/RS sélectionnée est présentée sur le *tableau 2.2*

**Tableau 2.2 Paramètres du système étudié**

Nombre de casiers total dans le système(N) M=8,Nl=20,Nh=20	N=3200
Temps de déplacement : ( $t'_h, t'_h, t'_p$ )	(10,10, 30)
Limites de la classe A : ( $A_H, A_V$ )	(10,10)
Limites de la classe B : ( $B_H, B_V$ )	(15,15)
Limites de la classe C : ( $N_H, N_V$ )	(20,20)

Le stockage par classe subdivise les casiers en classes par rapport à leurs distances de la station de dépôt/livraison. Nous avons considéré trois classes de stockage différentes, à savoir: A, B et C. Dans la classe A, les articles fréquemment commandés n'occupent qu'une petite place de l'espace de stockage total. Typiquement, les articles ou les produits qui occupent moins d'espace de stockage sont responsables de 80% ( $\alpha$ ) de rotation. 15% de rotation des produits peuvent être faites dans la classe B. Enfin, dans la classe C, le pourcentage de rotation des produits varie autour de 5%. ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) sont répertoriés dans le *tableau 2.3*.

**Tableau 2.3** Taux de rotation des produits

Stratégie \ Classe	Classe		
	Classe A	Classe B	Classe C
Stockage par classe	80%	15%	5%
Stockage aléatoire	33.33%	33.33%	33.33%

Utilisant l'expression (11) et les paramètres énumérés dans le *tableau 2.2*, la valeur exacte du temps moyen de simple cycle  $E(SCBS)$  peut être facilement déterminée. Nous appliquons alors deux stratégies de stockages selon le *tableau 2.3*, Les résultats de ces paramètres sont donnés dans le *tableau 2.4*.

**Tableau 2.4** Temps moyen de simple cycle

Stratégie	$\overline{E(SCBS)}$
Stockage par classe	184.33
Stockage aléatoire	275.18

La politique de stockage par classe s'attaque au temps de cycle, elle permet de réduire le temps de stockage par rapport à un stockage purement aléatoire. D'après **Askin. 93**, La réduction du temps de cycle peut atteindre les 40%. Dans cet exemple, on remarque une réduction de 33.014%.

## 5. Partie 2 : Modélisation continue du temps moyen de simple cycle

### 5.1 Temps moyen de simple cycle dans la Classe A

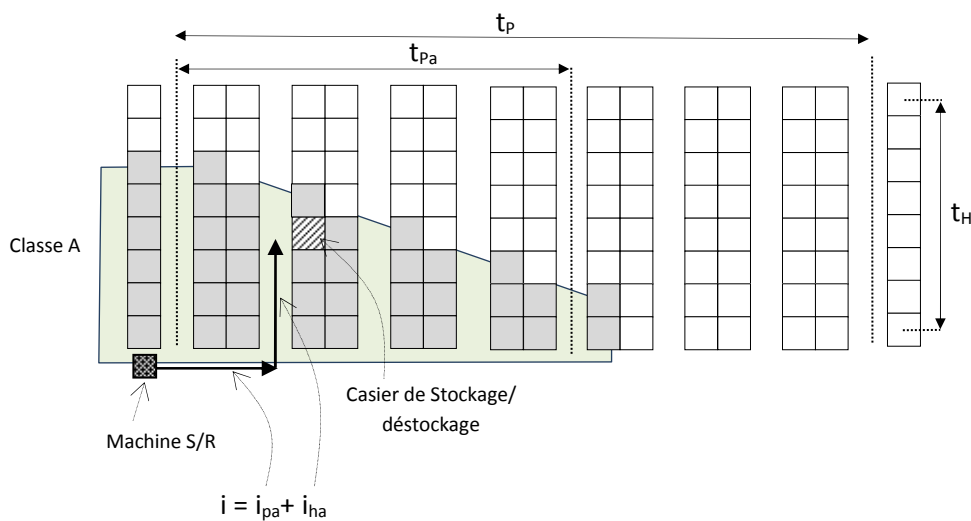
Dans cette partie du travail nous présentons une autre méthode de modélisation mathématique du temps de simple cycle de la machine S/R. nous avons pu développer plusieurs modèles mathématiques continus pour mieux optimiser, piloter et gérer un système multi allées avec un stockage par classe. Cette méthode analytique continue est applicable sur plusieurs types d'AS/RS. L'idée principale de cette méthode est basée sur une approximation continue des lois de probabilités modélisant les déplacements de la machine S/R **Guezzen et al. 2013**. Par l'utilisation de cette méthode, nous construisons un modèle mathématique continu simple et facilement calculable.

Nous avons divisé le temps de cycle de la machine S/R en un ensemble de temps de déplacement. A partir des distributions trouvées, nous calculons la distribution totale du temps de cycle. L'espérance mathématique de cette distribution nous donne le temps de cycle moyen.

Pour le développement de notre modèle, nous procédons de la manière suivante:

Prenons un casier de coordonnées  $(i, j)$  dans la zone A. sachant que  $i$  et  $j$  sont des variables aléatoires indépendantes représentant les temps de déplacement horizontal et vertical vers l'emplacement considéré. Puisque les deux variables ne prennent que des valeurs discrètes, on parle alors de variables aléatoires discrètes. Le temps de déplacement total vers ce casier est :  $\text{Max}(i, j)$ , ce qui implique que le temps de simple cycle est :  $2 \cdot \text{Max}(i, j)$ .

Les lois de probabilité des deux variables aléatoires permettent de connaître les chances d'apparition des différentes valeurs de ces variables. Dans ce cas, la loi de la variable  $i$  est déterminée par l'ensemble des probabilités :  $g(k) = g(i = k)$  avec une fonction de répartition donnée par :  $G(k) = P(i \leq k)$ ; et la loi de la variable  $j$  est déterminée par l'ensemble des probabilités :  $h(k) = h(j = k)$  avec une fonction de répartition donnée par :  $H(k) = P(j \leq k)$ ;



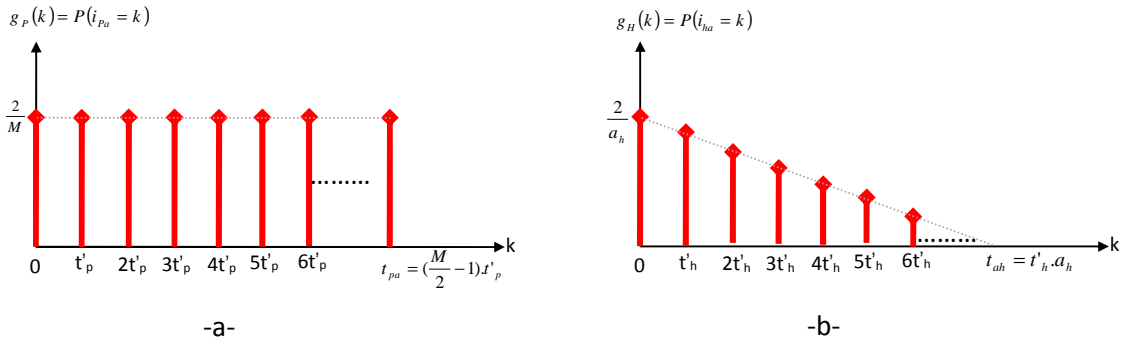
**Figure 2.9** Déplacement horizontal de la machine S/R dans la zone A (vue de haut)

Scindons le déplacement horizontal en deux déplacements. Les durées de ces déplacements horizontaux peuvent être représentées par les deux variables  $i_{pa}$  et  $i_{ha}$ .

La variable aléatoire  $i_{pa}$  peut prendre  $A_k$  valeurs possibles  $k_0=0, k_1=t'_p, k_2=2t'_p, \dots, k_{(A_k-1)}=(A_k-1)t'_p=t_{pa}$ . Elle suit une loi uniforme lorsque la probabilité de n'importe quelle valeur  $k_i$  est égale à  $1/A_k$ . la variable  $i_{pa}$  est une variable aléatoire discrète uniformément distribuée

comme indiqué sur la *figure 2.10.a*. On qualifie cette distribution d'uniforme car elle assigne la même probabilité à chaque valeur possible

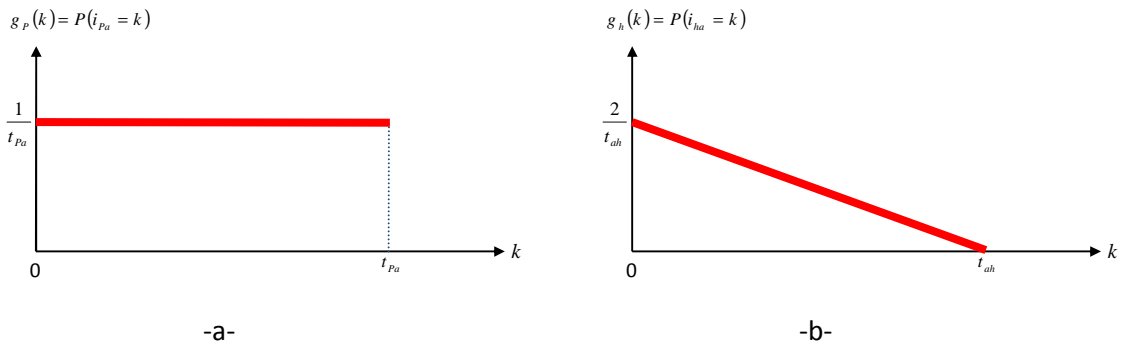
Le même raisonnement de la variable  $i_{pa}$  s'applique à la variable aléatoire  $i_{ha}$  qui peut prendre  $a_h$  valeurs possibles  $k_0=0, k_1=t'_h, k_2=2t'_h, \dots, k_{(ah)}=t_{ah}$ , cette variable suit une loi de probabilité discrète indiquant à une probabilité de réaliser chaque valeur de l'ensemble fini de valeurs  $k_i$ , comme indiqué sur la *figure 2.10.b*.



**Figure 2.10** Distribution discrète exacte des variables  $i_{pa}$  et  $i_{ha}$

La distribution exacte  $g_p(k)$  peut être approchée par la distribution uniforme continue comme représentée sur la *figure 2.11.a*

Tandis que la distribution exacte  $g_h(k)$  peut être approchée par la distribution triangulaire continue représentée sur la *figure 2.11.b*.



**Figure 2.11** Distributions continues approchées des variables  $i_{pa}$  et  $i_{ha}$

$$g_p(k) = P(i_{pa} = k) = \begin{cases} \frac{1}{t_{pa}} & \text{Si } 0 \leq k \leq t_{pa} \\ 0 & \text{Ailleurs} \end{cases} \quad (12)$$



La variable aléatoire  $i_{ha}$  suit une loi triangulaire continue sur le support  $[0, t_{ah}]$  et de mode 0. Elle est définie par la densité suivante sur  $[0, t_{ah}]$  :

$$g_h(k) = P(i_{ha} = k) = \begin{cases} \frac{2(t_{ah} - k)}{t_{ah}^2} & \text{Si } 0 \leq k \leq t_{ah} \\ 0 & \text{Ailleurs} \end{cases} \quad (13)$$

Le déplacement horizontal de la machine S/R est la somme de deux déplacements:  $i = i_{pa} + i_{ha}$ .

Donc, pour calculer la distribution de la variable  $i$  (notée  $g(k)$ ), il faut calculer le produit de convolution des deux fonctions  $g_p(k)$  et  $g_h(k)$ .

$$\begin{aligned} g(k) &= g_p(k) * g_h(k) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} g_p(t) \cdot g_h(k-t) \cdot dt \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} g_h(t) \cdot g_p(k-t) \cdot dt \end{aligned}$$

Le calcul de la convolution consiste donc à calculer la surface du produit  $g_p(u) \cdot g_h(k-u)$ . La fonction  $g_h(k-u)$  est simplement la fonction initiale  $g_h(k)$  retournée dans le temps pour donner  $g_h(-u)$ , puis translatée de  $k$ .

En calculant alors l'ensemble des surfaces obtenues en faisant «glisser»  $g_h$ , c'est-à-dire pour tous les décalages de  $k$ , on obtient le produit de convolution pour tout  $k$ .

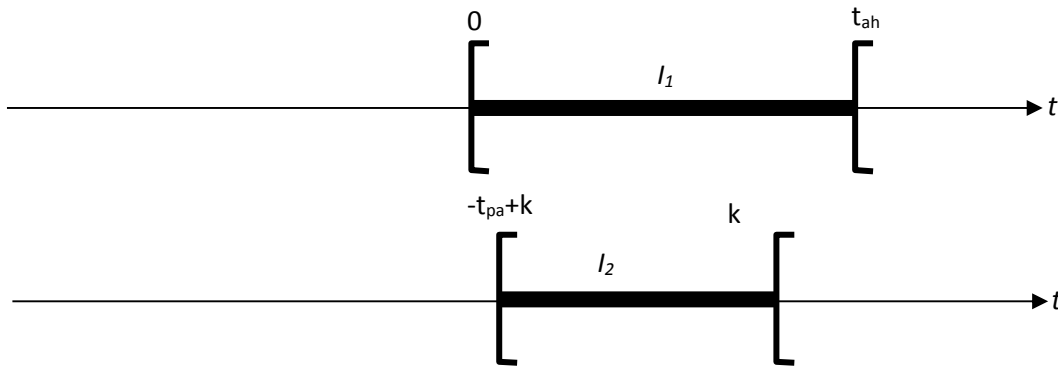
$$g_h(t) = 2(t_{ah}-t)/t_{ah}^2 \text{ si } 0 \leq t \leq t_{ah} \text{ donc } t \in [0 ; t_{ah}] = I_1$$

$$g_p(k-t) = 1/t_{pa} \text{ Si } 0 \leq k-t < t_{pa} \Leftrightarrow -k \leq -t < t_{pa}-k$$

$$\Leftrightarrow k \geq t \geq -t_{pa}+k$$

$$\Leftrightarrow -t_{pa}+k \leq t \leq k \text{ donc } t \in [-t_{pa}+k ; k] = I_2$$

Pour mieux cerner la chose, mieux vaut user d'un petit croquis :

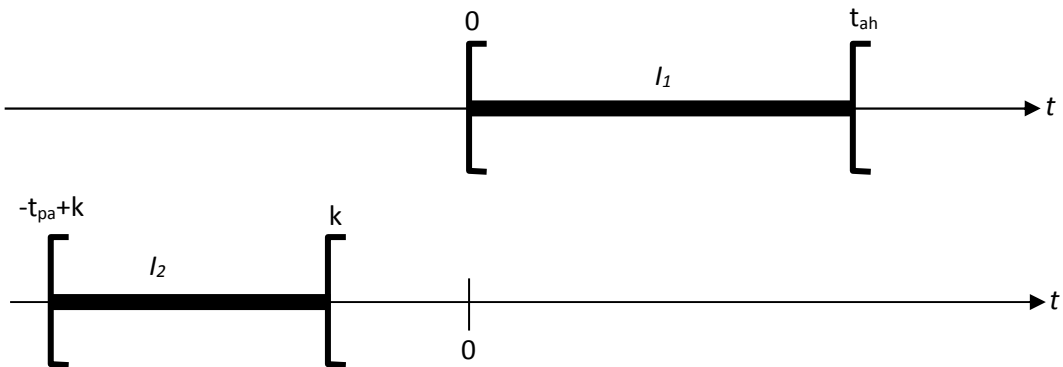


En appliquant la définition du produit de convolution, nous obtenons alors :

$$\begin{aligned}
 g(k) &= g_p(k) * g_H(k) \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} g_h(t) \cdot g_p(k-t) \cdot dt \\
 &= \int_{I_1 \cap I_2} \frac{2(t_{ah}-t)}{t_{ah}^2} \cdot \frac{1}{t_{pa}} dt
 \end{aligned}$$

Or, résoudre un tel calcul s'avère assez complexe. Nous allons utiliser la stratégie suivante : nous découpons en plusieurs cas et nous procédons aux intégrations au cas par cas :

**Cas 1 :**

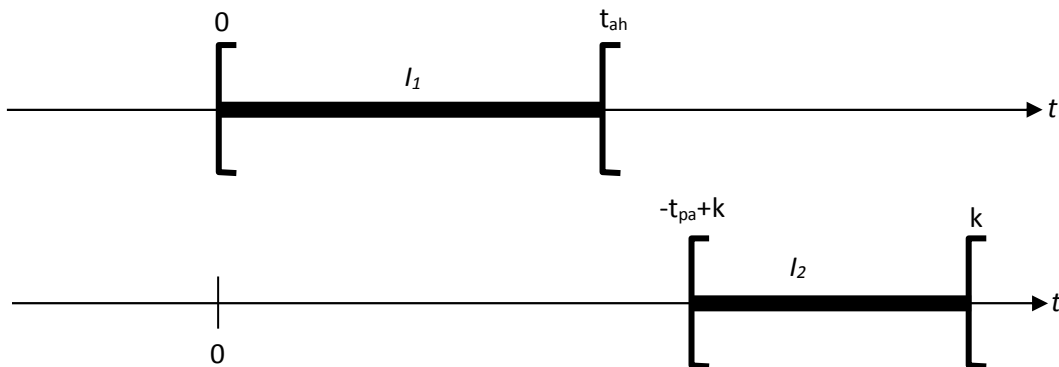


Nous remarquons que les deux intervalles ne se recouvrent pas, donc la multiplication de la fonction  $g_p(k)$  par la fonction  $g_h(k)$  nous donnera un zéro.

Dans un langage plus mathématique, cela serait :

Si  $k < 0$ , alors  $I_1 \cap I_2 = \emptyset$ , donc  $(g_p * g_h)(k) = 0$

**Cas 2 :**

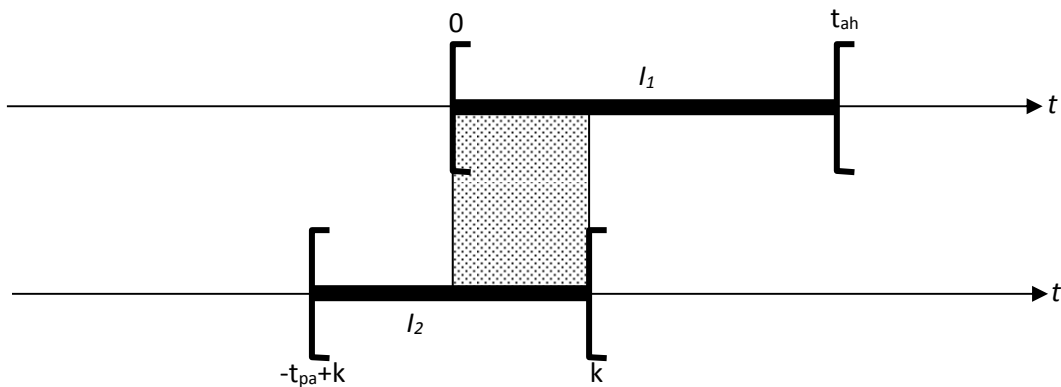


Dans cette situation il n'y a pas non plus de recouvrement. Donc :

Si  $-t_{pa}+k > t_{ah}$ , alors  $I_1 \cap I_2 = \emptyset$ , donc  $(g_p * g_H)(k) = 0$

Maintenant que nous avons vu les deux cas les plus défavorables (et aussi les plus simples...), passons à la suite.

**Cas 3 :**



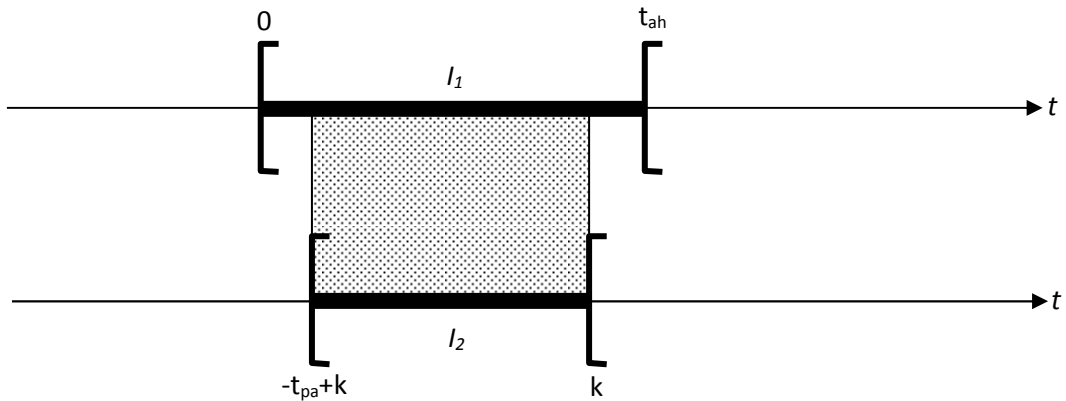
Cette fois-ci il y a recouvrement, sur une partie des deux intervalles.

Si  $0 < k$ , alors  $I_1 \cap I_2 = [0 ; k]$

On peut donc déterminer la valeur du produit de convolution, à partir de sa définition élémentaire :

$$\begin{aligned}
 (g_p * g_H)(k) &= \int_{I_1 \cap I_2} \frac{2(t_{ah} - t)}{t_{ah}^2} \cdot \frac{1}{t_{pa}} dt \\
 &= \int_0^k \frac{2(t_{ah} - t)}{t_{ah}^2} \cdot \frac{1}{t_{pa}} dt \\
 &= -\frac{k(k - 2t_{ah})}{t_{pa} t_{ah}^2}
 \end{aligned}$$

**Cas 4 :**



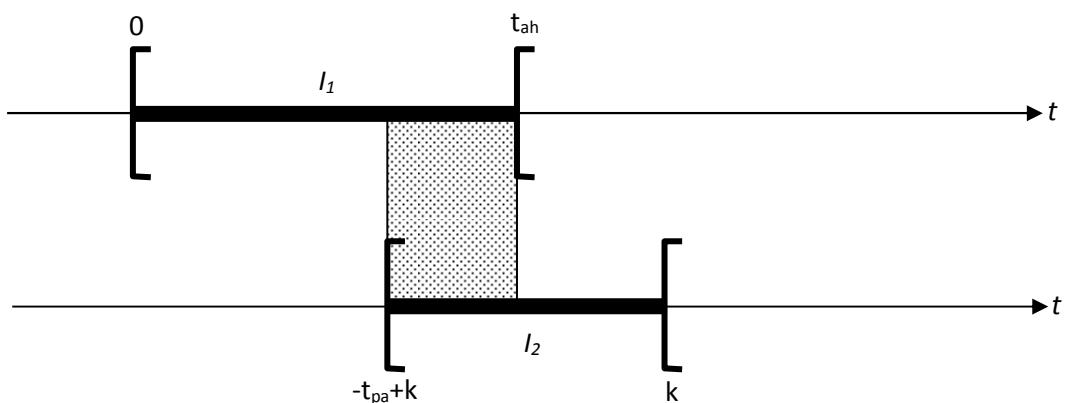
Une fois encore, il y a bien recouvrement. Donc, nous allons procéder comme au cas précédent.

Si  $-t_{pa}+k > 0$  et  $k < t_{ah}$  alors  $I_1 \cap I_2 = [-t_{pa}+k ; k]$

Déterminons la valeur du produit de convolution :

$$\begin{aligned}
 (g_p * g_H)(k) &= \int_{I_1 \cap I_2} \frac{2(t_{ah} - t)}{t_{ah}^2} \cdot \frac{1}{t_{pa}} dt \\
 &= \int_{-t_{pa}+k}^k \frac{2(t_{ah} - t)}{t_{ah}^2} \cdot \frac{1}{t_{pa}} dt \\
 &= \frac{t_{pa} - 2k + 2t_{ah}}{t_{ah}^2}
 \end{aligned}$$

**Cas 5 :**



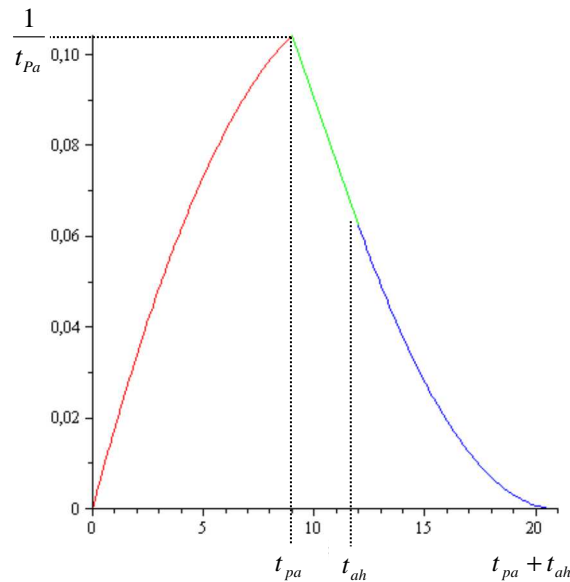
Il y a toujours et encore recouvrement :

Si  $-t_{pa}+k > 0$  et  $k > t_{ah}$  alors  $I_1 \cap I_2 = [-t_{pa}+k ; t_{ah}]$

Déterminons la valeur du produit de convolution :

$$\begin{aligned} (g_p * g_H)(k) &= \int_{I_1 \cap I_2} \frac{2(t_{ah}-t)}{t_{ah}^2} \cdot \frac{1}{t_{pa}} dt \\ &= \int_{-t_{pa}+k}^{t_{ah}} \frac{2(t_{ah}-t)}{t_{ah}^2} \cdot \frac{1}{t_{pa}} dt \\ &= \frac{(-t_{pa}+k-t_{ah})^2}{t_{pa} t_{ah}^2} \end{aligned}$$

$$g(k) := \begin{cases} -\frac{k(k-2t_{ah})}{t_{pa} t_{ah}^2} & k \leq t_{ah} \text{ et } 0 < k \\ \frac{t_{pa} - 2k + 2t_{ah}}{t_{ah}^2} & t_{ah} < k \text{ et } k \leq t_{pa} \\ \frac{(-t_{pa} + k - t_{ah})^2}{t_{pa} t_{ah}^2} & t_{pa} < k \text{ et } k \leq t_{pa} + t_{ah} \end{cases} \quad (14)$$



**Figure 2.12.** Distribution aléatoire de la variable  $i$  modélisant le déplacement horizontal de la machine S/R dans la zone A

Une description de la probabilité d'une variable aléatoire est souvent utilisée. Il s'agit de la dérivée de la fonction de répartition.  $g(k) = G'(k)$ , donc, pour déterminer la fonction de

distribution cumulative  $G(k)$  de la variable  $i$  modélisant le déplacement horizontal de la machine S/R, il faudra alors calculer l'intégrale :

$$G(k) = \int_{-\infty}^k g(t) dt$$

La fonction de répartition de la variable  $i$  est présentée par l'expression (15), cette fonction de répartition donne la probabilité que la variable  $i$  prenne une valeur inférieure ou égale à toute valeur particulière «  $k$  ».

$$G(k) = \begin{cases} -\frac{1}{3} \frac{k^2 (k - 3t_{ah})}{t_{pa} \cdot t_{ah}^2} & 0 < k \leq t_{ah} \\ \frac{1}{3} \frac{(6k - 3t_{pa})t_{ah} - t_{pa}^2 - 3k^2 + 3t_{pa}k}{t_{ah}^2} & t_{ah} < k \leq t_{pa} \\ \frac{1 - t_{ah}^3 + 3t_{ah}^2 k - 3(k - t_{pa})^2 t_{ah} + (k - t_{pa})^3}{3 t_{pa} t_{ah}^2} & t_{pa} < k \leq t_{pa} + t_{ah} \\ 1 & t_{pa} + t_{ah} < k \end{cases} \quad (15)$$

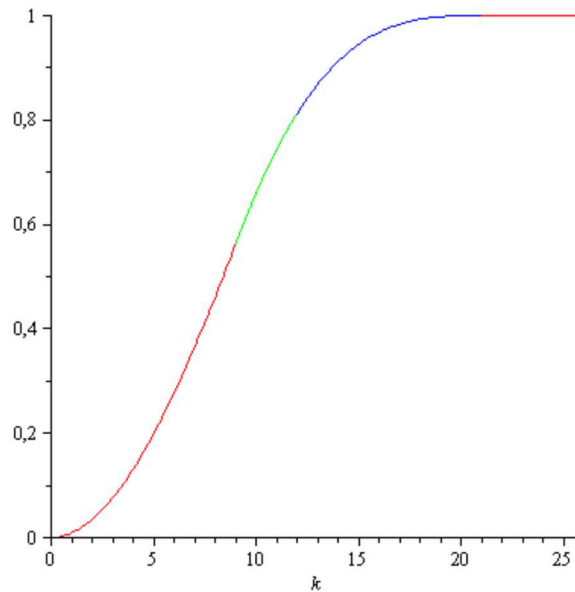
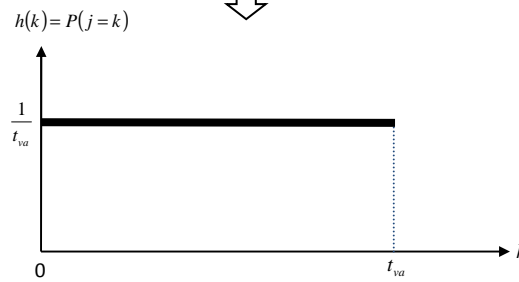
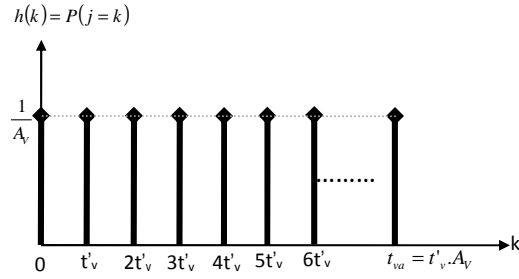


Figure 2. 13 Fonction de répartition  $G(k)$

Etudions maintenant le déplacement vertical de la machine S/R. La variable aléatoire  $j$  modélisant ce mouvement vertical peut prendre  $A_V$  valeurs possibles  $k_0=0, k_1=t'_v, k_2=2t'_v, \dots, k_{(A_V)}=t_{va}$ . Cette variable suit une loi uniforme lorsque la probabilité de n'importe quelle valeur  $k_i$  est égale à  $1/A_V$  comme nous pouvons le voir sur la *figure 2.14.a*, l'approximation continue de cette distribution est représentée dans la *figure 2.14.b*.



**Figure 2.14.** Distribution de probabilité de la variable aléatoire  $j$  modélisant le déplacement vertical de la machine S/R

La densité de probabilité de ce déplacement vertical peut être représentée par la fonction suivante :

$$h(k) = P(j = k) = \begin{cases} \frac{1}{t_{va}} & \text{si } 0 < k \leq t_{va} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (16)$$

Par conséquent :

$$H(k) = P(j \leq k) = \begin{cases} 0 & \text{si } k \leq 0 \\ \frac{k}{t_{va}} & \text{si } 0 < k \leq t_{va} \\ 1 & \text{si } k > t_{va} \end{cases} \quad (17)$$

Or, le temps de déplacement total de la machine S/R est le maximum entre le déplacement horizontal et le déplacement vertical  $Max(i, j)$ . Dans ce cas, la fonction de répartition de  $Max(i, j)$  notée par  $F$  est donnée par :

$$\begin{aligned} F(k) &= P(\text{Max}(i, j) \leq k) \\ &= P(i \leq k \ \& \ j \leq k) \\ &= P(i \leq k) \cdot P(j \leq k) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= G(k).H(k) \Rightarrow f(k) = F'(k) \\
 &= g(k).H(k) + G(k).h(k)
 \end{aligned} \tag{18}$$

Selon les dimensions données pour la classe A et la configuration du système étudié, nous pouvons différencier 4 cas possibles dans le calcul de F(k):

- 1<sup>er</sup> cas:  $0 < t_{va} \leq t_{pa}$
- 2<sup>ème</sup> cas:  $t_{pa} < t_{va} \leq t_{ah}$
- 3<sup>ème</sup> cas:  $t_{ah} < t_{va} \leq t_{pa} + t_{ah}$
- 4<sup>ème</sup> cas:  $t_{pa} + t_{ah} < t_{va}$

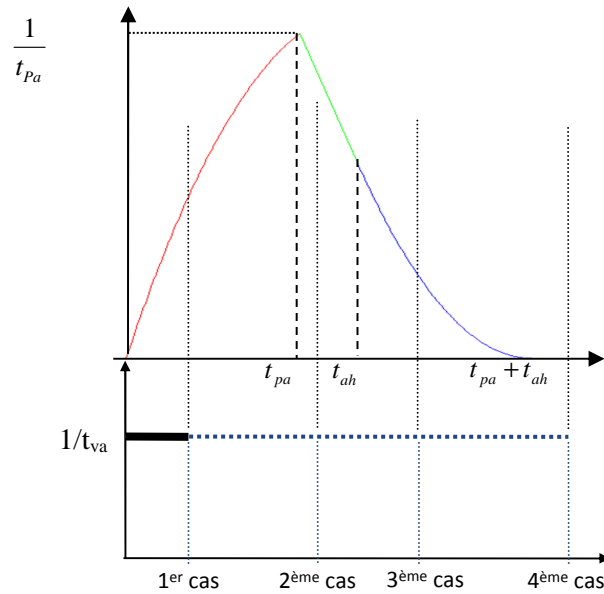


Figure 2.15. Différents cas possibles

Pour le premier cas, le calcul de F(k) nous donne l'expression suivante :

$$F_1(k) = \begin{cases} -\frac{1}{3} \frac{k^3 (k - 3t_{ah}^3)}{t_{pa} \cdot t_{ah}^2 \cdot t_{va}} & 0 < k \leq t_{va} \\ -\frac{1}{3} \frac{k^3 (k - 3t_{ah}^3)}{t_{pa} \cdot t_{ah}^2} & t_{va} < k \leq t_{pa} \\ \frac{1}{3} \frac{(6k - 3t_{pa})t_{ah} - t_{pa}^2 - 3k^2 + 3t_{pa}k}{t_{ah}^2} & t_{pa} < k \leq t_{ah} \\ \frac{1}{3} \frac{-t_{ah}^3 + 3t_{ah}^2 k - 3(k - t_{pa})^2 t_{ah} + (k - t_{pa})^3}{t_{pa} t_{ah}^2} & t_{ah} < k \leq t_{pa} + t_{ah} \\ 1 & t_{pa} + t_{ah} < k \end{cases} \tag{19}$$



En nous basant sur les travaux de **Guezen. 2014 et Ghomri. 09**, nous calculons maintenant le temps moyen de simple cycle. Nous procédons, alors, au calcul de l'**espérance mathématique** de la variable *aléatoire*  $Max(i, j)$ . Rappelons que ce dernier modélise le temps de déplacement total de la machine S/R. Nous avons alors :

$$E(Max(i, j)) = \int_{-\infty}^{+\infty} k.f(k).dk \quad (20)$$

Comme  $f(k)$  est réduit à zéro en dehors de l'intervalle  $[0, t_{pa}+t_{ah}]$ , donc l'équation(20) peut être réduite à l'équation suivante comme:

$$E(Max(i, j)) = \int_0^{a+b} k.f(k).dk \quad (21)$$

Ensuite, nous calculons cette fonction en utilisant l'intégration par parties. Nous obtenons alors:

$$\begin{aligned} E(Max(i, j)) &= \left[ k \cdot F(k) \right]_{k=0}^{t_{pa}+t_{ah}} - \int_0^{t_{pa}+t_{ah}} k \cdot F(k) \cdot dk \\ &= t_{pa}+t_{ah} - \int_0^{t_{pa}+t_{ah}} k \cdot F(k) \cdot dk \end{aligned}$$

Après calcul, nous obtenons l'expression mathématique du temps moyen de simple cycle de la machine S/R dans le premier cas :

$$Esca_1 = \frac{1}{30} \frac{30 t_{pa}^2 t_{ah}^2 - t_{va}^4 + 5 t_{va}^3 t_{ah} + 20 t_{pa} t_{ah}^3}{t_{pa} \cdot t_{ah}^2} \quad (22)$$

Nous procédons de la même manière pour calculer le temps moyen pour le 2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> cas. Notons que ( $a=t_{ah}$ ,  $b=t_{pa}$ ,  $c = t_{va}$ ).

Nous trouvons, enfin, un système d'équations qui représente le temps moyen de simple cycle de la machine S/R pour visiter l'ensemble de casiers de la classe A.

$$E(sca) = \begin{cases} \frac{1}{30} \frac{-c^4 + 5c^3a + 30b^2a^2 + 20ba^3}{b^2} & c \leq a \text{ et } 0 < c \\ \frac{1}{30} \frac{20b^2ca + 5c^3 - 5c^4 - b^4 - 5b^3a + 20c^3a + 10bc^3 - 10b^2c^2 - 30ba^2c + 30a^2cb + 20a^3c}{a^2c} & c \leq b \text{ et } a < c \\ \frac{1}{30} \frac{c^5 + (-5a - 5b)c^4 + 10(b+a)^2c^3 + (-10b^3 - 30b^2a - 10a^3)c^2 + 5(b+a)^4c - b^5 - 5b^4a - a^5}{a^2cb} & b < c \text{ et } c \leq b + a \\ \frac{1}{6} \frac{6c^2 + 2b^2 + 2ba + a^2}{c} & b + a < c \end{cases} \quad (23)$$

Le modèle que nous avons développé (23) est exprimé par des équations facilement calculables. Ce sont des fonctions continues et dérivables sur l'intervalle  $[0, t_{pa}+t_{ah}]$ , de plus, ce modèle peut être facilement utilisé pour l'étude et l'optimisation des dimensions de la classe A dans une stratégie de stockage par classe.

### 5.2 Temps moyen de simple cycle dans la Classe B

Pour calculer le temps moyen de simple cycle dans la classe B, nous procédons de la manière suivante :

1. Suivant les mêmes étapes de calcul présentées dans la section précédente, nous calculons le temps moyen de simple cycle de la zone qui couvre la classe A et la classe B au même temps. Sachant que cette zone est limitée par :  $t_{bh}$ ,  $t_{pb}$  et  $t_{vb}$ , nous trouverons alors un système d'équation en fonction de  $t_{bh}$ ,  $t_{pb}$  et  $t_{vb}$ . On le désigne par :  $E(scab)$ .
2. Après, nous calculons le nombre de casiers dans la zone A, ( $N_A$ )
3. Nous calculons ensuite le nombre de casiers dans la zone B, ( $N_B$ )
4. Enfin, nous calculons le temps moyen de simple cycle dans la classe B qui peut être représenté par l'expression suivante :

$$E(scab) = \frac{E(scba).(N_A + N_B) - E(sca).N_A}{N_B} \quad (24)$$

### 5.3 Temps moyen de simple cycle dans la Classe C

Nous avons, maintenant, les valeurs de  $E(scab)$  et  $E(sca)$ , pour trouver le temps moyen de simple cycle dans la classe C. Il suffit alors de calculer la moyenne :

$$E(scc) = \frac{E(sc).N - E(scab).N_B - E(sca).N_A}{N_c} \quad (25)$$

Sachant que :

$$\overline{E(SC)} = t_p + t_h + \frac{t_v^3}{12t_p t_h} + \frac{(t_v - t_p - t_h)^3 \text{Max}(t_v - t_p - t_h, 0) - (t_v - t_p)^3 \text{Max}(t_v - t_p, 0) - (t_v - t_h)^3 \text{Max}(t_v - t_h, 0)}{12t_p t_h t_v} \quad (26)$$

tel que  $E(SC)$  est le modèle continu développé par **Guezzen, 2014** qui représente le temps moyen de simple cycle d'un AS/RS multi-allées avec une politique de stockage aléatoire.

## 6. Comparaison avec l'expression discrète et la validation

Pour évaluer la précision des expressions mathématiques développées dans les deux sections (4) et (5), nous avons pris une variété de configurations d'AS/RS multi-allées avec plusieurs dimensions des classes ABC. Nous avons effectué une comparaison entre les

résultats donnés par l'expression continue avec ceux donnés par l'expression discrète, sachant que cette dernière donne des résultats exacts. Les résultats sont illustrés dans le *tableau 2.5* et dans la *figure 2.16*.

**Tableau 2.5** Comparaison entre les résultats donnés par le modèle continu et le modèle discret

Configurations	1	2	3	4	5	6
Nombre de casiers dans le système N	400	3600	4000	7200	12500	16000
Nombre de racks M	4	6	10	8	20	10
Nombre de casiers par ligne $N_H$	10	30	20	30	25	40
Nombre de casiers par colonne $N_V$	10	20	20	30	25	40
$A_H$	5	10	10	20	13	20
$A_V$	5	15	8	20	13	20
$B_H$	8	20	15	25	20	30
$B_V$	8	18	15	25	20	30
$A_K$	2	3	4	4	5	5
$B_K$	2	3	5	4	7	5
Nombre de casiers dans la classe A : $N_A$	70	630	352	2480	910	2800
Nombre de casiers dans la classe B : $N_B$	138	1206	998	1620	2170	4400
Nombre de casiers dans la classe C : $N_C$	192	1764	2650	3100	9420	8800
Modèle Discret E(sca)	8.05	18.89	14.64	29.32	20.04	29.86
Modèle Continu E(sca)	7.04	17.46	16.20	27.47	22.17	29.19
Modèle Discret E(scb)	14.23	32.14	26.64	46.19	37.53	51.75
Modèle Continu E(scb)	12.75	28.99	26.84	43.84	38.82	48.69
Modèle Discret E(scc)	20.60	52.68	42.49	60.28	65.59	76.55
Modèle Continu E(scc)	18.87	52.51	39.57	59.21	60.18	75.33

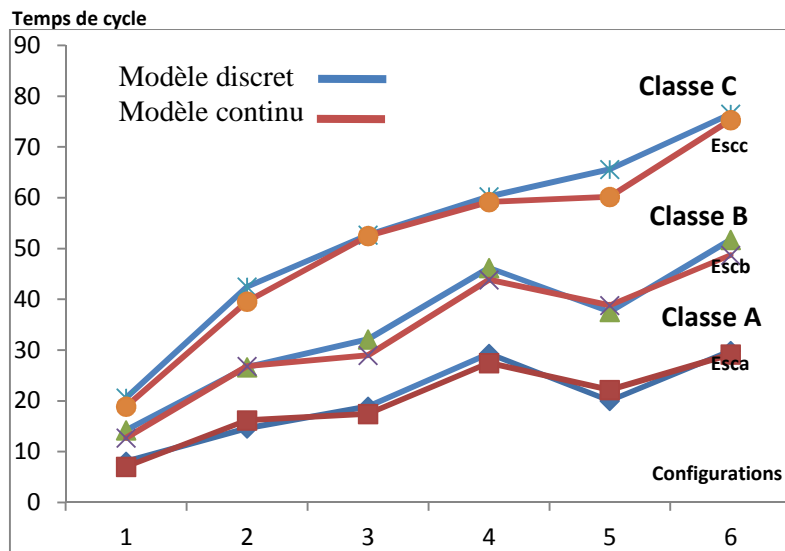


Figure 2.16 Comparaison entre les résultats donnés par le modèle continu et le modèle discret pour les trois classes

Sachant que  $\overline{E(SCBS)} = \alpha \overline{E(sca)} + \beta \overline{E(scb)} + \gamma \overline{E(scc)}$ , prenons  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  égal à 0.8, 0.15 et 0.05 respectivement. Nous obtenons alors les résultats présentés dans le tableau suivant :

**Tableau 2.6** Temps moyen de simple cycle (stockage par classe)

Configurations	1	2	3	4	5	6
E(SCBS) : Modèle discret	9,60	17,83	22,56	33,39	24,94	35,47
E(SCBS) : Modèle continu	8,48	18,96	20,94	31,51	26,56	34,42
Erreur	0,11	-0,06	0,07	0,05	-0,06	0,02

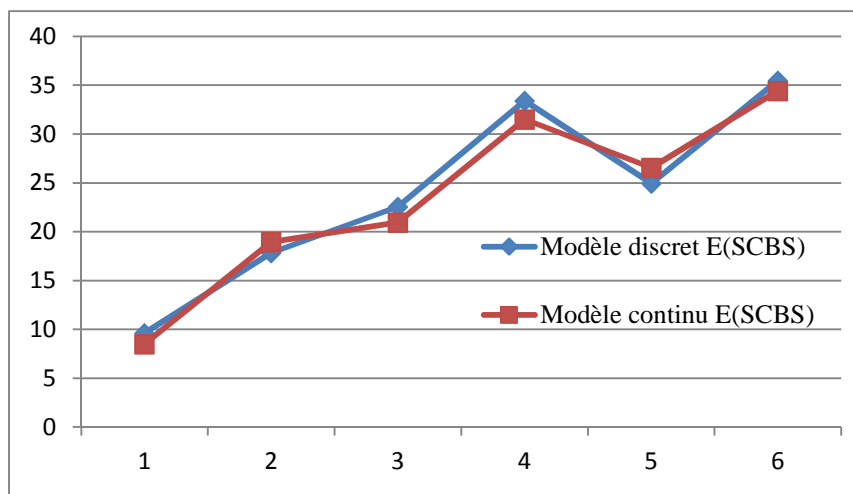


Figure 2.17 Comparaison entre les résultats donnés par le modèle continu et le modèle discret E(SCBS)

Les *figures 2.16* et *2.17* montrent que les résultats de ces deux modèles sont très proches les uns des autres. Des petites différences de temps de déplacement moyen ont été constatées selon les différentes approches analytiques développées auparavant. Ceci est prévisible car les expressions développées sont une approximation continue des données discrètes.

## **7. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons étudié les systèmes automatisés de stockage/déstockage multi-allées soumis à une politique de stockage par classe. Dans une première partie, nous avons développé une approche discrète. Nous avons détaillé la modélisation mathématique du temps moyen de simple cycle pour chaque classe du système, pour la classe A, la classe B et la classe C.

Par la suite, nous avons présenté l'approche continue développée. Cette dernière est une approche analytique basée sur une approximation continue des différentes distributions discrètes exactes modélisant les déplacements horizontaux et verticaux de la machine S/R dans chaque classe.

Pour la validation de ces modèles, dans un premier temps, nous avons présenté les résultats d'un exemple numérique indiquant le gain en temps d'une politique de stockage par classe par rapport à un stockage aléatoire, pour cela nous avons utilisé le modèle discret proposé. Nous avons remarqué que la réduction du temps de cycle peut atteindre les 33%. Ensuite, nous avons étudié plusieurs configurations pour comparer les résultats donnés par le modèle discret et le modèle continu, cette comparaison nous a permis de conclure que les résultats trouvés par le modèle discret suivent parfaitement les résultats trouvés par le modèle continu.

Le chapitre qui suit porte sur le développement d'un modèle de simulation permettant d'étudier un comportement proche de la réalité des systèmes multi-allées avec un stockage par classe.

# Chapitre 3

## Simulation et validation des résultats

---

<b>1. Introduction .....</b>	<b>71</b>
<b>2. Simulation dans les systèmes de production .....</b>	<b>72</b>
2.1. Définition.....	72
2.2. Objectif de la simulation .....	72
2.3. Etapes et critères de réalisation d'une simulation .....	73
2.4. Langage de simulation.....	74
<b>3. Application de la simulation dans les AS/RSs.....</b>	<b>75</b>
3.1. Etat de l'art .....	75
3.2. Simulation d'un AS/RS multi allée avec le stockage aléatoire et par classe.....	79
3.3. Analyse des résultats .....	85
<b>4. Conclusion.....</b>	<b>88</b>

## 1. Introduction

Depuis les années soixante, une technique s'est créée parallèlement aux méthodes analytiques. Il s'agit de la simulation. Cette dernière exploite la voie expérimentale. Les premiers langages de simulation développés ont été principalement utilisés pour des projets financiers afin de déterminer des coûts dans le cadre d'une unité de production mais rarement en ingénierie (**Serin et al. 1996**).

La simulation est utilisée dans de nombreux domaines : la conception, l'optimisation, l'évaluation des performances..., Elle est aussi appliquée dans différents champs d'application : l'informatique, les réseaux de communication, la logistique, la fabrication, les stratégies militaires, la manutention... .

Elle intervient souvent dans le cas de systèmes beaucoup trop complexes pour donner lieu à un modèle mathématique fiable. Ceci est particulièrement vrai quand le système est soumis à des phénomènes dynamiques et des situations aléatoires.

Le principe de la simulation est de construire le modèle d'un système, de conduire des expérimentations sur celui-ci et d'interpréter les observations dans le but de prendre une décision. Elle permet de comprendre le fonctionnement dynamique du système, de comparer des configurations dans le but d'améliorer les performances globales ou de valider un modèle mathématique.

Les performances des systèmes automatisés de stockage/déstockage (AS/RS) ont fait l'objet de plusieurs recherches, basées principalement sur la modélisation et la simulation. Parmi ces recherches, nous citons **Gaour et al. 2006**, **Cardin et al. 2012**, **Ouhoud et al. 2013**, **Sari et al. 2014** etc...

Ce chapitre a pour objectif de valider et comparer les résultats obtenus par simulation avec ceux développés analytiquement dans le chapitre précédent (discret et continu). Dans ce but, Nous nous sommes servis de la plateforme du logiciel SIMAN ARENA pour développer un modèle de simulation. Les modèles construits permettent, ensuite, la détermination expérimentale du temps moyen de simple cycle avec un stockage aléatoire et un stockage par classe correspondant à différentes configurations des AS/RS.

## 2. Simulation dans les systèmes de production

### 2.1. Définition

La littérature propose plusieurs définitions de simulation. Selon **Law et al. 1991** par exemple, elle peut être définie comme étant :

*« Un moyen explicatif pour définir un système, un vecteur d'analyse pour déterminer des résultats critiques, un évaluateur de conception pour analyser et évaluer des solutions proposées... ».*

De façon très générale, simuler signifie *"représenter la réalité par un moyen quelconque"*. De façon un peu plus particulière, on peut utiliser la définition de **Shubik (réf. Naylor et al)**: *"La simulation d'un système ou d'un organisme est l'opération d'un modèle (ou simulateur) qui est une représentation du système ou organisme. Le modèle se prête à des manipulations qui seraient impossibles, trop coûteuses ou non pratiques à effectuer sur le système. L'opération du modèle peut être étudiée et on peut en tirer les propriétés du comportement du système réel ou d'un de ses sous-systèmes"*.

### 2.2. Objectif de la simulation

Pour aboutir à une solution intéressante, il faut tester un nombre suffisant de scénarios afin de les comparer et de retenir le plus intéressant. Donc la simulation est une démarche par induction (étude de cas particuliers afin d'aboutir à une conclusion, la plus générale possible) et non par déduction (solution obtenue par un raisonnement, un algorithme). En production, la simulation permet d'évaluer les effets suivants :

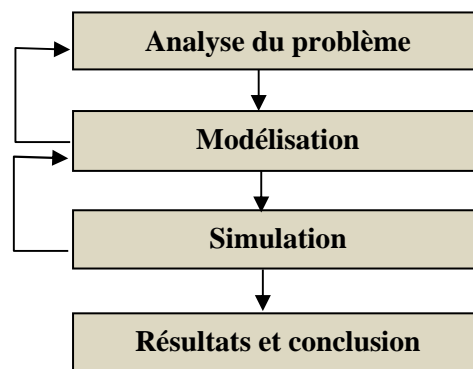
- Les implantations physiques : l'ajout ou suppression d'une machine, un système de manutention ou modification d'un processus de fabrication
- Le dimensionnement des ressources : adjonction ou suppression des opérateurs, des outils. De plus les systèmes logistiques peuvent être testés avant investissement.
- Les goulots d'étranglement et autres blocages, souvent pressentis grâce à l'expérience du concepteur, deviennent identifiables et surtout quantifiables, exemple, la capacité des stocks.
- Les réactions du système face à certains phénomènes aléatoires peuvent être envisagées et maîtrisées. L'influence de certains paramètres sur les critères de performance peut être chiffrée, par exemple, les pannes des machines, la rupture des stocks, les commandes urgentes.



- De nouvelles structures organisationnelles, ou règles de gestion, peuvent être testées sans gêner le fonctionnement d'un atelier existant, exemple, les règles de gestion des files d'attente, l'affectation des ressources, ...
- Enfin, et surtout, une plus grande variété de solutions peut être envisagée et testée avant de décider.

### 2.3. Etapes et critères de réalisation d'une simulation

On peut découper un projet de simulation en 4 étapes (*Figure 3.1.*)



*Figure 3.1* Les étapes de la simulation.

Comme nous le voyons sur la *figure 3.1*, ces étapes se déroulent d'une manière séquentielle, mais des feed-back sont possibles afin de modifier ou de compléter l'élaboration du modèle en fonction des objectifs fixés.

#### 2.3.1 Analyse du problème

Au niveau de cette étape on doit déterminer les indicateurs de performance qui vont permettre de vérifier si l'on atteint les objectifs que l'on s'est fixés. Pour cela, il faut avoir des données numériques du modèle par exemple :

- Données sur les produits à fabriquer : routage, loi d'arrivée dans des produits, temps de traitement etc...
- Données sur les moyens de production : nombre et types de machines, lois de pannes, nombre et types de ressources complémentaires de production (outils, palettes, etc...)
- Données sur les systèmes de manutention : nombre et type de convoyeurs ou de chariots, capacité en nombre d'articles, vitesse de déplacement, etc...
- Données sur les stocks et les entrepôts de stockage : types et capacités, règles d'entrée et de sortie, politique de stockage

- données sur le personnel : effectifs, compétences et horaires.

### **2.3.2 Modélisation**

La modélisation consiste à construire un modèle informatique d'un système donné. **Belattar. 2000** définit un modèle comme suit :

*«Un modèle est un schéma, i.e. une description mentale (intériorisée), ou figurée (diagrammes, formules mathématiques, etc ...) qui, pour un champ de questions est pris comme représentation abstraite d'une classe de phénomènes, plus ou moins habilement dégagés de leur contexte par un observateur pour servir de support à l'investigation, et/ou à la communication».*

### **2.3.3 Simulation**

Une fois le modèle réalisé, des simulations en seront faites sur ce modèle pour comprendre le comportement du système modélisé ou pour évaluer différentes stratégies pour différentes opérations du système. Donc, la simulation a pour but de faire fonctionner le modèle pour générer des résultats.

### **2.3.4 Analyse des résultats**

À partir de ces résultats, on analyse le fonctionnement du système à travers des critères de performances et on prend en conséquence des décisions au niveau conceptuel ou opérationnel.

## **2.4 Langage de simulation**

Le choix d'un logiciel de simulation est une étape importante pour mener à bien l'étude d'un modèle. Si le logiciel choisi n'est pas assez flexible ou trop difficile à utiliser, le projet de simulation peut produire des résultats erronés, voire tout simplement ne pas être conduit à terme. Une analyse du choix du logiciel de simulation est conduite dans **Law. 2007**, Deux tendances s'opposent en simulation, à savoir l'utilisation d'un paquetage de simulation et celle d'un langage de programmation classique. Chaque approche a ses avantages et ses inconvénients, comme résumé ci-dessous :

### **2.4.1. Paquetage de simulation**

- Il fournit la plupart des caractéristiques nécessaires pour construire un modèle de simulation ;
- environnement naturel pour la simulation ;
- modèles de simulation généralement plus faciles à écrire et à modifier ;
- généralement beaucoup de vérifications d'erreurs intégrées (facilite la tâche de feedback) ;

- on distingue les paquetages de simulation à but générique, et les paquetages de simulations orientés pour des applications particulières.

#### **2.4.2. Langage de programmation**

- Beaucoup de modélisateurs connaissent déjà un langage de programmation ;
- un modèle de simulation en C, C++, Java, . . . peut-être plus rapide à exécuter ;
- plus de flexibilité de programmation ;
- on peut bénéficier de l'approche orientée-objet ;
- le logiciel de développement coûte moins cher, bien que le coût total du projet puisse être plus important étant donné que le temps de développement en particulier est souvent plus long.

Comme nous nous intéressons plus particulièrement aux paquetages de simulation, nous pouvons, en outre, opérer une distinction entre les logiciels de simulation à but générique et ceux conçus pour des applications particulières. Historiquement, les langages de simulation offraient un meilleur niveau de flexibilité, mais étaient souvent difficiles à utiliser. Par contre, les simulateurs orientés application bénéficiaient d'avantage d'interfaces graphiques. Ils étaient plus faciles d'usage, mais pouvaient manquer de souplesse pour certains problèmes. Ces distinctions tendent toutefois à disparaître comme les langages de simulations sont à présent, souvent, intégrés dans des environnements graphiques, et les logiciels de simulation gagnent quant à eux en flexibilité. La distinction majeure reste donc sur la classe des simulations que peut traiter un logiciel donné, variant entre une orientation vers des applications spécifiques, ou au contraire une approche plus générique, même si ce logiciel peut disposer, en outre, de caractéristiques spécifiques pour certaines applications.

### **3. Application de la simulation dans les AS/RSs**

#### **3.1. Etat de l'art**

Tout d'abord, lors de la modélisation des applications du monde réel, les systèmes sont souvent trop complexes pour permettre des modèles réalistes et être évalués analytiquement. Pour surmonter cette difficulté, les hypothèses sont simplifiées et elles sont utilisées pour ces modèles. Par exemple, afin d'évaluer les performances d'un système automatisé de stockage/déstockage, certains modèles analytiques supposent une politique de stockage aléatoire et la configuration d'un AS/RS à charge unitaire, qui ne tient pas compte de la plupart des implémentations du monde réel. Ensuite, en prenant en compte le phénomène stochastique (demande stochastique), il est parfois un problème dans les approches purement

analytiques. La simulation est une méthode d'analyse numérique conçue pour estimer les véritables caractéristiques des systèmes complexes dans lesquels certains composants se comportent d'une manière stochastique. Donc, la conception d'un AS/RS peut certainement bénéficier d'une analyse de simulation.

Cet état de l'art se concentre sur les approches de modélisation qui intègrent la simulation dans les AS/RSs. Comme mentionnée ci-dessus, les modèles de simulation dans la littérature ne sont pas très détaillés et nous donnent l'impression qu'ils ont été développés pour des scénarios très spécifiques. Cette section présente quelques-uns de ces documents, en soulignant le manque de modèles détaillés.

Dans des recherches antérieures, la simulation a été appliquée avec succès pour étudier les AS/RSs. Parmi les premiers chercheurs qui ont utilisé cette technique, **Schwarz et al. 1978** ont examiné et ont étendu les modèles analytiques de **Hausman et al. 1976** et **Graves et al. 1977** à l'aide d'une simulation d'un rack discret afin d'étudier la politique de stockage et son effet sur le temps de cycle. Ils ont utilisé les mêmes hypothèses et ils ont modélisé un système à 2 racks séparés par une allée dont la capacité de chaque rack est égale à  $100 \times 10$  emplacements. Chaque arrivée contient un seul produit qui sera placé dans une file d'attente de stockage de capacité infinie.

Grâce à leur modèle, les auteurs ont conclu que le choix d'un casier, en se basant sur le stockage aléatoire ouvert, occupe 90% du rack lorsque aucun entrelacement ni séquençage n'est autorisé. Dans ce cas, il est légitime de se demander si ces résultats sont généralisables à d'autres politiques de stockage.

Dans d'autres cas, la simulation a été utilisée pour optimiser les AS/RS. Par exemple, **Azadivar. 1984** a proposé un modèle de simulation qui a permis de tester l'effet des politiques de stockage et d'optimiser le système. L'objectif de son modèle était d'optimiser le temps moyen de simple cycle requis par la machine S/R pour accomplir une tâche de stockage ou de déstockage. Les approximations stochastiques ont été utilisées dans un algorithme de simulation qui obtient les valeurs optimales. Ils ont utilisé la représentation continue d'un rack proposé par **Hausman et al. 1976**. L'algorithme d'optimisation a été exécuté avec une utilisation de rack égale à 90%. Les résultats ont confirmé ceux de **Schwarz et al. 1978** puisque les mêmes hypothèses ont été utilisées. Cette situation représente l'importance des hypothèses dans l'étude des AS/RSs.

**Randhawa et al. 1991** ont utilisé la simulation pour évaluer les configurations de points d'E/S dans un AS/RS à charge unitaire. Ils ont étudié une configuration comprenant une seule allée. Les auteurs proposent trois critères de performance: le débit du système, le temps moyen

d'attente et le temps d'attente maximum. Ils ont supposé que les demandes de stockage sont traitées seulement avec la méthode first in, first out (FIFO) ou la méthode de stockage aléatoire ouvert. Les requêtes de déstockage ont été organisées pour minimiser le cycle, soit en travaillant sur un bloc composé de  $K$  premières demandes par exemple, semblables à l'approche présentée par **Han et al. 1987** soit en maintenant dynamiquement la liste à chaque fois qu'une nouvelle demande de déstockage arrive. Leur modèle de simulation est basé sur le système à événements discrets. Les configurations étudiées supposent une utilisation de rack de 75%.

**Knapp et Wang 1992** ont introduit les réseaux de Pétri comme une nouvelle technique de modélisation des AS/RS. Ils ont supposé que le système étudié était un AS/RS à charge unitaire dans lequel le stockage aléatoire a été appliqué au sein de toutes les classes de produits. Ils ont supposé que la machine S/R travaille en simple cycle. Dans leur étude, ils ont expliqué les principes de réseau de Pétri. Mais en plus, ils ont obtenus quelques résultats sur leur modèle d'AS/RS.

Plus tard, **Chiccholar et Chitty 1996** ont utilisé les réseaux de pétri stochastiques pour étudier l'effet des facteurs de contrôle des AS/RSs sur trois indicateurs de performance: temps pour servir  $M$  demandes, temps de cycle et temps moyen de séjour. Leurs résultats ont montré que ces trois paramètres ont été essentiellement affectés par les règles de planification et le mode de fonctionnement de la machine S/R.

**Taboun et al.1993** ont été parmi les premiers à développer un modèle de simulation à événements discrets qui permet l'étude de plusieurs scénarios de fonctionnement pour un AS/RS. Les auteurs sont principalement intéressés à l'étude de l'impact de la stratégie de stockage et la configuration de la palette sur la performance de l'AS/RS. Le modèle a été implémenté dans SIMAN et a produit le comportement du système réel avec un haut niveau de détail. La validation du modèle a été réalisée en comparant le système modélisé contre un véritable AS/RS à partir d'un centre de distribution local. En expérimentant plusieurs scénarios, les auteurs ont montré que l'utilisation de plus d'une taille de palette peut aider à atteindre un débit élevé et une meilleure utilisation d'espace.

**Eben-Chaïme et Pliskin .1997** ont remis en question le fait que la plupart des études AS/RS se concentrent sur les systèmes à une seule allée. Ces auteurs ont élargi le modèle proposé par **Eben-Chaïme. 1996**, ils ont considéré un système composé de racks simples en profondeur et de machine S/R. Les auteurs ont évalué les modes de fonctionnement de la machine S/R: Simple Cycle (SC), Hybride Cycle (HC) et Double Cycle (DC). Ils ont mentionné

explicitement que le modèle peut gérer les opérations en charge unitaire ou de mini-charge. Leurs résultats indiquent que le mode de HC était une stratégie efficace à adopter pour réduire le nombre de demande de stockage.

**Van den Berg and Gademann .2000** ont présenté une étude de simulation d'un système de stockage/déstockage automatisé et ont examiné un large éventail de politiques de contrôle. Ils ont comparé plusieurs stratégies de stockage. Pour le stockage par classe, ils ont appliqué un algorithme récent pour permettre d'évaluer le compromis entre les exigences d'espace de stockage et le temps de déplacement. Le modèle de **Van den Berg et Gademann. 2000** a permis le séquençage dynamique des demandes de déstockage afin de maintenir un bon niveau de service.

**Meller et Wungwattana. 2005** ont utilisé une simulation pour évaluer les avantages de différents emplacements de point de repos de la machine S/R. Les principales mesures de performance utilisées sont le temps moyen de déstockage dans le système et le taux d'utilisation de la machine S/R. Les auteurs ont supposé que les distances ont été mesurées en unités normalisées. Si la machine S/R reçoit une demande de déstockage lors de son déplacement vers la station de repos, il termine son déplacement avant qu'elle ne traite la demande. Deux commandes ont été formées, avec chaque type de demande traitée selon la règle FIFO. Le modèle a été simulé pour 100 000 unités de temps, en plus d'une période de 5000 unités de temps qui correspond au régime transitoire. Les résultats ont indiqué qu'une utilisation élevée d'AS/RS n'a pas la possibilité de profiter des stratégies du point de repos puisque la machine S/R ne sera pas libre très souvent.

**Fukunari et Malmberg (2008)** ont proposé une méthode innovante pour estimer les temps de déplacement dans un AS/RS à charge unitaire en employant la théorie des files d'attente. Ils ont testé une politique de stockage aléatoire ouvert lorsque l'utilisation du rack était inférieure à 100%. Pour ce cas, le principe de l'accès à n'importe quel endroit équiprobable utilisé dans le stockage aléatoire (**Hausman et al. 1976**) n'était pas satisfait. Effectivement, l'application de la politique de stockage aléatoire ouvert tend à maximiser l'utilisation des emplacements de stockage plus proche de l'E/S. Ils ont supposé que, lorsque le système été utilisé moins de 100%, le stockage aléatoire ouvert donnait un temps de cycle moindre par rapport au stockage aléatoire.

Leur approche a consisté à modéliser les emplacements de stockage comme M/ M/N modèle de file d'attente (**Banks et al. 2000**), où N est le nombre d'emplacements dans l'allée et M/M signifiant que les distributions exponentielles sont utilisées pour modéliser le temps entre deux arrivées et le temps de service respectivement. Les N emplacements ont été classés dans

les casiers les plus proches d'E/S. La distribution d'état de modèle de la file d'attente a été utilisée pour calculer la probabilité que les emplacements individuels soient occupés. Ces probabilités ont, ensuite, été appliquées pour estimer les temps de déplacement de la machine S/R pour effectuer une opération de stockage ou de déstockage avec la politique de stockage aléatoire ouvert. Afin de valider leur approche, ils ont comparé les résultats de leur modèle avec un modèle de simulation avec rack discret et avec le modèle de **Bozer, 2010** qui utilise purement le stockage aléatoire.

**Ekren et al. 2010** se sont intéressés à l'étude des AVS/RS. Au lieu de compter sur les machines S/R automatisées pour effectuer des tâches de stockage et de déstockage, AVS/RS utilisent des véhicules autonomes qui ne disposent généralement que de la capacité de se déplacer horizontalement dans un niveau de l'allée. Les changements dans l'élévation d'un véhicule particulier sont rendus possibles par l'utilisation des ascenseurs en général situés en face de chaque allée. Le principal avantage de cette approche est que le nombre de véhicules autonomes peut être ajusté sur les exigences de débit. Bien que la capacité de débit puisse être ajustée, les ascenseurs peuvent avoir tendance à devenir les nouveaux goulots d'étranglement de ce type de technologie (**Ekren et Heragu 2010**).

**Gagliardi et al. 2012** ont proposé un modèle de simulation orientée objet pour un AS/RS à charge unitaire. Dans ce modèle, les décisions de conception physiques sont séparées des décisions opérationnelles. Ce qui permet, d'une part, d'obtenir une meilleure compréhension des AS/RS dynamique et d'autre part, d'augmenter la flexibilité et la généralité du modèle, permettant ainsi la représentation de nombreux scénarios intéressants.

**Guezzen et al. 2013** a proposé un modèle de simulation pour un AS/RS à rack glissant afin d'évaluer et de comparer les résultats trouvés analytiquement avec ceux trouvés par simulation. Ils ont obtenu un seuil d'erreur entre ces deux approches inférieur à  $< 5\%$ .

**Sari et al. 2014** ont cherché à valider les modèles de temps de simple et double cycle pour les déplacements des ascenseurs et de navettes dans un système automatisé de stockage déstockage avec des navette en utilisant la simulation par ordinateur. Les modèles considérés tiennent compte d'accélération et décélération. Les résultats de simulation sont très proches de ceux obtenus par les modèles analytiques. Cela montre la grande précision de ces modèles pour prévoir les opérations des AS/RS à plusieurs navettes.

### **3.2. Simulation d'un AS/RS multi-allées avec le stockage aléatoire et par classe**

Pour réaliser notre projet de simulation nous avons suivi les étapes citées précédemment dans la section 2.3.3.

### 3.2.1 Objectif de la simulation

Notre objectif est de calculer le temps moyen de simple cycle d'un AS/RS multi-allées avec différentes configurations et avec deux différentes politiques de stockage (le stockage aléatoire et le stockage par classe), puis de comparer les résultats trouvés par simulation avec ceux développés analytiquement dans le chapitre 2.

Pour cela, le *tableau 3.1* résume certains paramètres du modèle.

*Tableau 3.1 Paramètres communs du modèle*

Les Paramètres	Valeur
Le temps de déplacement horizontal d'un casier à casier voisin	10 unités de temps
Le temps de déplacement vertical d'un casier à casier voisin	10 unités de temps
Le temps de déplacement d'une allée à une allée voisine	30 unités de temps
La vitesse de déplacement horizontal, vertical et transversal	constante

En outre, les hypothèses suivantes sont faites pour l'étude de simulation:

- Tous les emplacements de stockage ont la même taille.
- La station d'entrée se trouve dans l'extrémité gauche de l'AS/RS multi-allées.
- La machine S/R peut transporter un seul produit et fonctionner en simple cycle ou peut réaliser une opération de stockage ou de déstockage.
- Le temps de stockage ou de déstockage est ignoré.
- L'accélération et la décélération pendant les cycles ne sont pas considérés.
- Le déplacement de la machine S/R se fait aléatoirement dans un stockage aléatoire.
- Les produits sont classés en fonction de leur propre demande dans trois classes A, B et C dans un stockage par classe ;

### 3.2.2 Modélisation

Nous avons effectué un modèle de simulation pour évaluer et comparer le temps de cycle prévu en cas de stockage/déstockage aléatoire et de stockage/déstockage par classe. Pour cela, un modèle a été construit sur Rockwell software Arena et chaque cas est modélisé dans un modèle autonome. En plus, la génération des systèmes (les différentes configurations) est réalisée d'une manière automatique en utilisant Visual Basic VBA (voir annexe). L'objectif



principal de l'utilisation de Visual Basic étant d'être capable d'adapter facilement ces fonctions pour un vrai AS/RS dans une étude ultérieure.

### 3.2.2.1 Modèle avec stockage aléatoire

Dans ce modèle de simulation, afin de déterminer le temps moyen de simple cycle, nous construisons un AS/RS avec N casiers de stockage. Puis nous créons des entités. Chaque entité est transportée à un casier sélectionné au hasard avec une fonction qui génère un nombre aléatoire entre 0 et 1 multiplié par le nombre de casier N. Le temps de cycle est calculé comme la moyenne des 100 000 observations. La simulation est répétée avec 10 réplifications. L'algorithme suivant est utilisé pour le modèle de simulation d'un AS/RS multi-allées avec un stockage aléatoire:

---

**Algorithme 1:** Simulation du temps moyen de simple cycle avec stockage aléatoire

---

- 1 Attribuer une valeur numérique à N;
  - 2 Déclarer N+1 stations, indexées de 0 à N, la station 0 est la station D/L
  - 3 Déclarer un transporteur (machine S/R)
  - 4 Répéter la simulation k=10 fois (nombre de réplification)
    - 5 faire 100 000 observations
      - 6 Assigner à i une valeur aléatoire
      - 7 Créer une entité Entité(j) dans la station 0
      - 8 Transporter Entité (j) via la machine S/R de la station 0 à la station i et mesurer le déplacement T(j) (T(j)=le déplacement de la station 0 à la station i plus le retour)
    - 9 fin faire ;
  - 10 fin répéter;
  - 11 calculer le temps moyen de simple cycle ;
- 

L'organigramme ci-dessous représente les étapes de l'opération de stockage/déstockage aléatoire dans un système multi-allées. *Figure 3.2*

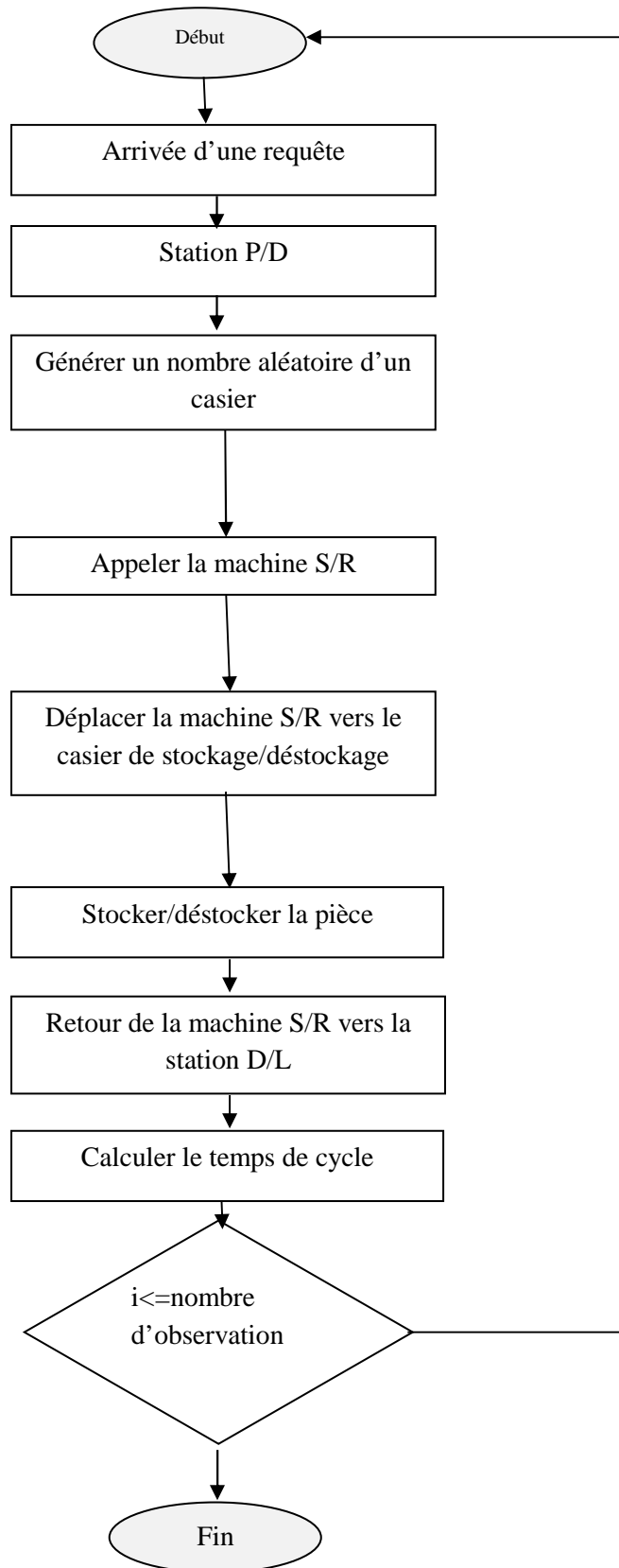


Figure 3.2 Organigramme de stockage/déstockage aléatoire

### 3.2.2.2 Stockage par classe

Dans ce modèle de simulation, on procède différemment. Afin de déterminer le temps moyen de simple cycle, nous construisons un AS/RS avec N casiers de stockage. Puis, nous créons des classes de stockage A, B et C ainsi que des entités suivant une loi de probabilité discrète égale à 0.8, 0.15 et 0.05 respectivement. Le temps de cycle est calculé de la même manière que pour le stockage aléatoire.

---

**Algorithme 2:** Simulation du temps moyen de simple cycle avec stockage par classe

---

- 1 Attribuer une valeur numérique à N
  - 2 Créer des entités suivant une loi de probabilité discrète = (0.8, 0.15, 0.05)
  - 3 Déclarer N+1 station, indexée de 0 à N, la station 0 est la station D/L
  - 4 Diviser les stations en 3 classes A,B,C
  - 5 Déclarer un transporteur (machine S/R)
  - 6                   Assigner à i une valeur aléatoire
  - 7                   Créer une entité Entité(j) dans la station 0
  - 8           Tester le type d'entité (si elle est de la classe A ou Bou C)
  - 9                   Transporter Entité (j) via la machine S/R de la station 0 à une station i qui fait partie de la classe A ou B ou C. Le déplacement T(j) (T(j)=le déplacement de la station 0 à la station i de la classe A ou B ou C plus le retour)
  - 10           fin faire;
  - 11   fin répéter;
  - 12 calculer le temps moyen de simple cycle ;
- 

L'organigramme ci-après *figure3.3* est utilisé pour le modèle de simulation d'un AS/RS multi allées avec un stockage/déstockage par classe :

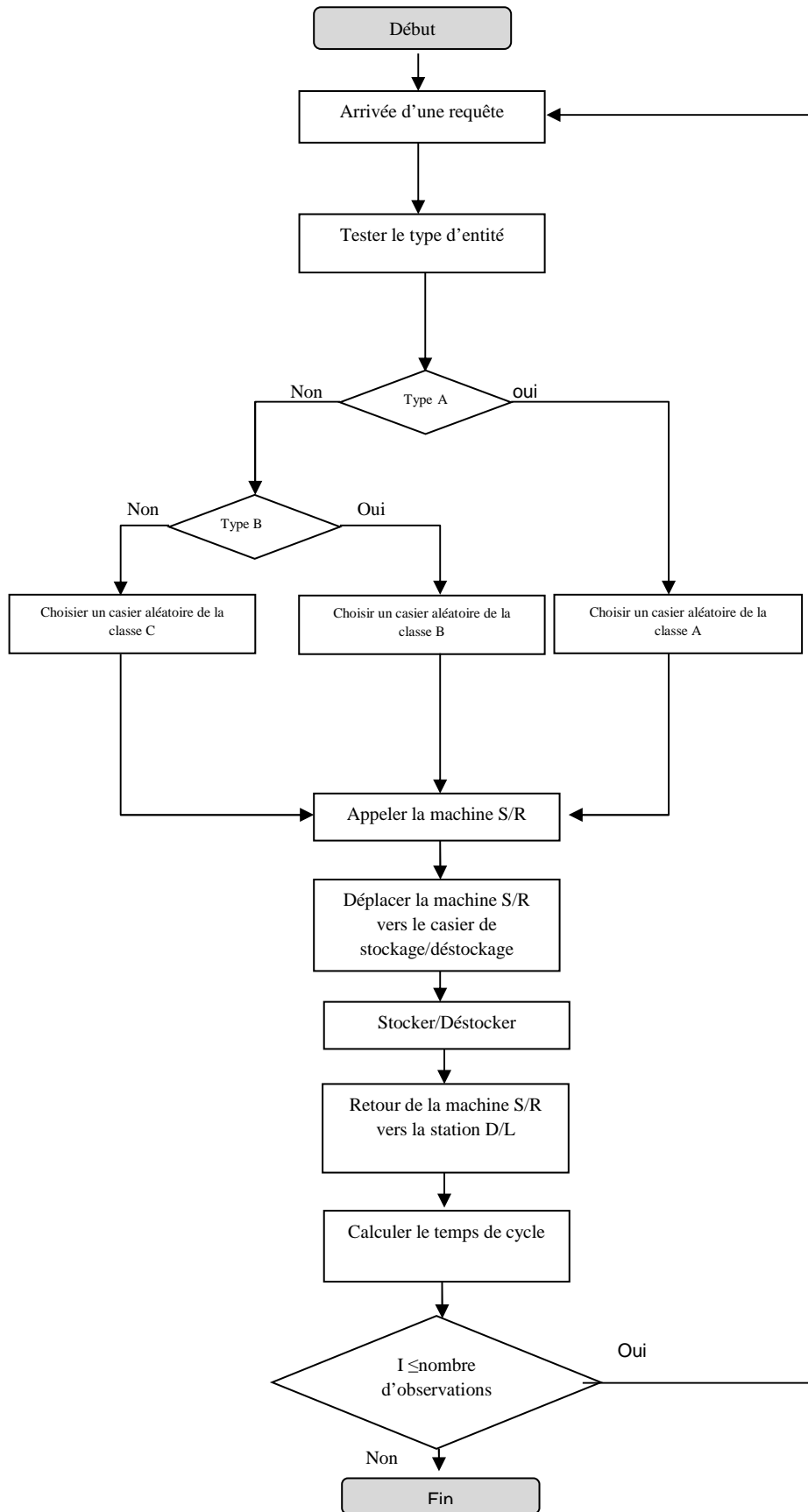


Figure 3.3 Organigramme de stockage/déstockage par classe.

Le modèle généré est prêt à l'emploi. La figure 3.4 montre l'animation graphique générée d'une seule allée d'un AS/RS multi allées, 2 racks contiennent 10 casiers horizontaux et 10 casiers verticaux.

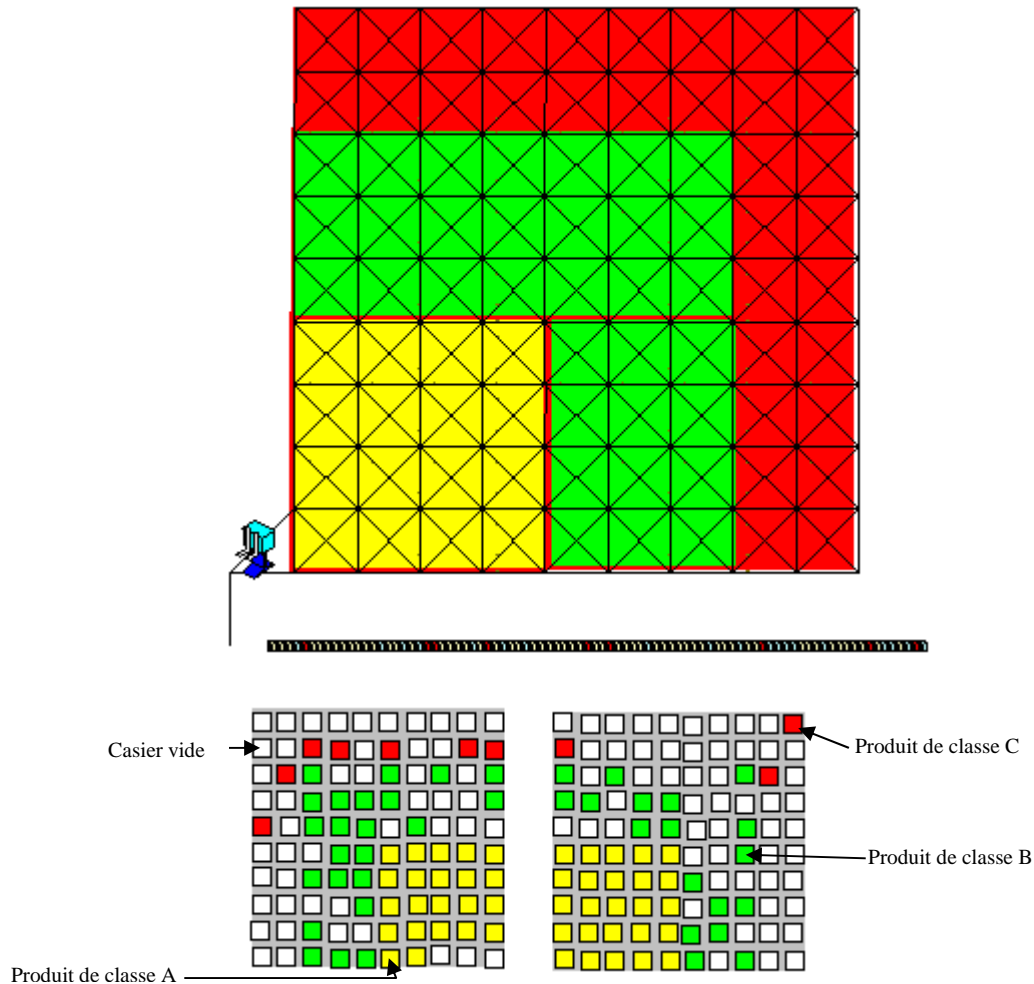


Figure 3.4 Animation d'une seule allée d'un AS/RS multi-allées.

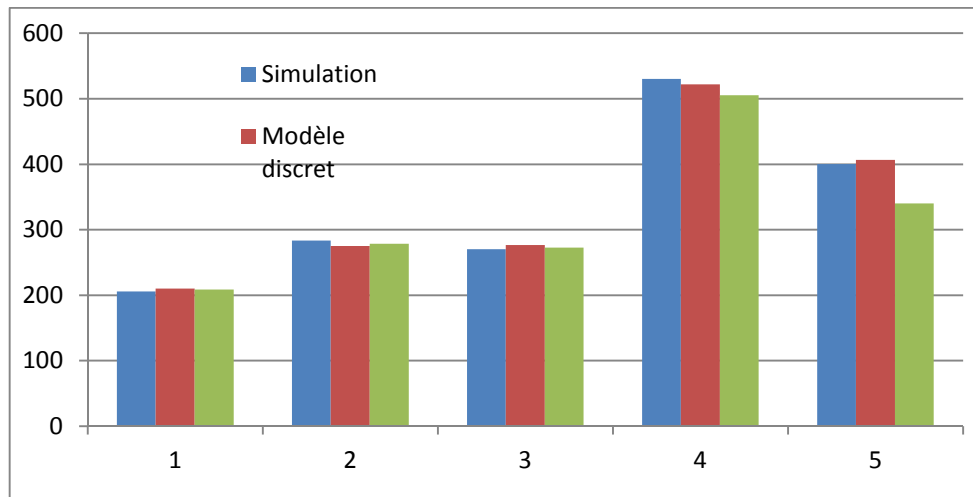
### 3.3. Analyse des résultats

La simulation informatique a été effectuée sur un certain nombre de configurations du système, en tenant compte de tous les paramètres cités dans la **section 3.2.1**. Le *tableau 3.2* présente les résultats analytiques (discret et continu) et de simulation pour deux différentes politiques de stockage (aléatoire et par classe). La ligne 2 du tableau nous fournit le nombre de rack pour chaque configuration. Les lignes 3, 4, 5 et 6 donnent le nombre de casiers totale, horizontaux, verticaux et le nombre de casiers dans chaque classe respectivement. Les lignes 7,8 et 9 fournissent le temps de simple cycle des trois approches (simulation, discrète continue) avec le stockage aléatoire. Les lignes 12,13 et 14 donnent le même temps avec les

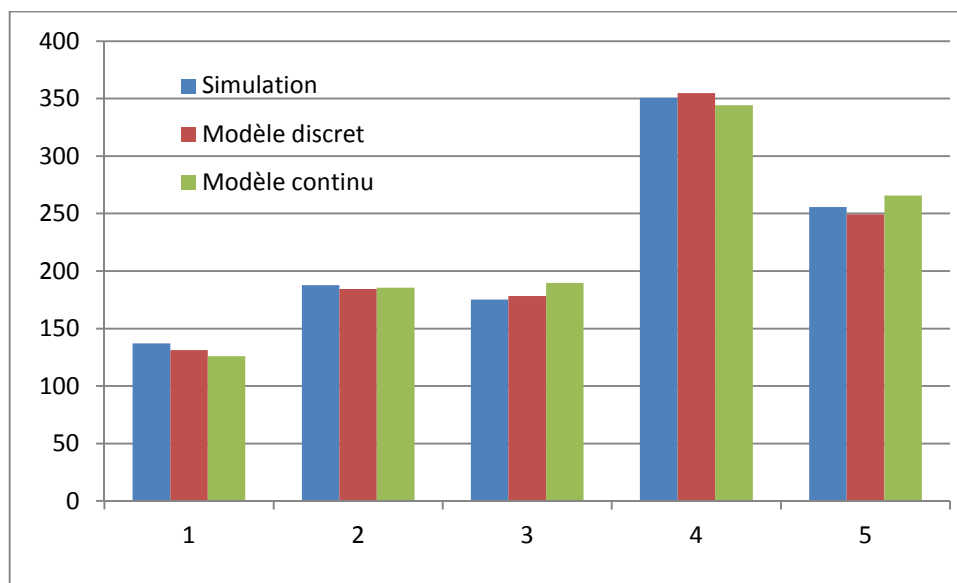
mêmes approches, mais avec un stockage par classe. La ligne 16 présente la différence entre les deux politiques en termes de temps moyen de simple cycle.

**Tableau 3.2** Configurations et résultats de simulation

Configurations	1	3	4	5	6
Nombre de racks M	4	8	10	10	20
Nombre de casiers	800	3200	4000	16000	12500
NL	20	20	20	40	25
NH	10	20	20	40	25
(N <sub>A</sub> , N <sub>B</sub> , N <sub>C</sub> )	(140,250,410)	(440,820,1940)	(352,998,2650)	(2800,4400,8800)	(910,2170,9420)
<b>Résultats du stockage aléatoire</b>					
E(SC) simulation	205.87	283,26	270.36	530.45	400.12
E(SC) Modèle discret(MD)	210.02	275.18	276.44	521.91	406.42
E(SC) Modèle continu(MC)	208.45	278.32	272.61	505.59	340
Erreur (%) (simulation, MD)	1.65	1,80	2.85	1.60	1.57
<b>Résultats du stockage par classe</b>					
E(SCBS) simulation	137.13	187.64	175.19	350.65	255.65
E(SCBS) Modèle discret(MD)	131.38	184.33	178.32	354.78	249.41
E(SCBS) Modèle continu(MC)	125.85	185.6	189.64	344,22	265.68
Erreur (%) (simulation, MD)	4.19	1.76	1.78	1.17	2.44
<b>Différence d'erreur entre le stockage par classe et le stockage aléatoire par simulation (%)</b>					
	33.39	33.75	35.20	33.89	36.10



**Figure 3.5** Comparaison entre la simulation et les résultats analytiques (Stockage aléatoire)



**Figure 3.6** Comparaison entre la simulation et les résultats analytiques (Stockage par classe)

Nous remarquons que malgré la complexité du système étudié, le logiciel ARENA nous a permis de construire et de générer automatiquement un modèle de simulation proche de la réalité. Nous pouvons remarquer à partir de la *figure 3.5* et la *figure 3.6* que l'erreur en pourcentage entre les résultats d'analyse et de simulation est très faible. Cette erreur ne dépasse pas 5%. Nous pouvons donc conclure que la comparaison entre les résultats analytiques fournis par les expressions discrètes et les résultats de simulation montre la bonne conduite des modèles développés. Ces résultats sont d'une grande importance dans le monde industriel.



Figure 3.7 Comparaison entre le stockage par classe et le stockage aléatoire

En plus, nous pouvons remarquer à partir de la *figure 3.7* que le stockage par classe s'avère très efficace par rapport au stockage aléatoire. Cette efficacité apparaît dans la diminution du temps entre les deux politiques. Cette diminution est autour d'une moyenne de 35%.

Donc, on peut dire que le stockage par classe est un critère de performance dans un AS/RS multi-allées.

#### 4. Conclusion

Dans cette étude, nous avons développé des modèles de simulation qui sont utilisés pour valider les temps de déplacement de simple cycle pour un système automatisé de stockage déstockage multi allées. Ces modèles sont développés en tenant compte des méthodes de stockage plus particulièrement le stockage aléatoire et le stockage par classe. Pour valider ces modèles, deux protocoles de simulation sont développés qui n'utilisent pas la même méthodologie de travail. La première appelé simulation par stockage par classe est basé sur la visite d'un nombre de casiers dans une classe .La seconde, appelée simulation par stockage aléatoire est basée sur le choix aléatoire d'un casier parmi les N casiers du système. L'erreur entre la simulation et les modèles analytiques s'avère très faible et ne dépasse pas les 5%.Par contre la différence de temps entre les deux politiques est autour d'une moyenne de 35%. Cela signifie que le stockage par classe est plus performant dans un AS/RS multi-allées en termes de temps moyen de simple cycle.



# Conclusion générale

---

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

Nos travaux sont synthétisés et présentés par les points suivants :

- L'état de l'art sur les systèmes automatisés de stockage/déstockage.
- Le développement d'une méthodologie de calcul pour trouver le temps moyen de simple cycle de chaque classe d'un AS/RS multi allées.
- Le développement d'un outil de simulation sous le logiciel SIMAN Arena de Rockwell software afin de générer et de simuler n'importe quelle configuration souhaitée avec n'importe quelle dimension des classes.
- La validation et l'interprétation des résultats.

Dans le chapitre 1, nous avons résumé des travaux établis par différents chercheurs sur les systèmes AS/RS afin d'améliorer leurs performances. Nous avons, ensuite, abordé un état de l'art détaillé de différentes recherches sur le stockage par classes pour les différents systèmes de stockage.

Le deuxième chapitre représente le cœur de notre travail. Il est constitué de deux parties. La première partie a fait l'objet d'une approche discrète : nous avons commencé par modéliser les temps moyens de stockage ou de déstockage d'un système automatisé de stockage/déstockage multi allées en utilisant le stockage par classe. Donc, nous avons développé un modèle mathématique basé sur des équations pour chaque classe (A, B,C) que nous avons multiplié par leurs taux de rotation des produits.

L'exploitation de cette expression discrète dans d'autres domaines de recherche est très difficile. La sommation multiple existant dans l'expression accroît la complexité de calcul et rend la résolution analytique très difficile.

Ces difficultés et complexités de calcul analytique nous ont conduits à envisager une approche continue. Cette approche analytique est basée sur une approximation continue des différentes distributions discrètes exactes modélisant les déplacements : horizontal et vertical de la machine S/R.

Enfin, nous avons développé un générateur de modèle de simulation sous le logiciel SIMAN Arena de Rockwell software. Cette partie nous a permis d'implémenter et de présenter l'AS/RS multi-allées à trois classes qui utilise pour calculer le temps moyen de stockage ou de déstockage. Cette partie nous a permis de valider les expressions mathématiques discrète et continue et de comparer les résultats obtenus avec le stockage aléatoire.

Les résultats obtenus indiquent que l'erreur entre la simulation et les modèles analytiques s'avère très faible et ne dépasse pas les 5%. Par contre la différence de temps entre les deux politiques est autour de 35%. Cela signifie que le stockage par classe est plus performant dans un AS/RS multi-allées en termes de temps moyen de simple cycle.

Comme perspectives, nous essayerons de développer les modèles analytiques discrets et continus du temps de double cycle pour l'AS/RS multi-allées avec le stockage par classe, sur  $n$  classes, déterminant du nombre de classes optimales fait partie aussi de nos perspectives.

# Annexe

---

```
Dim m As Arena.Model
Dim g_siman As Arena.SIMAN
Dim g_module As Long
Dim Module_poste1 As Arena.Module
Dim Module_poste2 As Arena.Module
Dim Intersec(0 To 200, 0 To 200, 0 To 200) As intersection
Dim Intersecf(0 To 200, 0 To 200) As intersection
Dim Lien As NetworkLink
Dim donnee As Long
Dim texte As String
Dim texte1 As String
Dim texte2 As String
Dim index As Long
Dim Ordre As Long
Dim Nbligne As Integer
Dim Nbcolonne As Integer
Dim Nballee As Integer
Dim Debutcolonne As Integer
Dim DistanceColonne As Integer
Dim DistanceLigne As Integer
Dim DistanceTP As Integer
Dim Debutligne As Integer
Dim NumeroLien As Integer
Dim NumeroInt As Integer

Private Sub ModelLogic_DocumentOpen()
Set m = ThisDocument.Model
Set g_siman = m.SIMAN
UserForm1.Show
Nbligne = Val(UserForm1.TextBox2)
Nbcolonne = Val(UserForm1.TextBox1)
Nballee = Val(UserForm1.TextBox7)
DistanceColonne = UserForm1.TextBox6
DistanceTP = UserForm1.TextBox8
DistanceLigne = UserForm1.TextBox5
NumeroInt = 0
'
'Création des intersections
'
Set Module_poste1 = m.Modules.Create("ELEMENTS", "INTERSECTIONS", 4000, 250)
For l = 1 To Nballee
For K = 1 To Nbcolonne
For I = 1 To Nbligne
NumeroInt = NumeroInt + 1
Module_poste1.Data("IntName(" + Str(NumeroInt) + ")") = "Int_" + Str(l) + "_" + Str(K) + "_" + Str(I) + ""
Module_poste1.Data("Number(" & NumeroInt & ")") = NumeroInt
Set Intersec(l, K, I) = m.Intersections.Create(5000 + K * 10 * DistanceColonne + (l - 1) * 10 * Nbcolonne *
DistanceColonne, 100 - I * 10 * DistanceLigne)
Intersec(l, K, I).Identifieur = "Int_" + Str(l) + "_" + Str(K) + "_" + Str(I)
Next I
Next K
Next l
'
```

```

'Création des intersections façade
'
-----

For l = 1 To Nballee
K = 1
For I = 1 To Nbligne
NumeroInt = NumeroInt + 1
Module_poste1.Data("IntName(" + Str(NumeroInt) + ")") = "Intf_" + Str(l) + "_" + Str(I) + ""
Module_poste1.Data("Number(" & NumeroInt & ")") = NumeroInt
Set Intersecf(l, I) = m.Intersections.Create(6000 + K * 10 * DistanceColonne + (l - 1) * 10 * Nbcolonne *
DistanceColonne, 3000 - I * 10 * DistanceLigne)
Intersecf(l, I).Identifieur = "Intf_" + Str(l) + "_" + Str(I)
Next I
Next l
'-----Intersection déposé livraison-----
Set Intersecf(0, 0) = m.Intersections.Create(5000 + 1 * 10 * DistanceColonne, 3000 - 1 * 10 *
DistanceLigne)
NumeroInt = NumeroInt + 1
Module_poste1.Data("IntName(" + Str(NumeroInt) + ")") = "Intf_D_L"
Module_poste1.Data("Number(" & NumeroInt & ")") = NumeroInt
Intersecf(0, 0).Identifieur = "Intf_D_L"
'-----
Module_poste1.UpdateShapes
'
' Model.TransporterPictures.Create 5000 + 1 * 10 * DistanceColonne, 3000 - 1 * 10 * DistanceLigne
'
-----

'Création des liens
'
-----

Set Module_poste1 = m.Modules.Create("ELEMENTS", "LINKS", 3000, 250)
Set Module_poste2 = m.Modules.Create("ELEMENTS", "NETWORKS", 2000, 250)
Module_poste2.Data("NetworkName(1)") = "Circuit"
NumeroLien = 0

'=====
'
-----

'Liens verticaux
'
-----

For l = 1 To Nballee
For K = 1 To Nbcolonne
For I = 1 To Nbligne - 1
NumeroLien = NumeroLien + 1
Module_poste1.Data("LinkName(" + Str(NumeroLien) + ")") = "L_Int_" + Str(l) + "_" + Str(K) + "_" +
Str(I) + "_Int_" + Str(l) + "_" + Str(K) + "_" + Str(I + 1) + ""

Module_poste1.Data("Number(" & NumeroLien & ")") = NumeroLien
Module_poste1.Data("BegIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Int_" + Str(l) + "_" + Str(K) + "_" + Str(I) +
""
Module_poste1.Data("EndIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Int_" + Str(l) + "_" + Str(K) + "_" + Str(I +
1) + ""
Module_poste1.Data("Zones(" + Str(NumeroLien) + ")") = "1"
Module_poste1.Data("Length(" + Str(NumeroLien) + ")") = DistanceLigne
Module_poste1.Data("Type(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Bidirectional"
Set Lien = m.NetworkLinks.Create(Intersec(l, K, I), Intersec(l, K, I + 1), 1, 0)
Lien.Identifieur = "Circuit"
Module_poste1.UpdateShapes
Next I
Next K
Next l
'
-----

```

```

'Liens horizontaux
'
For l = 1 To Nballee
For I = 1 To Nbligne
For K = 1 To Nbcolonne - 1
NumeroLien = NumeroLien + 1

Module_poste1.Data("LinkName(" + Str(NumeroLien) + ")") = "L_Int_" + Str(l) + "_" + Str(K) + "_" +
Str(I) + "_Int_" + Str(l) + "_" + Str(K + 1) + "_" + Str(I) + ""
Module_poste1.Data("Number(" & NumeroLien & ")") = NumeroLien
Module_poste1.Data("BegIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Int_" + Str(l) + "_" + Str(K) + "_" + Str(I) +
""
Module_poste1.Data("EndIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Int_" + Str(l) + "_" + Str(K + 1) + "_" +
Str(I) + ""
Module_poste1.Data("Zones(" + Str(NumeroLien) + ")") = "1"
Module_poste1.Data("Length(" + Str(NumeroLien) + ")") = DistanceColonne
Module_poste1.Data("Type(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Bidirectional"
Set Lien = m.NetworkLinks.Create(Intersec(l, K, I), Intersec(l, K + 1, I), 1, 0)
Lien.Identifieur = "Circuit"
Module_poste1.UpdateShapes
Next K
Next I
Next l
'
'Liens obliques vers bas
'
For l = 1 To Nballee
For I = 1 To Nbligne - 1
For K = 1 To Nbcolonne - 1
NumeroLien = NumeroLien + 1
Module_poste1.Data("LinkName(" + Str(NumeroLien) + ")") = "L_Int_" + Str(l) + "_" + Str(K) + "_" +
Str(I) + "_Int_" + Str(l) + "_" + Str(K + 1) + "_" + Str(I + 1) + ""
Module_poste1.Data("Number(" & NumeroLien & ")") = NumeroLien
Module_poste1.Data("BegIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Int_" + Str(l) + "_" + Str(K) + "_" + Str(I) +
""
Module_poste1.Data("EndIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Int_" + Str(l) + "_" + Str(K + 1) + "_" +
Str(I + 1) + ""
Module_poste1.Data("Zones(" + Str(NumeroLien) + ")") = "1"
Module_poste1.Data("Length(" + Str(NumeroLien) + ")") = DistanceLigne
'Int(Sqr((DistanceColonne * DistanceColonne) + (DistanceLigne * DistanceLigne)) / 2)

Module_poste1.Data("Type(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Bidirectional"
Set Lien = m.NetworkLinks.Create(Intersec(l, K, I), Intersec(l, K + 1, I + 1), 1, 0)
Lien.Identifieur = "Circuit"
Module_poste1.UpdateShapes
Next K
Next I
Next l
For l = 1 To Nballee
For I = 2 To Nbligne
For K = 1 To Nbcolonne - 1
NumeroLien = NumeroLien + 1
Module_poste1.Data("LinkName(" + Str(NumeroLien) + ")") = "L_Int_" + Str(l) + "_" + Str(K + 1) + "_" +
Str(I - 1) + "_Int_" + Str(l) + "_" + Str(K) + "_" + Str(I) + ""
Module_poste1.Data("Number(" & NumeroLien & ")") = NumeroLien
Module_poste1.Data("BegIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Int_" + Str(l) + "_" + Str(K) + "_" + Str(I) +
""
Module_poste1.Data("EndIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Int_" + Str(l) + "_" + Str(K + 1) + "_" +
Str(I - 1) + ""

```

```

Module_poste1.Data("Zones(" + Str(NumeroLien) + ")") = "1"
Module_poste1.Data("Length(" + Str(NumeroLien) + ")") = DistanceLigne
Int(Sqr((DistanceColonne * DistanceColonne) + (DistanceLigne * DistanceLigne)) / 2)
Module_poste1.Data("Type(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Bidirectional"
Set Lien = m.NetworkLinks.Create(Intersec(l, K, I), Intersec(l, K + 1, I - 1), 1, 0)
Lien.Identifiant = "Circuit"
Next K
Next I
Next l
Module_poste2.UpdateShapes
'
'Création des liens facade
'
'
'Liens verticaux
'

For l = 1 To Nballee
For I = 1 To Nbligne - 1
NumeroLien = NumeroLien + 1
Module_poste1.Data("LinkName(" + Str(NumeroLien) + ")") = "L_Intf_" + Str(l) + "_" + Str(I) + "_Intf_" +
Str(l) + "_" + Str(I + 1) + ""
Module_poste1.Data("Number(" & NumeroLien & ")") = NumeroLien
Module_poste1.Data("BegIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Intf_" + Str(l) + "_" + Str(I) + ""
Module_poste1.Data("EndIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Intf_" + Str(l) + "_" + Str(I + 1) + ""
Module_poste1.Data("Zones(" + Str(NumeroLien) + ")") = "1"
Module_poste1.Data("Length(" + Str(NumeroLien) + ")") = DistanceLigne
Module_poste1.Data("Type(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Bidirectional"
Set Lien = m.NetworkLinks.Create(Intersecf(l, I), Intersecf(l, I + 1), 1, 0)
Lien.Identifiant = "Circuit"
Module_poste1.UpdateShapes
Next I
Next l
'
'Liens Horizontal pour Circuit _ façade ( liens entre le facade et la premiere colonne)
'
For l = 1 To Nballee
K = 1
For I = 1 To Nbligne
NumeroLien = NumeroLien + 1
Module_poste1.Data("LinkName(" + Str(NumeroLien) + ")") = "L_Intf_" + Str(l) + "_" + Str(I) + "_Int_" +
Str(l) + "_" + Str(I) + "_" + Str(I) + ""
Module_poste1.Data("Number(" & NumeroLien & ")") = NumeroLien
Module_poste1.Data("BegIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Intf_" + Str(l) + "_" + Str(I) + ""
Module_poste1.Data("EndIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Int_" + Str(l) + "_" + Str(I) + "_" + Str(I) +
""
'
Module_poste1.Data("Zones(" + Str(NumeroLien) + ")") = "1"
Module_poste1.Data("Length(" + Str(NumeroLien) + ")") = DistanceLigne
Module_poste1.Data("Type(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Bidirectional"
Set Lien = m.NetworkLinks.Create(Intersecf(l, I), Intersec(l, I, I), 1, 0)
Lien.Identifiant = "Circuit"
Next I
Next l
Module_poste1.UpdateShapes
'
'Liens obliques vers bas
'
For l = 1 To Nballee

```

```

K = 1
For I = 1 To Nbligne - 1
  NumeroLien = NumeroLien + 1
  Module_poste1.Data("LinkName(" + Str(NumeroLien) + ")") = "L_Intf_" + Str(I) + "_" + Str(I + 1) +
  "_Int_" + Str(I) + "_" + Str(I) + "_" + Str(I) + ""
  Module_poste1.Data("Number(" & NumeroLien & ")") = NumeroLien
  Module_poste1.Data("BegIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Intf_" + Str(I) + "_" + Str(I + 1) + ""
  Module_poste1.Data("EndIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Int_" + Str(I) + "_" + Str(I) + "_" + Str(I) +
  ""
  Module_poste1.Data("Zones(" + Str(NumeroLien) + ")") = "1"
  Module_poste1.Data("Length(" + Str(NumeroLien) + ")") = DistanceColonne
  Module_poste1.Data("Type(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Bidirectional"
  Set Lien = m.NetworkLinks.Create(Intersecf(I, I + 1), Intersec(I, I, I, 1, 0))
  Lien.Identifier = "Circuit"
Next I
Next I
Module_poste1.UpdateShapes
'
'-----
'Liens obliques vers le haut
'-----

For l = 1 To Nballee
  K = 1
  For I = 1 To Nbligne - 1
    NumeroLien = NumeroLien + 1
    Module_poste1.Data("LinkName(" + Str(NumeroLien) + ")") = "L_Intf_" + Str(I) + "_" + Str(I) + "_Int_" +
    Str(I) + "_" + Str(I) + "_" + Str(I + 1) + ""
    Module_poste1.Data("Number(" & NumeroLien & ")") = NumeroLien
    Module_poste1.Data("BegIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Intf_" + Str(I) + "_" + Str(I) + ""
    Module_poste1.Data("EndIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Int_" + Str(I) + "_" + Str(I) + "_" + Str(I +
    1) + ""
    Module_poste1.Data("Zones(" + Str(NumeroLien) + ")") = "1"
    Module_poste1.Data("Length(" + Str(NumeroLien) + ")") = DistanceColonne
    Module_poste1.Data("Type(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Bidirectional"
    Set Lien = m.NetworkLinks.Create(Intersecf(I, I), Intersec(I, I, I + 1, 1, 0))
    Lien.Identifier = "Circuit"
  Next I
Next I
Module_poste1.UpdateShapes
'
'-----
'Liens Horizontal pour Circuit _ façade
'-----

For l = 1 To Nballee - 1
  K = 1
  For I = 1 To Nbligne
    NumeroLien = NumeroLien + 1

    Module_poste1.Data("LinkName(" + Str(NumeroLien) + ")") = "L_Intf_" + Str(I) + "_" + Str(I) + "_Intf_" +
    Str(I + 1) + "_" + Str(I) + ""
    Module_poste1.Data("Number(" & NumeroLien & ")") = NumeroLien
    Module_poste1.Data("BegIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Intf_" + Str(I) + "_" + Str(I) + ""
    Module_poste1.Data("EndIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Intf_" + Str(I + 1) + "_" + Str(I) + ""
    Module_poste1.Data("Zones(" + Str(NumeroLien) + ")") = "1"
    Module_poste1.Data("Length(" + Str(NumeroLien) + ")") = DistanceLigne
    Module_poste1.Data("Type(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Bidirectional"
    Set Lien = m.NetworkLinks.Create(Intersecf(I, I), Intersecf(I + 1, I, I, 1, 0))
    Lien.Identifier = "Circuit"
    Module_poste1.UpdateShapes
  Next I

```

```

Next I
'
'-----
'Liens obliques vers bas
'-----

For l = 1 To Nballee - 1
K = 1
For I = 1 To Nbligne - 1
NumeroLien = NumeroLien + 1
Module_poste1.Data("LinkName(" + Str(NumeroLien) + ")") = "L_Intf_" + Str(l) + "_" + Str(I + 1) +
" _Intf_" + Str(l + 1) + "_" + Str(I) + ""
Module_poste1.Data("Number(" & NumeroLien & ")") = NumeroLien
Module_poste1.Data("BegIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Intf_" + Str(l) + "_" + Str(I + 1) + ""
Module_poste1.Data("EndIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Intf_" + Str(l + 1) + "_" + Str(I) + ""
Module_poste1.Data("Zones(" + Str(NumeroLien) + ")") = "1"
Module_poste1.Data("Length(" + Str(NumeroLien) + ")") = DistanceLigne
Module_poste1.Data("Type(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Bidirectional"
Set Lien = m.NetworkLinks.Create(Intersecf(l, I + 1), Intersecf(l + 1, I), 1, 0)
Lien.Identifiant = "Circuit"
Module_poste1.UpdateShapes
Next I
Next l

'
'-----
'Liens obliques vers le haut
'-----

For l = 1 To Nballee - 1
K = 1
For I = 1 To Nbligne - 1
NumeroLien = NumeroLien + 1
Module_poste1.Data("LinkName(" + Str(NumeroLien) + ")") = "L_Intf_" + Str(l) + "_" + Str(I) + " _Intf_" +
Str(l + 1) + "_" + Str(I + 1) + ""
Module_poste1.Data("Number(" & NumeroLien & ")") = NumeroLien
Module_poste1.Data("BegIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Intf_" + Str(l) + "_" + Str(I) + ""
Module_poste1.Data("EndIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Intf_" + Str(l + 1) + "_" + Str(I + 1) + ""
Module_poste1.Data("Zones(" + Str(NumeroLien) + ")") = "1"
Module_poste1.Data("Length(" + Str(NumeroLien) + ")") = DistanceLigne
Module_poste1.Data("Type(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Bidirectional"
Set Lien = m.NetworkLinks.Create(Intersecf(l, I), Intersecf(l + 1, I + 1), 1, 0)
Lien.Identifiant = "Circuit"
Module_poste1.UpdateShapes
Next I
Next l

'=====stationdepos/livresont=====
NumeroLien = NumeroLien + 1
Module_poste1.Data("LinkName(" + Str(NumeroLien) + ")") = "L_Intf_D_L_Intf_1_1"
Module_poste1.Data("Number(" & NumeroLien & ")") = NumeroLien
Module_poste1.Data("BegIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Intf_D_L"
Module_poste1.Data("EndIntxID(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Intf_1_1"
Module_poste1.Data("Zones(" + Str(NumeroLien) + ")") = "1"
Module_poste1.Data("Length(" + Str(NumeroLien) + ")") = DistanceLigne
Module_poste1.Data("Type(" + Str(NumeroLien) + ")") = "Bidirectional"
Set Lien = m.NetworkLinks.Create(Intersecf(0, 0), Intersecf(1, 1), 1, 0)
Lien.Identifiant = "Circuit"

Module_poste1.UpdateShapes
'=====Modè
le=====
'=====
Dim createmod As Module

```



```

Dim procmod As Module
Dim disposmod As Module
Dim Stationsmod As Module
Dim Stationmod As Module
Dim assignmod As Module
Dim Requestmod As Module
Dim Transportmod As Module
Dim Transportsmodule As Module
Dim Freemod As Module
Dim Numerostation As Integer
'=====STATION CASIERS=====
Set Stationsmod = m.Modules.Create("Elements", "Stations", -5160, 500)
Numerostation = 0
For l = 1 To Nballee
For I = 1 To Nbligne
For K = 1 To Nbcolonne
Numerostation = Numerostation + 1
Stationsmod.Data("StationName(" & CStr(Numerostation) & ")") = "Station_" + CStr(Numerostation)
Stationsmod.Data("IntxID(" & CStr(Numerostation) & ")") = "Int_" + Str(l) + "_" + Str(K) + "_" + Str(I) + ""
Stationsmod.Data("Number(" & Numerostation & ")") = Numerostation
Stationsmod.Data("Report Statistics") = Hidden
Next K
Next I
Next l
'-----
For n = 1 To Numerostation
Transportmod.Data("EntDest") = "Station_" + CStr(n)
Next n
'-----
Numerostation = Numerostation + 1
Stationsmod.Data("StationName(" & CStr(Numerostation) & ")") = "Station_DL"
Stationsmod.Data("IntxID(" & CStr(Numerostation) & ")") = "Intf_D_L"
Stationsmod.Data("Number(" & Numerostation & ")") = Numerostation
Dim MyMod As Module
index = m.Modules.Find(smFindTag, "Station.2")
Set Stationmod = m.Modules.Item(index)
Stationmod.Data("EndStaID") = "Station_" + CStr(Numerostation - 1)
index = m.Modules.Find(smFindTag, "Assign.1")
Set MyMod = m.Modules.Item(index)
MyMod.Data("Value") = "anint(ra *" + CStr(Numerostation - 2) + " + 1)"
MsgBox "done."
'=====FREE=====
Set Freemod = m.Modules.Create("Blocks", "Free", -4160, 200)
'-----DISPOSE-----
Set disposmod = m.Modules.Create("Blocks", "Dispose", -3000, 200)
'=====
Stationsmod.UpdateShapes
End Sub
Private Sub VBA_Block_1_Fire()
End Sub
Private Sub VBA_Block_2_Fire()
Dim m As Arena.Model
Dim S As Arena.SIMAN
Set m = ThisDocument.Model
Set S = m.SIMAN
End Sub
Private Sub VBA_Block_3_Fire()
Dim g_model As Arena.Model
Dim g_siman As Arena.SIMAN
Dim NumEntite As Long

```

# Références Bibliographiques

---

- Ashayeri et al. 1985** Ashayeri J, Gelders L, Van Wassenhove L 1985 «A microcomputer-based optimization model for the design of automated warehouses» *International Journal of Production Research* 23(4):825–839.
- Ashayeri et al. 2002** Ashayeri, J., Heuts, R.M., Valkenburg, M.W.T., Veraart, H.C., and Wilhelm, M.R. 2002 «A geometrical approach to computing expected cycle times for zone-based storage layouts in AS/RS» *International Journal of Production Research* 40(17), 4467-4483.
- Askin 1993** Askin, R. G. and C. R. Standridge, 1993 «Modelling and Analysis of Manufacturing Systems» John Wiley & Sons, Ed.
- Azadivar 1984** Azadivar, F. 1984«A simulation–optimization approach to optimum storage and retrieval policies in an automated warehousing system», In *Proceedings of the 1984 winter simulation conference*.
- Azzouz et al. 2001a** Azzouz A., Sari Z., Ghouali N. 2001, «La méthode Branch and Bound appliquée à l’optimisation des dimensions d’un AS/RS à convoyeur gravitationnel», *Conférence internationale sur la productique*.
- Azzouz et al. 2001b** Azzouz A. 2001, «Optimisation des dimensions d’un AS/RS à convoyeur gravitationnel pour un temps de cycle minimum», *Thèse de magister*, Université de Tlemcen Algérie.
- Azzouz et al. 2001c** Azzouz A., Sari Z., Ghouali N. 2001, «Une synthèse sur l’optimisation des dimensions d’un AS/RS à convoyeur gravitationnel », *Conférence internationale sur la conception et la production intégrée*, Fès, 24-26 octobre 2001.
- Bafna et al. 1972** Bafna, K.M., Reed Jr., R., 1972. «An analytical approach to design of high-rise stacker crane warehouse systems». *Journal of Industrial Engineering* 8, 8-14.
- Banks 1999** Banks. J 1999 «Introduction to Simulation» In *Winter Simulation Conference*, P. Farrington, H. Nembhard, D. Sturrock et G. Evans (Ed.), pp. 7-13.
- Bessenouci et al. 2010** Bessenouci, H.N., Sari, Z., Ghomri, L. 2010. «Metaheuristic based control of a flow-rack automated storage retrieval system». *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23 (4), 1157-1166.
- Bozer et al. 1984** Bozer, Y.A., and White, J.A. 1984 «Travel-time models for automated storage/retrieval systems», *IIE Transactions* 16(4), 329-338.
- Bozer et al. 1990** Bozer, Y.A., Schorn, E.C., and Sharp, G.P. 1990 «Geometric approaches to solve the chebyshev traveling salesman problem» *IIE Transactions* 22(3), 238-254.

- Bozer et al. 1996** Bozer YA, White JA 1996 «A generalized design and performance analysis model for endof- aisle order-picking systems» *IIE Trans* 28(4):271–280.
- Cardin et al. 2012** Cardin,O., Pierre, C.,Sari,Z., Meghelli, N. 2012 «Performance evaluation of In-Deep Class Storage for Flow-Rack AS/RS». *International Journal of Production Research*, pp.6775-6791.
- Caron 2000** Caron, F., Marchet, G., and Perego, A. 2000 «Layout design in manual picking system: a simulation approach» *Integrated Manufacturing Systems* 11(2), 94-104.
- Caron 2000** Caron, F., Marchet, G., and Perego, A. 2000 «Optimal layout in low-level picker-to-part systems», *International Journal of Production Research* 38(1), 101-117.
- Caron et al.1998** Caron, F., Marchet, G., and Perego, A. 1998 «Routing policies and COI-based storage policies in picker-to-part systems» *International Journal of Production Research* 36(3), 713- 732.
- Caux 1993** Caux, C. 1993 « Analyse et spécification de systèmes de production pour l'évaluation des performances et la recherche d'ordonnancement» Thèse de doctorat de l'université de Clermont Ferrand.
- Chang et al. 1995** Chang, D.T., Wen, U.P., and Lin, J.T. 1995 «The impact of acceleration/deceleration on travel-time models for automated storage/retrieval systems» *IIE Transactions* 27(1), 108-111.
- Chang et Egbelu 1997a** Chang, S.H., and Egbelu, P.J. 1997 «Relative pre-positioning of storage/retrieval machines in automated storage/retrieval systems to minimize maximum system response time» *IIE Transactions* 29(4), 303-312.
- Chang et Egbelu 1997b** Chang, S.H., and Egbelu, P.J. 1997 «Relative pre-positioning of storage/retrieval machines in automated storage/retrieval systems to minimize expected system response time», *IIE Transactions* 29(4), 313-322.
- Chang et Wen 1997** Chang, D.T., and Wen, U.P. 1997 «The impact on rack configuration on the speed profile of the storage and retrieval machine» *IIE Transactions* 29, 525-531.
- Chen et al. 2003** Chen, Z.L., and Lee, C.Y. 2003 «Scheduling of depalletizing and truck loading operations in a food distribution system» *Naval Research Logistics* 50(3), 239-256.
- Chew et al. 1999** Chew, E.P., and Tang, L.C. 1999 «Travel time analysis for general item location assignment in a rectangular warehouse» *European Journal of Operational Research* 112, 582-597.
- De Koster et al. 2006** De Koster MBM, Le-Duc T, Yugang Y. 2006 «Optimal storage rack design for a 3-dimensional compact AS/RS» *Int J Prod Res* 46(6):1495–1514.
- De Koster et al. 2007** De Koster MBM, Le-Duc T, Roodbergen KJ 2007 «Design and control of warehouse order picking: a literature review» *Eur J Oper Res* 182(2):481–501.
- Egbelu 1991** Egbelu, P.J. 1991 «Framework for dynamic positioning of storage/retrieval machines in an automated storage/retrieval system» *International Journal of Production Research* 29(1), 17-37.

- EgbeluetWu(1993)** Egbelu, P.J., and Wu, C.-T. 1993 «A comparison of dwell point rules in an automated storage/retrieval system» *International Journal of Production Research* 31(11), 2515-2530.
- Eldemir et al. 2004** Eldemir F., R. J. Graves and C. J. Malmborg, 2004 «New cycle time and space estimation models for automated storage and retrieval system conceptualization» *International Journal of Production Research*, 42 (22), pp. 4767-4783.
- Eynan 1994** Eynan, A., and Rosenblatt, M.J. 1994 «Establishing zones in single-command class-based rectangular AS/RS» *IIE Transactions* 26(1), 38-46.
- Foley et Frazelle 1991** Foley, R.D., and Frazelle, E.H. 1991 «Analytical results for mini-load throughput and the distribution of dual command travel time» *IIE Transactions* 23(3), 273-281.
- Frazelle 2002** Frazelle, E.2002 «Supply Chain Strategy: The Logistics of Supply Chain Management». McGraw-Hill, New York.
- Gaouar et al. 2005** Gaouar N., Sari, Z., Ghouali, N. 2005 «Développement d'une Heuristique de Stockage/Déstockage pour un Système AS/RS à Convoyeur Gravitationnel». 6<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel, (GI'2005), 7-10 Juin 2005, Besançon Micropolis, France
- Gaouar et al. 2006** Gaouar, N., Sari,Z., Ghouali,N. 2006« Modélisation et implémentation d'une Heuristique de Stockage/Déstockage pour un Système AS/RS à Convoyeur Gravitationnel». 6<sup>ème</sup> Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'06), 3-5 avril 2006, Rabat, Maroc.
- George 1998** George DRAGHICI, Nicolae BRINZEI, Ioana FILIPAS 1998 «La modélisation et la simulation en vue de la conduite des systèmes de production»
- Georges Habchi 2001** Georges Habchi 2001 «conceptualisation et modélisation pour la simulation des systèmes de production» Document de Synthèse, Université De Savoie
- Ghomri et al. 2008** Ghomri L., Sari Z., Guezzen A.H., Sari T. 2008 «Modèle analytique du temps de simple cycle d'un AS/RS multi allées» conférence internationale de modélisation et simulation, Paris.
- Ghomri et al. 2009** Ghomri L., Sari Z., Guezzen A.H., Sari T. 2008 «Continuous models for single and dual cycle times of a multi aisle automated storage and retrieval system» *Conference Information Control Problems in Manufacturing*,
- Goetschalckx et Ratliff (1990)** Goetschalckx, M., and Ratli., H.D. 1990 «Shared storage policies based on the duration stay of unit loads» *Management Science* 36(9), 1120-1132.
- Graves et al. 1977** Graves, S.C., Hausman, W.H., and Schwarz, L.B. 1977 «Storage-retrieval interleaving in automatic warehousing systems» *Management Science* 23(9), 935-945.
- Groover 2001** Groover MP 2001 «Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing», second edn. Prentice-Hall, New Jersey
- Gu et al. 2007** Gu J, Goetschalckx M, McGinnis LF 2007 «Research on warehouse operation: a comprehensive review». *Eur J Oper Res* 177(1):1–21. doi:10.1016/j.ejor.2006.02.025

- Guenov 1992** Guenov, M., and Raeside, R. 1992 «Zone shapes in class based storage and multicommand order picking when storage/retrieval machines are used» *European Journal of Operational Research* 58(1), 37-47.
- Guenov et Raeside. 1989** Guenov M, Raeside R 1989 «Real time optimization of man on board order picking. In: Proceedings of the 10th international conference on automation in warehousing» pp 89–93
- Guezzen et al .2011a** Guezzen A.H. Sari Z., Ghomri L. 2011 «A Study on Mobil Racks Automated Storage and Retrieval System (M-AS/RS) »*conference CCCA'11*, Hammemet.
- Guezzen et al. 2011b** Guezzen A.H. Sari Z., Ghomri L. 2011 «Continuous Model for Single Cycle Times of a Mobile Racks Automated Storage and Retrieval System» *conference MISC' 11*.
- Guezzen et al. 2014** Guezzen A.H. Sari Z. 2014 «An analysis of single-command operations in a mobile rack (AS/RS) served by a single order picker» *conference IMRHC' 14 USA*
- Guezzen et al. 2013** Guezzen A.H., Sari.Z, Castagna.P, Cardin.O, 2013 «Travel Time Modeling and Simulation of a Mobile Racks Automated Storage/Retrieval System» *IJET Vol.5 (3): 420-423 ISSN: 1793-8236*.
- Ha et Hwang 1994** Ha, J.W., and Hwang, H. 1994 «Class-based storage assignment policy in carousel system» *Computers & Industrial Engineering* 26(3), 489-499.
- Hachemi et al. 2008** Hachemi, K., Alla , H., 2008«Pilotage dynamique d'un système automatisé de stockage/déstockage à convoyeur gravitationnel» *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 42, 5/2008 (2008) 487-508
- Hausman et al. 1976** Hausman, W.H., Schwarz, L.B., and Graves, S.C. 1976 «Optimal storage assignment in automatic warehousing systems» *Management Science* 22(6), 629-638.
- Heskett 1963** Heskett, J.L. 1963 «Cube-per-order index - a key to warehouse stock location» *Transportation and Distribution Management* 3, 27-31.
- Heskett 1964** Heskett, J.L. 1964 «Putting the cube-per-order index to work in warehouse layout» *Transportation and Distribution Management* 4(8), 23-30.
- Hsieh et Tsai. 2001** Hsieh, S., and Tsai, K.C. 2001 «A BOM oriented class-based storage assignment in an automated storage/retrieval system» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 17(9), 683-691.
- Hu et al. 2005** Hu, Y.H., Huang, S.Y., Chen, C., Hsu, W.J., Toh, A.C., Loh, C.K., and Song, T. 2005 «Travel time analysis of a new automated storage and retrieval system» *Computers & Operations Research* 32(6), 1515-1544.
- Hwang et al. 2002** Hwang, H., Moon, S., and Gen, M. 2002 «An integrated model for the design of end-of aisle order picking system and the determination of unit load sizes of AGVs» *Computers & Industrial Engineering* 42(2-4), 249-258.
- Hwang et Lee 1990** Hwang, H., and Lee, S.B. 1990 «Travel-time models considering the operating characteristics of the storage and retrieval machine» *International Journal of Production Research* 28(10), 1779-1789.

- Hwang et Lim. 1993** Hwang, H., and Lim, J.M. 1993 «Deriving an optimal dwell point of the storage/retrieval machine in an automated storage/retrieval system» *International Journal of Production Research* 31(11), 2591-2602.
- Jarvis 1991** Jarvis, J.M., and McDowell, E.D. 1991 «Optimal product layout in an order picking warehouse» *IIE Transactions* 23(1), 93-102.
- Knapp et al. 1992** Knapp, G. M., & Wang, H.-P. 1992 « Modeling of automated storage/retrieval systems using Petri nets». *Journal of Manufacturing Systems*, 11(1), 20–29.
- Kouloughli et al. 2009** Kouloughli, S., Sari, Z., and Sari, T. 2009 “Optimisation des dimensions d’un AS/RS multi allées pour un temps de double cycle minimal ». Acte des 6 e conférences internationales de conception et production intégrée CPI’09, Fès, 19-21.
- Kouloughli et al. 2010** Kouloughli, S., Sari, Z., Sari, T., 2010 «Optimisation des dimensions d’un AS/RS multi allées basée sur un modèle analytique du temps de simple cycle» *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, vol.44 n°.2, p. 135-160.
- Kouloughli 2013** Kouloughli, S. 2013 «Optimisation de systèmes automatisés de stockage/déstockage multi-allées et à racks glissants» Thèse de Doctorat d’état, Université de Tlemcen, Algérie.
- Kouloughli et al. 2015** Kouloughli, S., Sari, Z. 2015«Multi-aisle AS/RS dimensions optimization for cycle time minimization» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* ISSN: 0268-3768 (Print) 1433-3015
- Kulwiec 1985** Kulwiec RA (1985) *Materials handling handbook*, 2nd edn . Wiley, New York
- Lambert et al. 1998** Lambert, D.M., Stock, J.R. and Ellram, L.M. (1998). *Fundamentals of logistics management* (Singapore: McGraw-Hill).
- Law et Kelton 1991** Law .A et W. Kelton 1991 «Simulation modeling and analysis » McGraw Hill.
- Le-Duc et al. 2004** Le-Duc, T. and R. De Koster, 2004 «Travel distance estimation in a single-block ABC storage strategy warehouse, In: Fleischmann and Klose (eds.) *Distribution Logistics: advanced solutions to Practical Problems*» p. 185-202 (Berlin: Springer Verlag).
- Le-Duc et al 2007** Le-Duc, T., and De Koster, R.M.B.M. 2007 «Travel time estimation and order batching in a 2-block warehouse» *European Journal of Operational Research* 176(1), 374-388.
- Le-Duc et al. 2005** Le-Duc, T., and De Koster, M.B.M. 2005 «Travel distance estimation and storage zone optimization in a 2-block class-based storage strategy warehouse» *International Journal of Production Research* 43(17), 3561-3581.
- Le-Duc et al. 2006** Le-Duc T, De Koster MBM, Yugang Y 2006 «Optimal storage rack design for a 3-dimensional compact AS/RS» ERIM report series research in management
- Lee et al. 1996** Lee, H.F., and Schaefer, S.K. 1996 «Retrieval sequencing for unit-load automated storage and retrieval systems with multiple openings» *International Journal of Production Research* 34(10), 2943-2962.
- Lee et al.1999** Lee YH, Tanchoco JMA, Jin S 1999 «Performance estimation models for AS/RS with unequal sized cells» *Int J Prod Res* 37(18):4197-4216.

- Lee et al. 2005** Lee YH, Hwan Lee M, Hur S 2005 «Optimal design of rack structure with modular cell in AS/RS» *Int J Prod Econ* 98(2):172–178.
- Lerher et al. 2005** Lerher T., Sraml M., Kramberger J., Potrc I., Borovinsek M., and Zmazek B. 2005 «Analytical travel time models for multi aisle automated storage and retrieval systems» *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 30, n° 3, p. 340-356.
- Linn et Wysk 1987** Linn, R.J., and Wysk, R.A. 1987 «An analysis of control strategies for an automated storage/retrieval system, *INFOR* 25(1), 66-83.
- Linn et Wysk 1990b** Linn, R.J., and Wysk, R.A. 1990 «An expert system based controller for an automated storage/retrieval system» *International Journal of Production Research* 28(4), 735-756.
- Malmborg 2001** Malmborg CJ 2001 «Rule of thumb heuristics for configuring storage racks in automated storage and retrieval systems design» *Int J Prod Res* 39(3):511–527.
- Malmborg et Bhaskaran 1990** Malmborg, C.J., and Bhaskaran, K. 1990 «A revised proof of optimality for the cube-per order index rule for stored item location» *Applied Mathematical Modelling* 14(2), 87-95.
- Manzini et al. 2006** Manzini, R. 2006 «Correlated storage assignment in an order picking system» *International Journal of Industrial Engineering* 13(4), 384-394.
- Material Handling Institute** Material Handling Institute, Inc. 1977 «Considerations for planning and installing an automated storage/ retrieval systems» AS/RS Document-100 7M.
- Meller et Mungwatana 1997** Meller, R.D., and Mungwattana, A. 1997 «Multi-shuttle automated storage/retrieval systems» *IIE Transactions* 29, 925-938.
- Meller et Mungwattana 2005** Meller, R.D., and Mungwattana, A. 2005 «AS/RS dwell-point strategy selection at high system utilization: a simulation study to investigate the magnitude of the benefit» *International Journal of Production Research* 43(24), 5217-5227.
- Meyers et al. 2005** Meyers FE, Stephens MP (2005) *Manufacturing facilities design and material handling*, 3rd edn. Pearson Prentice-Hall, New Jersey
- Muppani et al. 2008** Muppani V. R. et G. K. Adil, 2008 «A branch and bound algorithm for class based storage location assignment» *European Journal of Operational Research*, 189 (2) p. 492-507.
- Ouhoud 2013** Ouhoud, A., A.H. Guezzen, 2013 « *Modélisation Et Simulation D'un Système Automatisé De Stockage/Déstockage (AS/RS) Multi Allées "Stockage par classe"* » CPI 2013 – Tlemcen Algérie
- Ouhoud 2014** Ouhoud, A., A.H. Guezzen, Sari.Z, 2015 «*Etude Comparative entre le stockage aléatoire et le stockage par classe dans un AS/RS Multi Allées*» CIMSI 2014– Marrakech, Maroc
- Ouhoud 2015a** Ouhoud, A., A.H. Guezzen, Sari.Z, 2015 «Discrete Model for Single Cycle Time of Multi Aisles Automated Storage and Retrieval System with Class-Based Storage » In editing in CEAI for Vol.16 (2): 2015 420-423 ISSN: 1454-8658,

- Ouhoud 2015b** Ouhoud, A., A.H. Guezzen, Sari.Z, 2015 « Experimental validation of travel time models for multi aisle automated storage and retrieval system in class-based storage » accepted in *Electrotehnica, Electronica, Automatica* [Electrical Engineering, Electronics, Automation journal]
- Pan et Wang 1996** Pan, C.H., and Wang, C.H. 1996 «A framework for the dual command cycle travel time model in automated warehousing systems» *International Journal of Production Research* 34(8), 2099-2117.
- Park 1999** Park, B.C. 1999 «Optimal dwell point policies for automated storage/retrieval systems with dedicated storage» *IIE Transactions* 31, 1011-1013.
- Park 2001** Park, B.C. 2001«An optimal dwell point policy for automated storage/retrieval systems with uniformly distributed, rectangular racks» *International Journal of Production Research* 39(7), 1469-1480.
- Park et al. 2006** Park, B.C. 2006 «Performance of automated storage/retrieval systems with non-square in- time racks and two-class storage» *International Journal of Production Research* 44(6), 1107-1123.
- Park et Webster 1989** Park, Y.H., and Webster, D.B. 1989 «Modelling of three-dimensional warehouse systems» *International Journal of Production Research* 27(6), 985-1003. 27
- Park et al. 2003** Park B.C., Park, J.Y., and Foley, R.D. 2003 «Carousel system performance» *Journal of Applied Probability* 40(3), 602-612.
- Perry et al. 1984** Perry RF, Hoover SV, Freeman DR 1984 «An optimum-seeking approach to the design of automated storage/retrieval systems» *IEEE press, Piscataway*, pp 348-354
- Peters et al. 1996** Peters BA, Smith JS, Hale TS 1996 «Closed form models for determining the optimal dwellpoint location in automated storage and retrieval systems» *Int J Prod Res* 34(6):1757–1772.
- Potrc et al. 2004** Potrc I, Lerher T, Kramberger J, Sraml M 2004 «Simulation model of multi-shuttle automated storage and retrieval systems» *J Mater Process Tech* 157-158:236-244.
- Randhawa et al. 1991** Randhawa SU, McDowell ED, Wang W-T 1991 «Evaluation of scheduling rules for single- and dual-dock automated storage/retrieval system» *Comput Ind Eng* 20(4):401-410.
- Randhawa et Shroff 1995** Randhawa SU, Shroff R 1995«Simulation-based design evaluation of unit load automated storage/retrieval systems» *Comput Ind Eng* 28(1):71-79.
- Roberts et Reed 1972** Roberts SD, Reed R Jr 1972 «Optimal warehouse bay configurations AIIE» *Trans* 4(3):178–185
- Roodbergen et Vis 2009** Roodbergen K. J. and I. F. A. Vis, 2009 «A survey of literature on automated storage and retrieval systems» *European Journal of Operational Research*, 194, p. 343-362
- Rosenblatt 1989** Rosenblatt, M.J., and Eynan, A. 1989 «Deriving the optimal boundaries for class-based automatic storage /retrieval systems» *Management Science* 35(12), 1519-1524.



- Rosenblatt et Roll 1984** Rosenblatt, M.J., and Roll, Y. 1984 «Warehouse design with storage policy considerations» *International Journal of Production Research* 22(5), 809-821.
- Rouwenhorst 2000** Rouwenhorst B, Reuter B, Stockrahm V, van Houtum GJ, Mantel RJ, Zijm WHM (2000) «Warehouse design and control: framework and literature review». *Eur J Oper Res* 122(3)
- Sari 1998** Sari Z., «Expressions analytiques discrètes de simple et double cycle d'un AS/RS multi-allées» Rapport interne, LAT, Université Abou-Bekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie.
- Sari 2003** Sari Z. 2003 «Modélisation, Analyse et Evaluation des Performances d'un AS/RS à Convoyeur Gravitationnel» Thèse de Doctorat d'état, Université de Tlemcen, Algérie.
- Sari et al. 2005** Sari Z., C.Saygin, and N.Ghouali, 2005 «Travel-Time Models for Flow-Rack Automated Storage and Retrieval Systems» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25, p. 979-987.
- Sari 2008** Sari Z., «Expressions analytiques discrètes de simple et double cycle d'un AS/RS à rack glissant» Rapport interne, LAT, Université Abou-Bekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie.
- Sari et al. 2010** Sari Z., Kouloughli S. 2010 «Modélisation des temps de cycle d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel à une seule machine S/R» conférence internationale de modélisation et simulation, Hammamet Tunisie.
- Sari et al. 2014** Sari Z., Ghomri L., Banu., Y.E, Tone L. 2014 «Experimental validation of travel time models for shuttle-based automated storage and retrieval system» conférence IMRHC'14 USA.
- Sarker et al. 1991** Sarker, B.R., Sabapathy, A., Lal, A.M., and Han, M.H. 1991 «Performance evaluation of a double shuttle automated storage and retrieval system» *Production Planning & Control* 2(3), 207-213.
- Sarker et Babu. 1995** Sarker, B.R., and Babu, P.S. 1995 «Travel time models in automated storage/retrieval systems: A critical review» *International Journal of Production Economics* 40(2-3), 173- 184.
- Schwarz et al. 1978** Schwarz, L.B., Graves, S.C., and Hausman, W.H. 1978 «Scheduling policies for automatic warehousing systems: simulation results» *AIIE Transactions* 10(3), 260-270.
- Serin et al. 1996** F. Serin, L. Ville franche, 1996 « Simulateur de gestion d'un terminal à conteneurs-simulation discrète par macro-processus et processus complémentaires », Thèses de doctorat en Informatique, Université de Rouen, janvier.
- Silver 1998** Silver, E.A., Pyke DF, Peterson R, 1998« Inventory management and production planning and scheduling». 3rd ed., New York: Wiley;
- Taboun et al. 1993** Taboun, S. M., & Bhole, S. D. (1993). A simulator for an automated warehousing system. *Computers and Industrial Engineering*, 24(2), 281–290.
- Tang (1997)** Tang, L.C., and Chew, E.K. 1997 «Order picking systems: batching and storage assignment strategies» *Computers & Industrial Engineering* 33(3-4), 817-820.

- Thonemann et Brandeau 1998** Thonemann, U.W., and Brandeau, M.L. 1998 «Note. Optimal storage assignment policies for automated storage and retrieval systems with stochastic demands» *Management Science* 44(1), 142-148.
- Tompkins. 1984** Tompkins, J. A., White, J. A. 1984 «Facilities Planning» John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Tompkins et al. 1996** Tompkins JA, White JA, Bozer YA, Frazelle EH, Tanchoco JMA, Trevino J (1996) *Facilities planning*, 2nd edn. Wiley, New York
- Vandenberg 1999** Van den Berg, J.P. 1999 «A literature survey on planning and control of warehousing systems» *IIE Transactions* 31, 751-762.
- Vandenberg et Gademann (2000)** Van den Berg, J.P., and Gademann, A.J.R.M. 2000 «Simulation study of an automated storage/retrieval system» *International Journal of Production Research* 38(6), 1339-1356.
- Van den Berg, 1996** Van den Berg, J.P. 1996 «Multiple order pick sequencing in a carousel system: A solvable case of the rural postman problem» *Journal of the Operational Research Society* 47(12), 1504-1515.
- Vasili et al. 2006** Vasili MR, Tang SH, Homayouni SM, Ismail N. 2006 «Comparison of different dwell-point policies for split-platform automated storage and retrieval system» *Int J Adv Manuf Tech*3(1):91–106
- Vasili et al. 2008** Vasili MR, Tang SH, Homayouni SM, Ismail N 2008 «A statistical model for expected cycle time of SP-AS/RS: an application of Monte Carlo simulation» *Appl Artif Intell* 7(8):824–840.
- Wen et al. 2001** Wen, U.P., Chang, D.T., and Chen, S.P. 2001 «The impact of acceleration/deceleration on travel-time models in class-based automated S/R systems» *IIE Transactions* 33, 599- 608.
- West et al. 1993** West, T.M., Amundson, A.N., Randhawa, S.U., 1993«Evaluation of alternative materials handling systems», *Computers and Industrial Engineering*, 25 (1-4), 187-190.
- Xialong. 2014** Xialong G., 2014 «A study of storage policy and maintenance support strategy in warehousing system »,doctorat thesis, University of science and technology of china
- Zollinger 1975** Zollinger HA 1975 «Planning, evaluating and estimating storage systems» In: *Advanced material handling seminar*, Purdue University, IN.

---

## **Pilotage D'un Système Automatisé De Stockage/Déstockage Multi-Allées**

---

### **RÉSUMÉ**

Dans ce travail nous étudions les systèmes automatisés de stockage/déstockage multi-allées soumis à une politique de stockage par classe. Dans une première partie, nous avons développé une approche discrète. Nous avons détaillé la modélisation mathématique du temps moyen de simple cycle pour chaque classe du système : la classe A, la classe B et la classe C.

Par la suite, nous présentons l'approche continue développée. Cette dernière est une approche analytique basée sur une approximation continue des différentes distributions discrètes exactes modélisant les déplacements horizontaux et verticaux de la machine S/R dans chaque classe.

Enfin, nous développons des modèles de simulation qui sont utilisés pour valider les temps de déplacement de simple cycle. Ces modèles sont développés en tenant compte des deux méthodes de stockage : le stockage aléatoire et le stockage par classe. Les résultats obtenus indiquent que l'erreur entre la simulation et les modèles analytiques est très faible ne dépassant pas les 5%. Par contre la différence du temps entre les deux politiques est autour de 35%. Cela signifie que le stockage par classe est plus performant que dans un AS/RS multi allées en termes de temps moyen de simple cycle.

---

## **Piloting of Multi-Aisles Automated Storage /Retrieval System**

---

### **ABSTRACT**

In this work, we are interested to a problem of storage assignment in multi-aisles automated storage retrieval system. In the first part, we developed a discreet approach. We have detailed mathematical modeling of the average single cycle time for each class of the system, class A, class B and class C.

Subsequently, we introduce continuous approach. The latter is an analytical approach based on continuous approximation of the various discrete distributions modeling the exact horizontal and vertical movements of the S/R machine in each class.

Finally, we develop simulation models to validate the time of simple cycle time. These models are developed taking into account the two storage methods: random storage and class-based storage. The obtained results indicate the error between simulation and analytical models is very low and does not exceed 5%. As against the time difference between the two policies is around 35%. This means that storage per class is more efficient in an AS/RS multi aisle in terms of average cycle time than random storage.

---

### **MOTS-CLÉS**

AS/RS multi-allées, temps de simple cycle, stockage par classe, stockage aléatoire, modélisation mathématique, simulation.

### **KEYWORDS**

Multi-aisles AS/RS, simple cycle time, class based storage, random storage, mathematical modeling, simulation.

---