

# Table des matières

## Remerciements

## Introduction générale

### Chapitre 1 : Introduction aux systèmes automatisés stockage/déstockage

1.1	Introduction : .....	15
1.2	Définition d'un système de stockage automatisé AS/RS, sa fonction, ses avantages et inconvénients : .....	16
1.2.1	Définition : .....	16
1.2.2	Fonction : .....	16
1.2.3	Composants d'un AS/RS : .....	17
1.2.4	Terminologie : .....	17
1.2.5	Avantages d'un AS/RS : .....	20
1.2.6	Inconvénients : .....	21
1.3	Différents types d'AS/RS : .....	21
1.3.1	Les AS/RS à charge unitaire : .....	21
1.3.2	Les AS/RS multi allées : .....	22
1.3.3	Les AS/RS à racks glissants : .....	22
1.3.4	Les AS/RS à mini charge : .....	23
1.3.5	Les AS/RS à carrousel : .....	24
1.3.6	Les AS/RS à personne embarquée : .....	24
1.3.7	Les AS/RS à étagères profondes : .....	25
1.3.8	Les AS/RS à convoyeur gravitationnel : .....	25
1.3.9	Les AVS/RS : .....	26
1.3.10	L'AS/RS à convoyeur gravitationnel à une seule machine : .....	27
1.3.11	L'AS/RS à chariots gravitationnels bidirectionnels ou le bi-directional flow-rack AS/RS : 27	
1.4	Revue de la littérature : .....	29
1.5	Conclusion : .....	31
<b>Chapitre 2 : Modélisation mathématique de l'AS/RS et validation</b>		
2.1	Introduction : .....	33
2.2	Elaboration des modèles : .....	34

2.2.1	Notation : .....	34
2.2.2	Approche discrète : .....	34
2.2.3	Approche continue : .....	40
2.3	Simulation et validation : .....	43
2.4	Conclusion : .....	49

### **Chapitre 3 : Réalisation de la partie commande de l'AS/RS**

3.1	Introduction : .....	51
3.2	Description du dispositif : .....	52
3.2.1	Partie logicielle : .....	52
3.2.2	Partie matérielle : .....	57
3.3	Conclusion : .....	60

### **Chapitre 4 : Réalisation de la partie opérative de l'AS/RS**

4.1	Introduction : .....	63
4.2	Description du système et identification de ses principaux organes : .....	63
4.2.1	Le rack : .....	64
4.2.2	Les palettes : .....	66
4.2.3	Les machines S/D : .....	68
4.2.3.1	Le mouvement horizontal : .....	68
4.2.3.2	Le mouvement vertical : .....	70
4.2.3.3	Le mouvement en profondeur (mouvement de saisi) : .....	73
4.2.4	L'électromécanique des machines S/D : .....	74
4.2.4.1	Les moteurs pas à pas : .....	74
4.2.4.2	Les circuits de puissance pour moteur pas à pas (drivers) : .....	74
4.2.4.3	Les circuits de puissance des moteurs à courant continu : .....	75
4.3	Synthèse du fonctionnement global : .....	78
4.4	Perspectives : .....	78
4.5	Conclusion : .....	79

### **Conclusion générale**

### **Références**

### **Résumés**

# Liste des Figures

Figure 1.1 : Casier de stockage [31].....	17
Figure 1.2 : Colonnes de casier (au premier plan) [31].....	18
Figure 1.3 : Racks ou rangées de stockage [5].....	18
Figure 1.4 : Une allée séparant deux racks de stockage [31].....	18
Figure 1.5 : Une machine de stockage/déstockage [5].....	19
Figure 1.6 : Schéma explicatif du temps de cycle.....	19
Figure 1.7 : AS/RS à charge unitaire [5].....	22
Figure 1.8 : Vue de dessus d'un AS/RS multi-allées [5].....	22
Figure 1.9 : Schéma en 3D d'un AS/RS à racks glissants [5].....	23
Figure 1.10 : AS/RS à mini charge [5].....	23
Figure 1.11 : AS/RS à carrousel [5].....	24
Figure 1.12 : AS/RS à personne embarquée [5].....	24
Figure 1.13 : AS/RS à étagères profondes [5].....	25
Figure 1.14 : AS/RS à convoyeur gravitationnel [5].....	26
Figure 1.15 : AVS/RS avec en bleu et jaune les ascenseurs [27].....	26
Figure 1.16 : Configuration d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel à une seule machine (vue de haut, une série de casiers superposés et un schéma en 3D) [7].....	27
Figure 1.17 : Configuration du bi-directional flow-rack AS/RS [8].....	28
Figure 3.1 : Illustration de l'interface graphique du Flow-Rack Manager.....	52
Figure 3.2 : Illustration du module STOCKER.....	53
Figure 3.3 : Illustration du module DESTOCKER.....	54
Figure 3.4 : Illustration du module RESCHERCHER.....	55
Figure 3.5 : Illustration du module ALERTE PEREMPTION.....	56
Figure 3.6 : Illustration du vecteur de codification.....	56
Figure 3.7 : Illustration de la carte Arduino UNO utilisée.....	58
Figure 3.8 : Illustration montrant le composant responsable de l'émulation de la communication série.....	59
Figure 3.9 : Illustration synthétisant le fonctionnement de la partie commande.....	60
Figure 4.1 : Photo du rack après le montage final.....	65
Figure 4.2 : Photo de l'un des gabarits utilisés.....	66
Figure 4.3 : Illustration d'un convoyeur à rouleaux [31].....	67
Figure 4.4 : Illustration des roulettes en plastiques utilisées dans les convoyeurs gravitationnels [31].....	67
Figure 4.5 : Photo de l'une des palettes confectionnées pour le système.....	68
Figure 4.6 : Photo du pignon arbré entraînant le mouvement.....	69
Figure 4.7 : Photo du moteur pas à pas ainsi que de sa roue dentée.....	69
Figure 4.8 : Photo de l'engrenage permettant de faire le déplacement horizontal.....	70
Figure 4.9 : Photo du système de transmission entre le moteur et la tige.....	71
Figure 4.10 : Photo du pignon pendant son taraudage.....	71
Figure 4.11 : Photo des fixations réglables du moteur.....	72
Figure 4.12 : Photo des fixations des axes de guidage.....	72

Figure 4.13 : Illustration des roulements linéaires [31].....	73
Figure 4.14 : Photo du mécanisme intérieur du plateau .....	74
Figure 4.15 : Photo de l'un des drivers utilisés .....	75
Figure 4.16 : Photo du circuit de puissance du moteur DC.....	76
Figure 4.17 : Schéma récapitulatif de l'ensemble des branchements électriques des machines S/D.....	77

# Liste des tableaux

Tableau 2.1: Configurations du système utilisées lors de la simulation.....	44
Tableau 2.2 : Résultats de la simulation pour les configurations allant de 1 à 4.....	45
Tableau 2.3 : Résultats de la simulation pour les configurations allant de 5 à 8.....	45
Tableau 2.4 : Résultats de la simulation pour les configurations allant de 9 à 12.....	46
Tableau 2.5 : Résultats de la simulation pour les configurations allant de 13 à 16.....	46
Tableau 2.6 : Résultats de la simulation pour les configurations allant de 17 à 20.....	47
Tableau 2.7 : Résultats de la simulation pour les configurations allant de 21 à 24.....	47
Tableau 2.8 : Résultats de la simulation pour les configurations allant de 25 à 28.....	48
Tableau 3.1 : Signification des caractères envoyés vers le circuit de commande .....	57
Tableau 4.1 : Liste des composants apparaissant dans la Figure 4.17.....	77

# Remerciements

Nous tenons à remercier de manière distinguée toutes les personnes qui nous ont aidé afin que ce projet puisse voir le jour soit de manière directe ou indirecte, car sans eux il n'aurait sûrement jamais pu voir le jour.

En plus de l'apport moral et financier considérable de nos parents respectifs, notre encadrant le professeur Zaki SARI nous a épaulés et aidés par son expertise ainsi que par ses fonds propres en plus d'avoir trouvé des bienfaiteurs qui ont tenu à rester anonymes.

Parmi les personnes qui sont restées à nos côtés et qui nous ont faits confiance puis aidé du début jusqu'à la fin, on remerciera de manière distinguée monsieur Mohammed N. LACHACHI propriétaire de la cartonnerie EL AMINE, ainsi que monsieur Nour-eddine BRAHMI gérant de l'entreprise SOGESI, qui en plus de leurs honnêtes encouragements ont eu un apport monétaire considérable. Nous citerons aussi l'entreprise EURL Grouz Tex située à Chelghoum Laïd, dont le personnel a été adorable avec nous et dont le gérant et propriétaire monsieur AMMAR, nous a procuré une grosse partie du matériel nécessaire à notre projet à des prix cassés nous faisant des réductions de plus de 50% sur tous les articles.

Nous n'oublierons pas de remercier chaleureusement monsieur Sidi Mohammed MELIANI, qui nous a facilité beaucoup de procédures administratives, nous a orientés à travers ses conseils éclairés et son expertise hors pair, puis aussi a insisté à contribuer financièrement de manière personnelle au projet.

Ce projet a nécessité aussi de l'expertise et des conseils techniques à chaque fois que nous butions sur un problème. Et à chacun de ces moments nous trouvions monsieur Abderrezak SARI, expert en son domaine, afin de nous tirer de ces mauvaises situations, où il s'est montré très disponible et pédagogue.

D'autre part une autre personne étrangère des domaines universitaire et industriel mais qui nous a ouvert ses portes sans rechigner et à chaque fois avec le sourire malgré nos nombreuses sollicitations, il s'agit de monsieur BENKALFAT El Ghouti qui a mis à notre disposition son atelier afin que nous puissions y travailler, et aussi nous a fait plusieurs prestations gratuites ou à des prix symboliques.

A la fin nous remercierons tous nos amis qui nous ont aidé dans ce projet et se sont démenés comme s'il s'agissait du leur, ils sont tellement nombreux que quelques pages ne suffiraient pas à tous les remercier convenablement, mais nous citerons tout de même Younes, Abdelali, Kamel, Sidou, Brahim, Hamza, Zaki, Karim, Imad, Fayçal et Amir.

# Remerciements personnels

Je dédie ce mémoire

A ma défunte et très chère tante BenHabib Nafissa qui m'accueillait chaleureusement, sa gentillesse et sa patience qui m'ont toujours mis à l'aise chez elle et ce, dès mon jeune âge.

A mes chers parents qui m'ont inculqué la valeur des études et du savoir dès mon jeune âge.

A ma mère qui m'a toujours incité à donner mon maximum durant tout mon cursus scolaire et universitaire en veillant à m'orienter vers ce qui est de mieux pour moi.

A mon père qui m'a transmis son savoir-faire et m'a appris la passion pour ce que j'entreprends. Pour tout je leur suis à jamais redevable.

A ma petite sœur Narimene Baba Ahmed qui m'a épaulé, a toujours été à mon écoute, de m'avoir soutenue et crue en moi.

A mon beau-frère Abdel-moumen Hadjidj que je ne remercierais jamais assez pour tous ses conseils et pour tout le matériel qu'il m'a prêté,

A mes cousins Mehdi, Amine, Djounid, Djawed, Hassen, Chamyl, Zoubir et Salim auxquels je souhaite la meilleure des réussites.

A mes cousines Mimi, les deux Sarah, Imen, Ilhem, Sihem et Zoubida que j'aime profondément.

A mon oncle Ilyes Rahmoun qui m'a conseillé et aidé dans plusieurs étapes dans ma vie.

A tous mes oncles et mes tantes qui m'ont éduqué et m'ont considéré comme leur fils.

Je remercie en premier lieu notre encadrant Professeur Zaki Sari qui nous a apporté de l'aide financière.

Avant de nous avoir encadrés cette année, M.Sari nous a suivi depuis notre arrivée en productique. Entant que chef de filière sa porte nous a toujours été ouverte, ses conseils et son aide durant notre formation ont été des plus précieux.

Je remercie particulièrement ma tante Professeur Fatima-zohra Lalaoui pour l'aide apportée dans la recherche des sponsors.

Je remercie mon très cher ami Younes El-Ghazi pour son aide et sa disponibilité durant la réalisation de ce projet qui m'ont été très précieuses. Son soutien moral m'a été très précieux, et je ne pourrais le remercier assez.

Je remercie mes amis Imad Bekhoucha et Safwan Bouchaour pour toute l'aide qu'ils m'ont apportée durant cette année, le matériel qu'ils m'ont prêté et tout le temps qu'ils m'ont consacré.

*BABA AHMED Mohammed Nassim*



## Remerciements personnels

Ainsi s'achèvent cinq autres années de ma vie presque comme elles avaient commencé, entouré par les gens que j'aime et qui me sont chers. La dernière fois c'était à la remise des prix pour mon baccalauréat, et maintenant pour une toute autre étape de mon éternelle vie d'apprenant, mais il est clair que je ne suis plus la même personne.

Il y a cinq années de cela, j'étais comme la plupart des bacheliers, perdu, entre ambition personnelle, penchant subjectif, ou raison et dictat de la fatalité sociétale. Après une petite expérience ratée à l'école supérieure de technologie d'Alger, je retournai à Tlemcen déçu mais pas abattu. Lorsque je pris la décision de revenir, mon oncle Fethi Hamzaoui m'a mis en contact avec le professeur Zaki Sari, alors chef de filière de productique. Après un long entretien téléphonique, des recherches sur internet, et plusieurs jours de concertation avec ma famille, j'ai pris la décision de rejoindre cette filière, chose que je ne regrette nullement.

Ici j'ai découvert une deuxième famille, qui a su me mettre à l'aise et m'aider à faire mon chemin, que ce soit de la part de mes professeurs ou des membres du laboratoire, je n'ai reçu que gentillesse et bonté de leur part, et je voudrai sincèrement les remercier pour cela.

Pendant ces cinq années, au-delà de l'acquis scientifique que j'ai engrangé, l'expérience humaine et l'échange profond que j'ai eu avec mes amis et camarades est pour moi inestimable. La filière productique, étant une filière nationale, j'ai eu la chance de connaître des personnes venant des quatre coins du pays, ce qui m'a permis de nouer des liens et de casser des barrières et de m'ouvrir aux gens. Je tiens à remercier tous mes amis de toute part qui m'ont permis de faire partie de leur vie, et qui m'ont traité de manière si distinguée et aimable, qui m'ont soutenu et épaulé durant les moments difficiles, et qui ont été présents pour partager mes joies, je leur souhaite à tous de la réussite dans leur vie professionnelle et personnelle, eux qui ont fait que le chemin soit plus agréable que la destination.

Cela dit les personnes à qui je dois absolument tout, se sont mes adorables parents, qui m'ont protégé, aidé, défendu et qui ont fait tellement de sacrifices pour me voir réussir. Mes parents m'ont toujours soutenu et poussé à donner le meilleur de moi-même, et ont toujours mis tous les moyens à ma disposition, quoi que cela puisse coûter. Depuis mon jeune âge, la douceur de leurs caresses et la chaleur de leurs bras, ont forgé l'homme que je suis maintenant, je leur suis

éternellement redevable, les nuits qu'ils ont veillées à mon chevet et les milliers de goûtes qu'ils ont sué sont tout simplement inestimables, seul Dieu tout puissant saura comment les combler. Je n'oublierai pas mes frères et ma petite sœur, avec qui dans l'étroitesse nous avons vécu dans la chaleur familiale, nous avons partagé des moments de fraternité qui resteront figés dans le temps, qu'ils soient de rigolade, de sérieux ou de profonde émotion, je n'aurais jamais pu rêver de meilleur foyer, et vivre à leurs côtés a été pour moi merveilleux. Je remercie aussi toute ma grande famille, qui l'est par le nombre mais aussi par le cœur, toutes mes tantes et oncles, tous mes cousins et cousines, ainsi que mes deux grands-mères adorées et adorables, source de sagesse et dont l'infinie douceur a toujours été distributrice de sourires.

Je voudrais aussi rendre hommage à deux personnes qui ne sont malheureusement plus là pour partager ce moment avec moi, il s'agit de mes deux grands-pères. Je n'ai pas eu la chance de connaître mon grand-père paternel Ahmed Hamzaoui, mais dont les centaines de descriptions élogieuses qui me sont parvenues font que j'ai l'impression de l'avoir toujours connu. Cet homme d'honneur, qui fut juge à Tlemcen, et qui a fait régner la justice d'une main de fer, aussi bien que les gens qui le connaissent ont créé un adjectif à son nom, tellement il inspirait l'irréprochabilité et la droiture. Puis que dire de mon grand-père maternel, qui fut et est toujours mon modèle. Mohammed Bemrah mathématicien de renom au cursus scolaire incroyablement brillant, qui malgré avoir été orphelin de jeune âge, a parcouru le monde à la recherche du savoir, puis occupa des postes supérieurs aux seins de différents ministères du pays. Mon grand-père décédé le 4 novembre 2010, m'a continuellement encouragé à donner le meilleur de moi-même et à viser toujours plus haut, et je sais qu'il aurait été très fière de moi à ce moment.

Enfin, je remercie Dieu, de m'avoir donné la force d'arriver jusque-là et d'avoir fait en sorte que mes souhaits se réalisent, car nous ne pouvons emboîter le pas qu'à notre destinée, je remercie Dieu de m'avoir dédié pareil destin.

*HAMZAOUI Mohammed Adel*

# Introduction générale

Depuis aussi longtemps que l'être humain existe, il n'a cessé d'évoluer à travers son intellect, en essayant d'améliorer son niveau de vie et son confort au quotidien. Depuis la guerre du feu et de la chasse en groupe, au vaccin de Pasteur et à Youri Gagarine contemplant la planète bleue au milieu du froid intersidéral clairsemé d'étoiles à des milliers d'années lumière de distance...le chemin parcouru par l'homme est énorme.

Après que la civilisation arabo-musulmane eu développé considérablement la médecine et les mathématiques, et que vinrent De Vinci et ses pairs génies de la renaissance mettre en évidence la beauté de l'art et faire sortir ce que l'homme avait au profond de lui sans pour autant qu'il puisse l'exprimer, le moteur à combustion d'Étienne Lenoir vient donner une nouvelle tournure à l'histoire du monde en amorçant la révolution industrielle. On s'aperçoit clairement que les hommes et femmes de toutes parts et horizons, malgré la différence de leurs visions, de leurs pensées, de leurs cultes et de leurs origines, ne peuvent faire face à cette envie impulsive, de vouloir créer, construire, avancer, laisser sa trace, apprendre et déchiffrer le monde qui nous entoure.

La nouvelle ère dans laquelle on se trouve donc, est celle de la technologie, de l'efficience, de la précision, de la pertinence, la tendance maintenant est de tourner la nature à l'avantage de l'homme, en l'étudiant, la comprenant, et la poussant à agir de la manière que l'on veut. Même si cette entreprise dangereuse qui vise des résultats localement, a du mal à gérer les retombées globales, mais cela est un autre débat. Dans cette quête au développement et au confort, les avancées industrielles restent la clé de voute par laquelle le passage est obligé. Les pays se concurrencent, les multinationales se tirent la couverture et les consommateurs n'ont que l'embarrât du choix entre nécessité et superficialité, nous sommes dans l'ère de la surconsommation où les marchés sont inondés de produits, et où, si on ne se démarque pas on disparaît. La pérennité est donc la finalité pour toute entreprise, au moment où le déséquilibre flagrant entre offre et demande n'a jamais été aussi important. Chaque entreprise, chaque compagnie, chaque organisme, essaye de faire preuve d'ingéniosité et de ruse afin de sortir du lot, et de prendre la plus grande part de marché possible. Il y en a qui tablent sur des avantages de marketing, d'image, de réseau, d'exclusivité technologique, ou de logistique performante. Des facteurs de performances il en existe des centaines, ils ont tous leur importance relative, cela dit, en ce qui nous concerne nous avons choisi de nous intéresser à un facteur particulier.

Afin de mener à bien notre projet de fin d'études, nous avons choisi de nous intéresser à un élément très important de n'importe quelle entreprise, cet élément est le stock. Que ce soit un stock de matière première, de produits finis, d'outillage ou de produits en transit, il représente une importance capitale. Une bonne gestion des stocks peut à elle seule faire la différence et cela pour plusieurs raisons. Premièrement il ne faut pas oublier qu'un stock représente une immobilisation de capital, puisqu'il s'agit d'un fond financier dormant, qui peut à tout moment disparaître, puisqu'il peut se détériorer ou se périmer, ou bien même que le

produit en question ne trouve plus preneur pour une raison ou pour une autre. Deuxièmement, une bonne gestion des stocks pour un fournisseur par exemple, lui permet d'élargir son réseau de clientèle, car des livraisons conformes et dans de courts délais représentent des facteurs importants pour le choix d'un fournisseur. D'autre part la maîtrise de bonnes politiques de gestion des stocks peut offrir la possibilité de diversifier ses produits, et de ce fait s'attaquer à plusieurs marchés en parallèle. Tout cela pour ne souligner que de manière brève l'étendue de l'importance que cette partie de l'entreprise représente. Cela a poussé les chercheurs et ingénieurs du monde, à imaginer des solutions technologiques permettant de rendre cette tâche plus efficiente. L'une de ses solutions est le système de stockage automatisé ou AS/RS pour Automated Storage and Retrieval System. Ces systèmes permettent à travers une automatisation et une informatisation des tâches de la gestion des stocks, qu'elles soient physiques ou relatives à la gérance, de faciliter ces dernières, les rendre plus rapides, diminuer les risques d'erreur et gagner en espace. Ces systèmes il en existe de plusieurs sortes, chacun d'eux aillant ses avantages et inconvénients.

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous allons définir de manière plus formelle ce qu'un AS/RS, avant d'exposer en détail les différents genres existant. Nous énoncerons aussi les principaux composants qui les constituent, puis nous parlerons de leurs avantages et inconvénients le tout illustré par des images et schémas. Pour finir, une brève revue de la littérature viendra clôturer ce chapitre, en exposant les principaux travaux dont les AS/RS ont été le sujet à travers le monde.

Le second chapitre traitera du système de stockage choisi pour ce PFE, qui est le bi-directional flow-rack. Premièrement nous exposerons les modélisations mathématiques du temps de cycle de cet AS/RS, que nous avons établi. Nous y reviendrons en détail en suivant toutes les étapes et raisonnement qui nous auront amenés à elles. Les modèles développés, l'ont été pour le calcul du temps de cycle moyen de stockage et de déstockage, et cela selon les deux approches, discrète et continue. Par la suite un programme sous Matlab a été développé afin de vérifier l'adéquation entre ses deux modélisations. S'en suivra, la présentation des résultats ainsi que les interprétations de ses derniers.

Les deux chapitres qui suivront, sont plus du domaine de la pratique, en comparaison avec les deux premiers. Puisque nous avons choisi de faire une réalisation de ce système en taille semi-industrielle. Nous avons essayé de construire un AS/RS opérationnel et prêt à l'emploi.

Dans le troisième chapitre, il sera question de la partie commande de cet AS/RS, puisqu'un logiciel de gestion et de commande adapté à ce dernier a été implémenté. Ce programme a été codé en C#, et offre les fonctions de base dont on a besoin afin de faire fonctionner ce genre de système. La deuxième moitié de la partie commande est le circuit de contrôle, qui se compose pour sa part de cartes Arduino, le tout relié via un protocole RS232.

Finalement le dernier chapitre, regroupera les aspects mécaniques, électrotechniques et électroniques de la réalisation. Puisque nous prendrons le soin de décrire toutes les parties de notre système, ainsi que les différents moteurs utilisés, et différents circuits de puissance implémentés, afin de garantir le bon fonctionnement du système, sans oublier les systèmes de transmission de mouvement des machines S/D et la relation entre eux.

# Chapitre 1

## Introduction aux systèmes automatisés de Stockage/Déstockage

## **Chapitre 1 :**

### **Introduction aux systèmes automatisés de stockage/déstockage**

#### **1.1 Introduction :**

Avant de parler de profit, de chiffre d'affaire ou cote boursière, chaque entreprise doit assurer sa pérennité, son existence au milieu de l'arène, s'affirmer au centre de l'économie mondiale aujourd'hui sans pitié, au moment où toutes les entreprises tirent la couverture à elles seules, chacune doit tirer son épingle du jeu. Par conséquent pour qu'une entreprise puisse se faire une place au soleil, elle doit combiner entre efficacité, efficience, clairvoyance, vision stratégique et performance opérationnelle.

Tout cela est vite dit, car arriver à incarner tous ces facteurs de compétitivités, même avec de la volonté et de l'huile de coude risque d'être compliqué. C'est pour cela que les chercheurs, innovent sans cesse de nouvelles techniques de gestion, de nouvelles machines, de nouveaux systèmes et de nouvelles organisations qui font converger chaque entreprise qui le veuille bien vers ses objectifs. Parmi ces machines et systèmes révolutionnaires, les systèmes de stockage et de déstockage automatisés ou AS/RS (Automated Storage and Retrieval System).

Tout bon producticien vous dira relativement que le stock est à éliminer par tous les moyens, que cette entité est néfaste pour l'entreprise, et qu'un stock important est le syndrome révélateur de la mauvaise gestion d'une quelconque entreprise. Ceci est vrai, à une certaine mesure, puisque le stock est qualifié le plus souvent comme étant un « mal nécessaire », car celui-ci permet d'assurer une continuité dans les approvisionnements de produits, outils ou pièces de rechanges, palier aux pénuries, créer une certaine synchronisation entre les différentes machines ou ateliers quand il existe un décalage de taux de production entre ces derniers à cause de caractéristiques techniques, ou encore permet le stockage de produits finis dans l'attente de leur livraison ou vente. De l'autre côté, comme on peut s'y attendre, le stockage comporte beaucoup d'inconvénients, il s'agit tout d'abord d'un investissement important que de mettre en place un stock, sans parler de l'argent immobilisé par ce dernier, du coût d'entretien qui y est relatif, du risque de péremption ou de dépassement technique des produits stockés...etc.

Dans ce cas, comment faire pour minimiser d'une part les inconvénients de détenir un stock, et d'autre part augmenter ses facteurs avantageux ? Et bien la solution est sans doute l'acquisition d'un système de stockage et de déstockage automatisé. C'est pour cette raison que nous avons pris la décision de centrer notre travail sur cet élément en particulier d'une entreprise

industrielle, qui même si est quelque peu négligé par la communauté scientifique par rapport aux autres éléments constitutifs des industries, reste un maillon comme un autre, et son affaiblissement risque de faire rompre toute la chaîne sous la pression de la concurrence féroce.

Dans ce chapitre, vont être présentés les différentes fonctions d'un AS/RS en plus de sa composition, après avoir défini cet équipement industriel particulier, et avant de parler de ses avantages et inconvénients sans oublier ses différents types cités dans la littérature et existants dans le domaine industriel. Par la suite, ce chapitre donnera les différentes caractéristiques de l'AS/RS choisi pour ce travail, ce qui a fait que le choix se porte sur ce dernier, et ce qui le rend si peu commun.

## **1.2 Définition d'un système de stockage automatisé AS/RS, sa fonction, ses avantages et inconvénients :**

### **1.2.1 Définition :**

James A. Tompkins, John A. et Jr. White [1], définissent dans leur livre "Facilities Planning" un AS/RS comme ceci : « Automated storage and retrieval systems (AS/RS) are a combination of equipment and controls which automatically handles, stores and retrieves materials with great speed and accuracy »

D'autre part le "Material Handling Institute" [2] a le même avis concernant la définition de cet équipement : « A combination of equipment and controls which handles, stores, and retrieves materials with precision, accuracy, and speed under a defined degree of automation. »

Ces deux définitions veulent dire pratiquement la même chose, et toutes les deux définissent un système automatisé de stockage et de déstockage comme étant :

« Une combinaison d'équipements et de systèmes de contrôle qui prend en charge, stocke et déstocke des produits avec précision, exactitude et célérité sous un certain degré d'automatisation » [4].

### **1.2.2 Fonction :**

L'AS/RS a été conçu dans le but de diminuer l'intervention humaine au maximum dans les opérations de manutention des produits, pièces de rechanges, palettes, matières premières ou même outillage, mis en stock. Permettant de cette manière de réduire considérablement le risque d'erreurs, de manipulations maladroites, ou les interventions humaines en milieu dangereux. En fonctionnement, un AS/RS reçoit des entités à stocker à un point de dépôt, les identifie et les transporte à l'endroit où ils doivent être stockés, ou bien les déstocke et les livre à une station de livraison.

Un système de stockage automatisé, doit être capable, sous supervision et commande humaines, de :

- Récupérer un article au point de dépôt pour un stockage.
- Transporter de manière automatisée l'article à stocker à l'endroit qui lui a été dédié selon la politique de stockage adoptée.

- Déstocker un produit à la demande de l'utilisateur, et le livrer à la station de livraison de manière automatisée.

Le tout régit par un système informatisé de commande et de supervision, assurant le bon fonctionnement du système, et son suivi.

### **1.2.3 Composants d'un AS/RS :**

Il existe différents genres d'AS/RS cités dans la littérature ou implantés dans le milieu industriel, cela dit l'AS/RS classique dispose de composants qu'on retrouve dans la majorité des AS/RS, à quelques éléments près, en voici donc les plus importants :

- Un ensemble d'allées parallèles délimitées par des étagères de stockage de part et d'autre.
- Des machines de stockage/déstockage, nécessaires à la manutention des articles au sein de l'AS/RS.
- Des points d'entrées/sorties, pour le dépôt des articles à stocker et la récupération des articles déstockés.
- Un système de contrôle, de supervision et de commande, assurant le bon fonctionnement du système en plus de l'interfaçage homme-machine, très important à ce niveau d'automatisation.

### **1.2.4 Terminologie :**

Si on considérait la productique comme une spécialité à part entière dans l'ingénierie, on pourrait dire que la manutention est elle aussi un domaine très vaste dans cette spécialité, assez vaste pour englober le monde des AS/RS, d'où le besoin de citer au moins quelques-uns des termes les plus utilisés dans son jargon pour que les sections suivantes soient les plus compréhensibles possible.

- Casier : c'est l'espace tridimensionnel alloué au stockage d'une charge unitaire ou d'un ensemble de charges (Figure 1.1).



**Figure 1.1 : Casier de stockage**

- Colonne : l'ensemble de casiers superposés les uns sur les autres, forment ce qu'on appelle une colonne (Figure 1.2).





Figure 1.2 : Colonnes de casier (au premier plan)

- Rangée : la rangée est constituée de plusieurs colonnes placées les unes derrière les autres, formant par conséquent un ensemble de casiers qui vont délimiter les allées de l'AS/RS (Figure 1.3).



Figure 1.3 : Racks ou rangées de stockage

- Allée : suite à ce qui a été dit précédemment, l'allée est l'espace apparent entre deux rangées parallèles, nécessaire au déplacement de la machine de stockage/déstockage (Figure 1.4).



Figure 1.4 : Une allée séparant deux racks de stockage

- Modules de stockage : ce sont des palettes ou des containers de formes et tailles standardisées qui sont placés dans les casiers, et dans lesquels les articles à stocker sont mis, afin qu'ils soient manipulables par les machines de stockage/déstockage. Les containers peuvent être des boîtes en carton, en plastique ou même en file de fer...
- Machine S/R : la machine de stockage/déstockage (Storage/Retrieval machine, S/R machine) est l'appareil qui procède aux opérations physiques de stockage/déstockage. Dans la majorité des cas la machine dispose de deux degrés de liberté qui lui permettent de se déplacer verticalement et horizontalement afin d'atteindre tous les casiers de la rangée (Figure 1.5), un mécanisme de saisie ou un troisième degré de liberté est généralement ajouté afin que les manœuvres de stockage/déstockage puissent être réalisées.



Figure 1.5 : Une machine de stockage/déstockage

- Les stations d'entrées/sorties : les stations d'entrée/sorties ou stations de dépôt/livraison (Pickup/Delivery station) sont les points par lesquels transitent les articles entrant et sortant de l'AS/RS, c'est en quelque sorte des points « d'interactions » avec le système de transfert externe. La station de dépôt étant le point par lequel une entité à stocker accède à l'AS/RS, et la station de livraison est par contre le point où l'article déstocké est livré. Il se peut selon les cas que ces deux points soient sous forme de deux stations distinctes ou bien qu'ils soient combinés en une seule station.
- Temps de cycle : c'est l'intervalle de temps séparant l'émission d'une demande de transaction de stockage/déstockage et la satisfaction de cette demande (stockage ou livraison du produit) voir Figure 1.6.

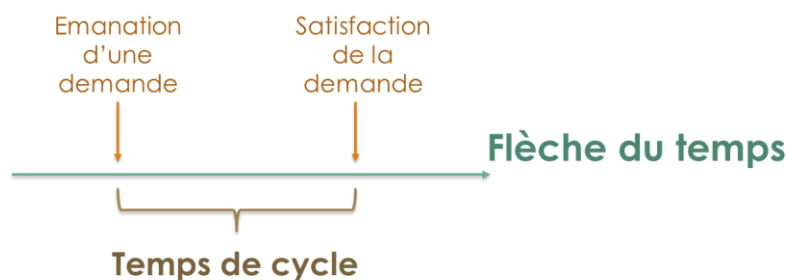


Figure 1.6 : Schéma explicatif du temps de cycle

### **1.2.5 Avantages d'un AS/RS :**

- **Efficiency en espace :** le système de stockage automatisé est plus efficace en espace qu'un stockage classique, de cette manière le gain se fait soit dans l'espace (utilisation de cet espace pour l'ajout de nouvelles chaînes de production) soit dans le nombre d'articles à stocker (Sans ajout de locaux supplémentaires).
- **Amélioration de la gestion des stocks :** le système de contrôle et de gestion permet d'avoir en continu et à chaque instant des informations concernant le nombre d'articles qui se trouvent dans l'AS/RS en plus de leurs dates de réceptions, l'endroit où ils sont stockés et même leurs dates de péremption si elles existent, permettant ainsi que les opérations d'inventaire et de recensement puissent se faire plus rapidement.
- **Temps de réponse moins importants :** comme les transactions de stockage/déstockage sont faites de manière automatisée, dès que l'utilisateur lance l'une de ces deux opérations, le système de commande fait en sorte que les temps de cycles soient les plus courts possible à la faveur de sa connaissance de toutes les informations relatives aux produits.
- **Réduction des stocks :** vu que le système de gestion et de contrôle permet une connaissance précise de tous les articles se trouvant à l'intérieur du système ainsi que toutes les informations qui leur sont relatives, il est possible de combiner ces connaissances avec celles relatives aux commandes et à l'activité de l'entreprise, ce qui permettra de trouver un nombre optimal d'articles (selon une tolérance donnée) qui d'une part protège d'une rupture de stock et d'autre part nous évite un sur-stockage.
- **Réduction de la main d'œuvre :** il est clair que l'utilisation d'un système de stockage/déstockage disposant d'un degré plus ou moins élevé d'automatisation diminue considérablement la main d'œuvre, puisque les tâches autrefois faites par des ouvriers, techniciens ou employés en général, vont être faites par des machines automatisées.
- **Diminution des coûts de fonctionnement :** le fait de disposer de ce type de système décroît de manière considérable les coûts liés à la possession du stock, et cela est dû à la réduction du personnel (comme vu plus haut), la diminution des charges relatives à ce dernier (paye, assurance, congés payés, air conditionné...etc.).
- **Augmentation de la sécurité :** le fait de minimiser l'intervention humaine dans les aires de stockage diminue considérablement les risques d'accidents et d'erreurs de manipulation, de plus ces systèmes se présentent sous forme d'aires autonomes et fermées, augmentant ainsi la sécurité des installations environnantes, et permettant le stockage de produits dits dangereux de manière plus sûre.
- **Réduction de la détérioration :** l'AS/RS disposant de systèmes de contrôle et de logiciels performants permet une grande diminution des déficiences de la gestion classique en rendant les péremptions des produits et leur dépassement technique très rares, en plus de réduire les risques de casse des articles pendant leur manipulation par les employés dans un système non automatisé.
- **Grande flexibilité de fonctionnement :** le système de contrôle dont dispose chaque AS/RS permet à son utilisateur de gérer la grande diversité de produits qui y sont stockés, puisqu'il sait à chaque instant où se situe chaque article, sa date de réception,

son lieu de stockage voire même sa date de péremption, ce qui alloue la possibilité de traiter différents produits sans risque d'erreur, d'où la très grande flexibilité qui qualifie ce genre de système.

### **1.2.6 Inconvénients :**

Nonobstant le fait que les AS/RS disposent d'un grand nombre d'avantages, dont les plus importants ont été cités plus haut, ils affichent quelques lacunes liées à leur caractère « méga-structurel » par rapport aux unités classiques de production.

- Les AS/RS restent des équipements difficilement modifiables, du fait de leur grande complexité et de la rigidité de leur structure.
- L'investissement initial est très élevé, aussi bien que le coût d'un système à 10000 casiers, 5 machine de stockage/déstockage et un convoyeur de 60m, coûterait entre 2 et 3 millions de Dollars US [3][4], et qu'un système de contrôle pour AS/RS vaudrait environ 103000 Dollars US [5][6].

### **1.3 Différents types d'AS/RS :**

Il existe dans la littérature une multitude d'AS/RS, évoqués dans les différents travaux effectués par la communauté scientifique, et appuyés par l'établissement effectif de ces systèmes dans l'industrie d'aujourd'hui. Cette pluralité de systèmes est due à leur différence architecturale, structurelle et à leurs domaines d'applications. Dans ce qui suit nous allons en recenser les plus connus :

#### **1.3.1 Les AS/RS à charge unitaire :**

Les AS/RS à charge unitaire (Figure 1.7) sont des systèmes de stockage conçus pour stocker et déstocker des charges contenues dans des palettes ou des containers standardisés, dont le poids est généralement supérieur à 250 kg. Ce système dispose d'appareils de manutention appelés machines S/R ou machines de stockage/déstockage, ce qui lui permet de manipuler les charges unitaires en son sein, et de les stocker dans les casiers qui leurs sont dédiés après les avoir récupérés dans les stations d'entrées (station de dépôt), ou bien de les déstocker et de les livrer à la station de sortie (station de livraison). Ces machines sont placées sur des rails fixés au sol et au plafond, en plus d'un cadre perpendiculaire à ces rails, sur ce cadre se trouve un plateau, qui lui peut se déplacer verticalement sur ce cadre, et ce même cadre a la possibilité de se déplacer horizontalement grâce aux rails. La combinaison de ces deux mouvements offre la possibilité au plateau (donc à la machine S/R) de se déplacer dans le sens vertical et horizontal, de la même manière qu'une imprimante matricielle, chose qui permettra à ces appareils de manutention d'accéder aux différents casiers qui leur sont alloués. D'un autre côté les mécanismes de saisie des charges unitaires par les machines S/R diffèrent d'un système à un autre, on peut en citer :

- Le système à plateau coulissant : c'est le même principe que le transpalette.
- Le système à ventouse : la charge est accrochée en créant un vide dans des ventouses.
- Le système à aimant : approprié pour les produits en fer et acier. [4]

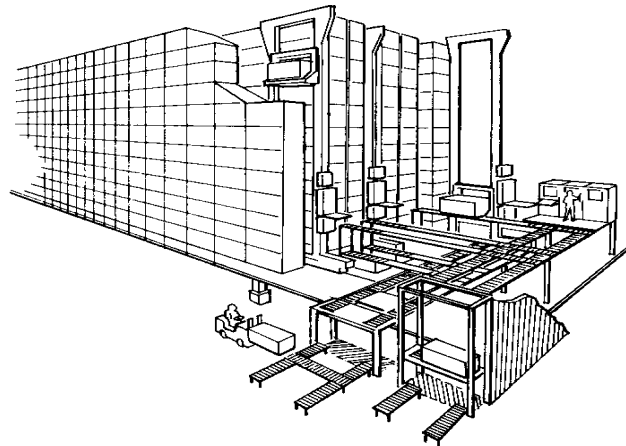


Figure 1.7 : AS/RS à charge unitaire

### 1.3.2 Les AS/RS multi allées :

Ce type d'AS/RS (Figure 1.8) est une variation de l'AS/RS à charge unitaire. Il s'agit toujours de la même architecture, basée sur des allées parallèles délimitées de part et d'autre par des rangées de casiers à travers lesquelles circule la machine S/R, on note toutefois l'apparition d'une allée supplémentaire commune, reliant toutes les allées, dite allée transversale, qui permet à cette machine S/R de changer d'allée au besoin.

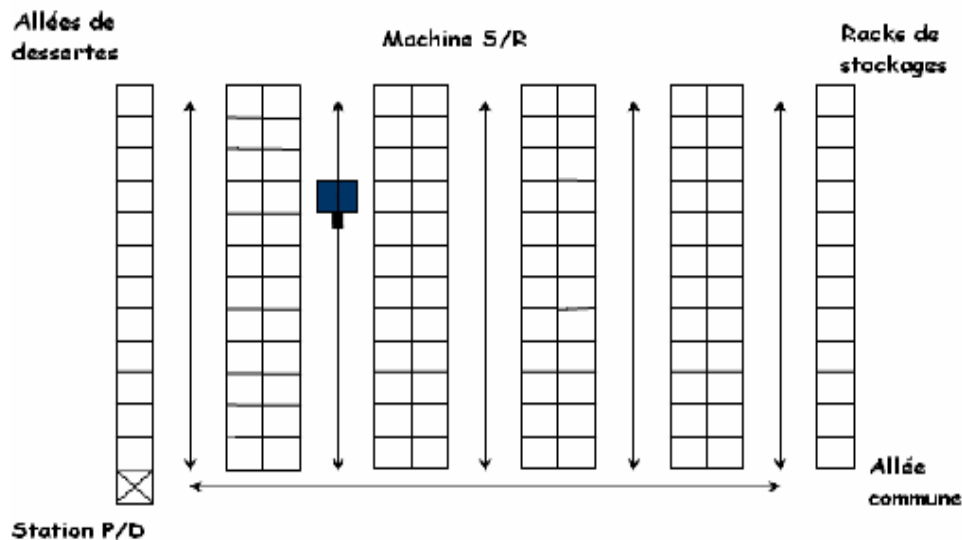


Figure 1.8 : Vue de dessus d'un AS/RS multi-allées

### 1.3.3 Les AS/RS à racks glissants :

Les AS/RS à racks glissant (Figure 1.9) sont similaires aux AS/RS multi allées, sauf qu'ils ne disposent que d'une seule allée de service, cette dernière pouvant se déplacer afin d'offrir un accès à tous les racks du système. Techniquement ce sont les racks qui se déplacent et non pas l'allée de service, puisque ce système –comme son nom l'indique- dispose de racks

glissants, qui coulissent de manière à libérer un espace entre deux casiers mitoyens, ce qui permettra à la machine S/R d'accéder au rack désiré.

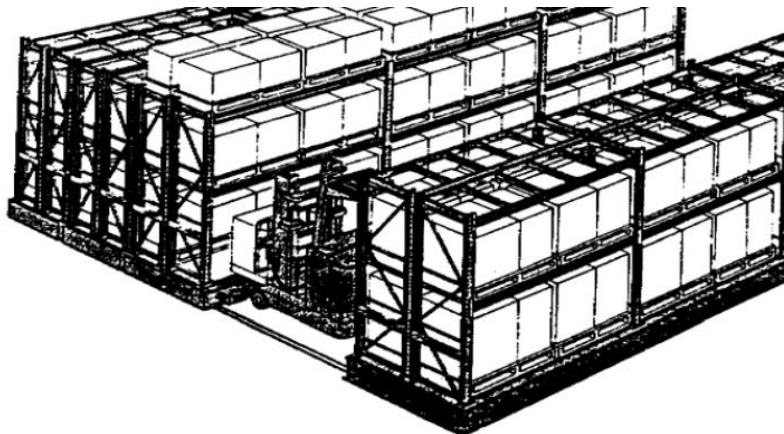


Figure 1.9 : Schéma en 3D d'un AS/RS à racks glissants

#### 1.3.4 Les AS/RS à mini charge :

Ce type de système (Figure 1.10) est utilisé pour stocker de petites charges, telles que les pièces détachées ou les outils. Les charges se présentent sous forme de containers qui contiennent plusieurs petits articles, similaires ou non. Lorsque l'utilisateur manifeste son besoin pour un article ou bien au contraire qu'il veuille le stocker, c'est tout le container qui est manipulé par la machine S/R, et qui est présenté à l'utilisateur, soit pour prendre l'article désiré qui se trouve dedans ou bien y placer l'entité devant être stockée. Ce type de système est utilisé le plus souvent pour le traitement des articles légers, et où l'espace alloué aux aires de stockage est assez réduit, de plus il convient parfaitement lorsque le nombre de transactions de stockage/déstockage n'est ni trop élevé pour nécessiter l'installation d'un AS/RS à charge unitaire, et ni trop faible au point de procéder au stockage manuel, tout en présentant un coût d'investissement relativement faible [4].

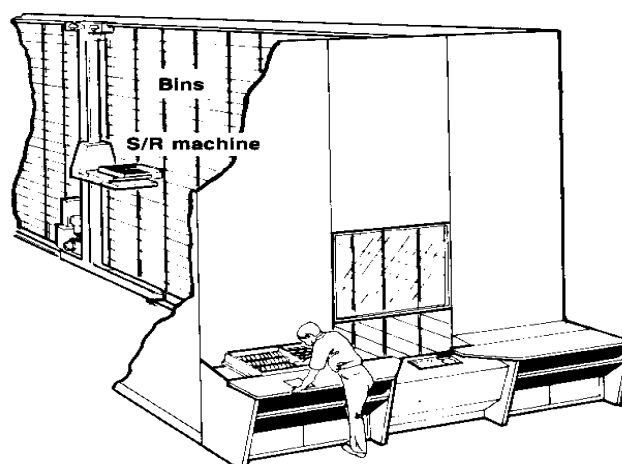


Figure 1.10 : AS/RS à mini charge

### 1.3.5 Les AS/RS à carrousel :

Ces systèmes (Figure 1.11) représentent une architecture assez spécifique, la différence majeure qu'ils représentent, c'est que les casiers qui constituent les racks sont en mouvement. Dans chaque rack, les différents casiers sont montés en carrousel, ce qui leur permet de se déplacer d'une telle manière à ce que tous les casiers puissent arriver chacun à son tour, à l'extrémité du rack via un déplacement horizontal, où l'opération de stockage/déstockage sera réalisée.



Figure 1.11 : AS/RS à carrousel

### 1.3.6 Les AS/RS à personne embarquée :

Les AS/RS à personne embarquée (Figure 1.12) sont des systèmes qui permettent de stocker plusieurs petits produits dans le même casier, ainsi que de faire plusieurs opérations de stockage ou de déstockage en même temps ce qui entraîne un gain de temps conséquent. Ces systèmes disposent d'une plate-forme mobile sur laquelle un opérateur peut prendre place et manipuler les différents articles à traiter. Vu que c'est une personne qui procède aux opérations de stockage/déstockage, il peut y en avoir plusieurs en une seule manœuvre, puisqu'après avoir déstocké les articles correspondants, l'opérateur les charge en une seule fois sur la machine S/R pour livraison. De plus la plate-forme sur laquelle se déplace l'opérateur peut contenir des systèmes de levage automatiques permettant de charger/décharger des produits lourds.

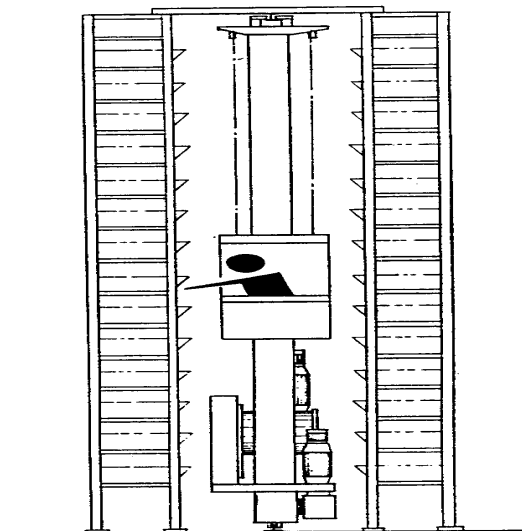


Figure 1.12 : AS/RS à personne embarquée

### **1.3.7 Les AS/RS à étagères profondes :**

Ces systèmes (Figure 1.13) représentent eux aussi une variation des systèmes de stockage/déstockage automatisé à charge unitaire, à la différence près que ces derniers disposent de casiers qui sont capables de contenir plusieurs charges à la fois, et qui par conséquent ont la même adresse. Cette caractéristique permet à ce type de système de contenir un grand nombre de produits (jusqu'à 10 charges [4]), ce qui lui offre une grande densité de stockage du fait de son utilisation maximale de l'espace disponible. De cette manière le stockage se fait d'un côté du casier, alors que le déstockage se fait de l'autre. La machine S/R peut accéder aux produits qui se trouvent en profondeur à l'intérieur d'un casier grâce à des plateaux mobiles qui se déplacent de la machine S/R à l'entrée du casier, permettant par la même occasion un déplacement horizontal des produits. La machine S/R est quasiment la même que celle utilisée dans les AS/RS à charge unitaire, sauf que cette dernière dispose de quelques fonctions en plus, relatives au contrôle des plateaux mobiles.

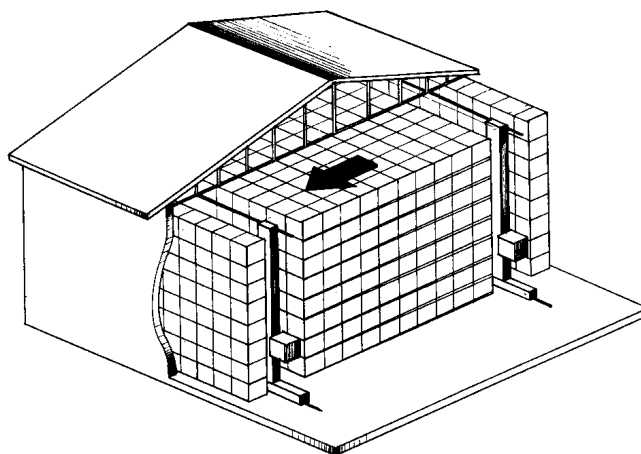


Figure 1.13 : AS/RS à étagères profondes

### **1.3.8 Les AS/RS à convoyeur gravitationnel :**

L'AS/RS à convoyeur gravitationnel (Figure 1.14) est un système assez élaboré du point de vue technique, puisqu'il dispose d'une architecture caractéristique combinant haute densité de stockage, facilité d'accès à tous les articles et un nombre relativement restreint de machine S/R (seulement 2 machines). Il s'agit d'une variante de l'AS/RS à étagère profonde, puisque ce système est composé d'une multitude de racks profonds distribués verticalement et horizontalement, et qui disposent de convoyeurs gravitationnels inclinés en leur sein. Le stockage se fait par l'une des deux faces de l'AS/RS alors que le déstockage se fait par l'autre face, chaque face dispose d'une machine S/R dédiée, soit au stockage ou au déstockage essentiellement, en plus d'un convoyeur de restockage. Chaque produit stocké par la face dédiée au stockage via la machine S/R concernée, glisse à l'intérieur du casier d'un bout à l'autre jusqu'à trouver le produit stocké avant lui ou bien la fin du casier. Alors que lorsqu'on désire atteindre un article qui se trouve en profondeur à l'intérieur d'un casier, il suffit de déstocker un à un les produits qui sont devant lui grâce à la machine S/R de déstockage, de les mettre sur le convoyeur de restockage pour qu'ils atteignent la machine S/R de stockage, afin qu'ils soient re-stockés encore une fois, faisant glisser à chaque fois les articles vers l'extrémité du casier, la



répétition de cette opération conduira à ce que le produit désiré soit accessible pour la machine de déstockage et qu'il soit ainsi déstocké.

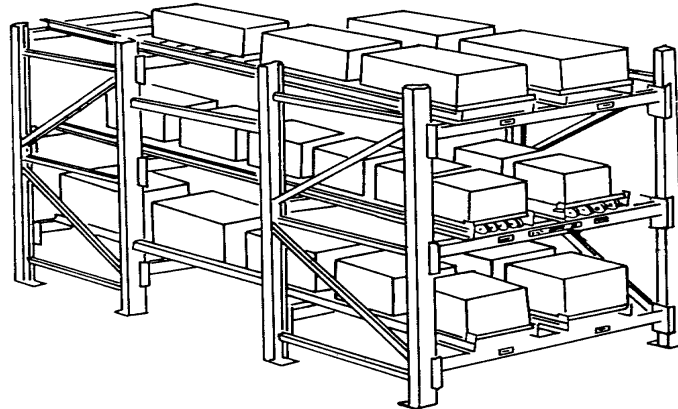


Figure 1.14 : AS/RS à convoyeur gravitationnel

### 1.3.9 Les AVS/RS :

Ce sont des variations des AS/RS classiques, sauf que pour ces derniers, les appareils de stockage/déstockage ne sont pas des grues ou des transstockeurs mais des véhicules autonomes. L'architecture globale ou l'ossature d'un tel système prend la forme dans la majorité des cas d'un AS/RS multi-allées, dans lequel circulent des véhicules autonomes, et qui grâce à des ascenseurs parviennent à atteindre les étages supérieurs du système de stockage. Comme pour les AS/RS, ce type de système dispose de stations de dépôt/livraison et d'un système de contrôle (Figure 1.15).

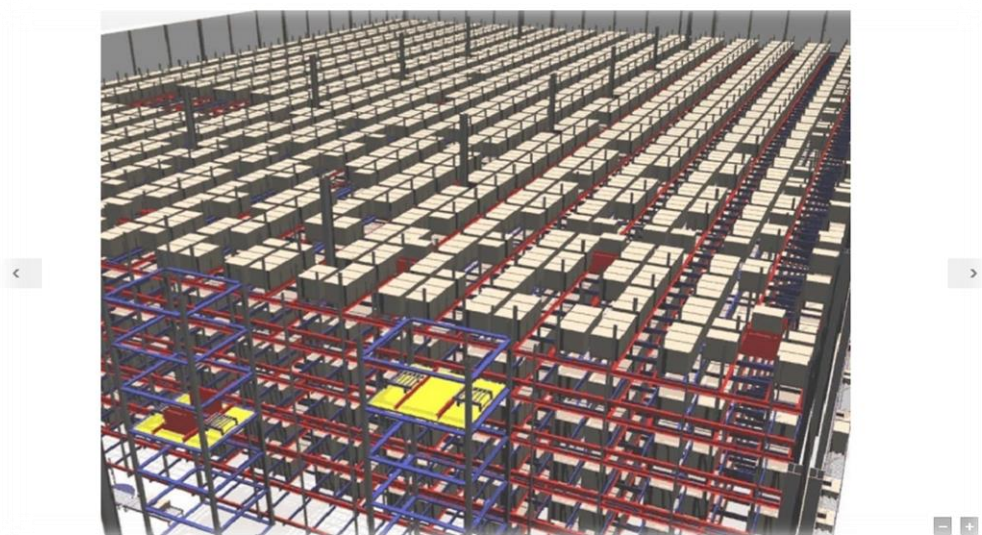


Figure 1.15 : AVS/RS avec en bleu et jaune les ascenseurs

### 1.3.10 L'AS/RS à convoyeur gravitationnel à une seule machine :

Cette variante (Figure 1.16) de l'AS/RS à convoyeur gravitationnel à deux machines, a été introduite dans le domaine des systèmes de stockage automatisés par Sari et Bessnouci en 2012 [7]. La caractéristique principale de ce système, est que ses casiers ne sont pas de forme parallélépipédique, mais ont plutôt la forme d'un U. De plus chaque casier est constitué de deux bacs reliés à leur extrémité assurant cette forme-là. De telle sorte que les opérations de stockage

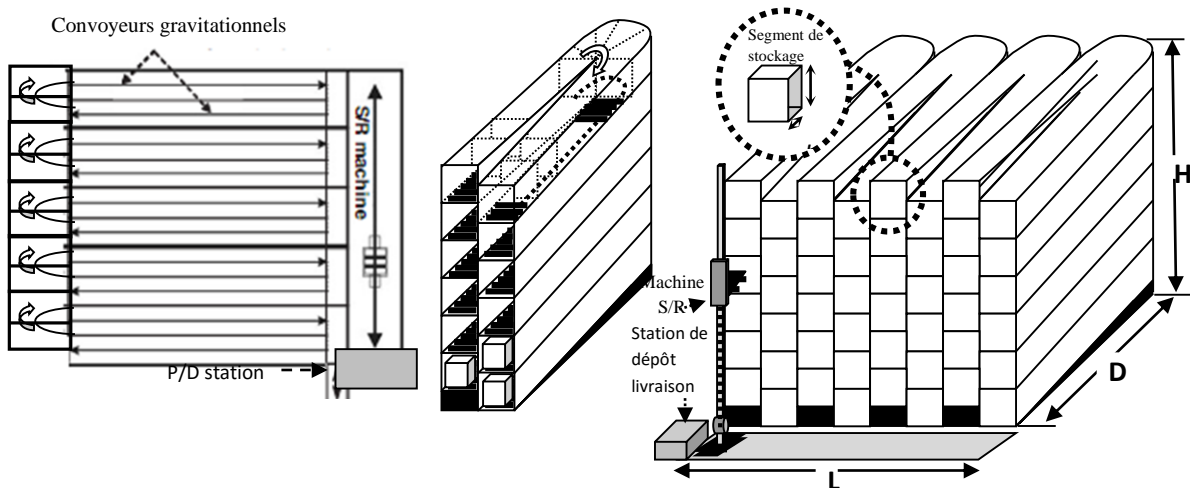


Figure 1.16 : Configuration d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel à une seule machine (vue de haut, une série de casiers superposés et un schéma en 3D)

se font par le bac dédié au stockage et que le déstockage se fait par l'autre bac. Cette structure particulière permet aux articles stockés, de glisser à travers le bac de stockage grâce au convoyeur gravitationnel, de changer de direction une fois arrivés au fond du casier, puis de glisser à nouveau à travers le bac de déstockage jusqu'à rencontrer le produit stocké auparavant ou bien la fin du bac (c'est-à-dire la face du rack dans ce cas-là).

Cette architecture ingénieuse permet le stockage d'une grande diversité d'articles puisque tous sont accessibles d'une manière ou d'une autre, de plus il ne nécessite pas obligatoirement une politique de stockage déterministe puisqu'une politique de stockage aléatoire permet l'utilisation de tout l'espace disponible au stockage tout en équilibrant les charges entre les quatre coins du système. Autre propriété intéressante, c'est la réduction du nombre de machines S/R de deux à une seule en plus de la suppression du convoyeur de restockage, diminuant par conséquent considérablement le coût d'investissement initial et les coûts de maintenance.

### 1.3.11 L'AS/RS à chariots gravitationnels bidirectionnels ou le bi-directional flow-rack AS/RS :

Le dernier système que nous allons exposer est le bi-directional flow-rack, car il s'agit de cet AS/RS que nous avons choisi afin de mener à bien ce projet, les chapitres qui suivront traiteront chacun à sa manière d'un angle d'étude de ce système.

Dans la même famille des AS/RS compacts, on retrouve l'une des toutes dernières innovations en matière de structure de ces systèmes, et qui est le bi-directional flow-rack. Introduit que récemment par Chen et al. [8] à travers une publication dans « International journal of production research ».

Le système en question, mixe entre les deux systèmes à convoyeur gravitationnel précédemment cités, puisqu'il dispose d'un ensemble de casiers superposés, mis côte à côte, et penchés par alternance vers l'une ou l'autre des faces du rack tout en utilisant deux machines différentes de part et d'autre (Figure 1.17). Cette approche architecturale, permet d'une part de garder l'avantage d'un casier en U tout en éliminant le virage en épingle de cheveux, difficile à réaliser d'une manière performante d'un point de vue mécanique (glissement délicat du produit), car ce déplacement de l'article d'un casier vers celui qui lui est appareillé (changement de direction) est effectué par la machine -qui selon les cas est- secondaire.

Cette modification de l'orientation des casiers, et en éliminant le convoyeur de restockage, en comparaison avec un AS/RS à convoyeur gravitationnel classique, le surpasse largement au niveau des performances (temps de cycle) et du coût (acquisition et utilisation), ce qui a été mis en évidence par Chen et al. [8] à travers des modélisations continues des systèmes en introduisant des équations du nombre moyen d'articles bloquants pour un déstockage. Par contre en comparaison avec le système à convoyeur gravitationnel à une seule machine, l'évaluation est plus délicate, puisqu'il s'agit de comparer deux quantités de natures différentes, qui sont coût et temps, mais dont la correspondance peut tout de même être approchée. Car l'avantage du nouveau système est qu'il est plus rapide, mais son inconvénient est qu'il dispose de deux machines contrairement à son prédécesseur (flow-rack à une seule machine), il faudra alors élaborer des modélisations mathématiques traduisant le gain du temps en une grandeur financière afin qu'elle puisse être comparée à la charge d'acquisition et d'utilisation (énergie, maintenance...etc.) d'une seconde machine S/R, chose qui n'a pas été faite dans ce travail, laissant place à d'autres formes de prospection concernant ce système, et qui seront plus détaillées dans les sections qui vont suivre.

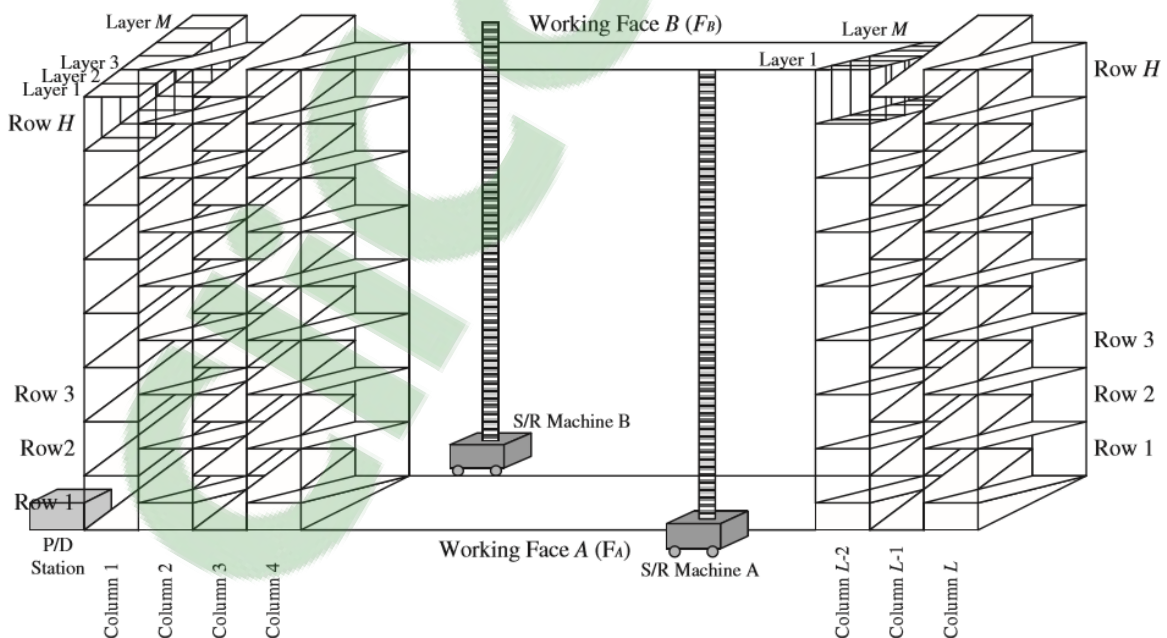


Figure 1.17 : Configuration du bi-directional flow-rack AS/RS

## **1.4 Revue de la littérature :**

En ce qui concerne les AS/RS, l'état de l'art regorge de recherches très variées et de papiers tous aussi intéressants les uns que les autres, puisque pour améliorer la performance des systèmes de stockage automatisés, les chercheurs usent de tous les stratagèmes et font preuve d'une grande ingéniosité, allant de la création de nouveaux systèmes de stockage automatisés à l'optimisation des dimensions d'un AS/RS, en passant par l'élaboration de nouvelles politiques de gestion et de pilotage et à la combinaison ingénieuse des facteurs de performance (règles d'ordonnancement, localisation des points de repos...etc.), tout en évaluant la performance de ces équipements si particuliers en considérant les variations des taux d'utilisation, taux de charge, taux de rotation, temps de cycle...etc.

Dans ce qui va suivre vont être présentés quelques travaux effectués par différents chercheurs dans le monde concernant les AS/RS, mais qui reste un état de l'art très loin de l'exhaustivité. Concernant la détermination des modèles mathématiques et l'optimisation des dimensions des AS/RS, nous citerons une poignée de chercheurs clairsemés dans les quatre coins du monde qui s'y sont intéressés ; Sari et Bessnouci [7] en mettant en place l'AS/RS à convoyeur gravitationnel à une seule machine, ont défini toutes ses caractéristiques, puis ont par la suite développé des modèles mathématiques continus, traduisant les différents temps de cycle d'un tel système avant de les valider par simulation. Sari et Hamzaoui [9], sur le même système, ont quant à eux cherché à trouver les différentes dimensions en segments de stockage de cet AS/RS, qui assurent une optimalité du point de vue des temps de cycle, et en faisant varier à chaque fois le taux de charge et les rapports entre les vitesses horizontales et verticales de l'unique machine S/R, alors que Hamzaoui et Sari [10] dans un autre papier ont essayé de déterminer l'influence de la variation de l'occurrence des simples cycles par rapport aux doubles cycles dans l'activité de l'AS/RS, sur les dimensions optimales. De telles recherches ont démontré que le fonctionnement futur de l'AS/RS n'a pas d'impact extrêmement significatif sur les temps de cycle à condition que les dimensions optimales soient correctement choisies en concordance avec d'autres caractéristiques de l'AS/RS définies en amont de l'utilisation (les vitesses verticales et horizontales de la machine S/R par exemple). Dans la même optique quelques ajouts ont permis le renforcement des résultats précédemment obtenus via une publication internationale Hamzaoui et Sari [11], précédant une autre publication Sari et Hamzaoui [12] dans laquelle une approche discrète du système a été mise en place avant qu'une comparaison ne soit faite avec les modélisations continues préalablement élaborées.

De Koster et al. [13], et Yugang et De Koster [14], ont déterminé les dimensions optimales d'un rack de stockage compact à étagère profonde à trois dimensions, et cela sous différentes politiques de stockage, en utilisant un modèle mathématique qu'ils ont eux-mêmes proposé puis optimisé analytiquement. Kouloughli et al. [15] ont déterminé une région usuelle où les temps de cycles ont des valeurs très proches de l'optimum, cela a été possible grâce à l'utilisation d'un modèle mathématique continu à trois variables avec contraintes. Cela dit quelques changements ont permis la relaxation des contraintes et la réduction de la fonction à une fonction paramétrée à une seule variable. Parikh et Meller [16] ont effectué des recherches sur l'AS/RS à personne embarquée via une modélisation analytique de ce système qui a été développée, en se basant sur des modèles probabilistes et sur des résultats

statistiques des commandes pour une politique de stockage aléatoire. Lerher et al. [17] ont proposé des modèles mathématiques analytiques pour un AS/RS à charge unitaire comportant des casiers à double profondeur, en considérant les conditions réelles de fonctionnement de la machine S/R, en plus des conditions de réarrangement des charges bloquantes lors d'un déstockage (si un article est devant l'article désiré, ce dernier est transporté au casier libre le plus proche avant de déstocker l'article souhaité). Fukunari et Malmborg [18] ont réussi à développer un modèle d'heuristique afin de déterminer les temps de cycles pour un stockage aléatoire. Ghomri et al. [19] ont présenté de nouveaux modèles de temps de cycle (simples et doubles cycles) pour un AS/RS multi-allées, et cela grâce à une approximation continue des allées et de la face du rack. Ces modèles mathématiques furent comparés à d'autres plus compliqués pour validation. Sari et al [20] ont quant à eux fait quelques travaux sur l'AS/RS à convoyeur gravitationnel, et cela en développant des expressions mathématiques modélisant les temps de transfert du système en question, et ce, en se basant sur une approche continue, puis ont été comparés avec des modèles discrets exacts.

D'un autre côté, l'élaboration de politiques de stockage performantes et l'étude de l'influence des différents facteurs de performance représentent une contribution et un apport scientifiques extrêmement bénéfiques, dont les travaux correspondants méritent d'être cités. Chen et al [21] ont procédé à quelques études concernant l'assignement des localisations et le problème d'entrelacement dans un AS/RS avec stockage partagé. Pour arriver à leurs fins ils utilisèrent la méthode de la recherche taboue en essayant d'améliorer la solution à chaque fois pour de moyens et grands problèmes. Sari et al [22], ont pour leur part étudié l'impact des positions du point de repos de la machine S/R et du convoyeur de restockage sur les temps de cycles d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel grâce à des équations mathématiques modélisant les temps de transfert. S'en est suivie une classification des meilleures positions qui minimisent les temps de stockage et de déstockage. Toujours dans les AS/RS à convoyeur gravitationnel, Sari [23] a effectué une étude comparative entre le système de stockage à convoyeur gravitationnel et l'AS/RS à charge unitaire en prenant en compte deux paramètres de comparaison : l'utilisation de l'espace et les temps de cycle. Bessnouci et al [24] ont mis en place un système de contrôle à base de métaheuristiques pour AS/RS à convoyeur gravitationnel, afin d'étudier l'ordonnancement des demandes de déstockage dans le but de minimiser le temps de réponse du système. Concernant la mise en place de politiques de stockage à base de classes, on peut citer les travaux de Meghelli-Gaouar et Sari [25] et de Cardin et al [26]. Pour les premiers, ont été définies des classes pour les produits en fonction de leurs demandes et une subdivision du rack, de telle façon que chaque casier soit affecté au stockage d'une seule classe dans le but de faire diminuer le temps de déstockage. Cependant pour les seconds, ils mirent en place une classe en profondeur pour le stockage, en notant que cette technique donnait de meilleurs résultats qu'une division par classe classique pour le stockage.

Même si les AS/RS restent majoritairement les systèmes de stockage automatisés les plus étudiés, du fait de leur grande diversité, les AVS/RS ne sont pas délaissés pour autant, puisqu'ils représentent une perspective d'avenir très intéressante. Ekren & Heragu [27] ont procédé à une analyse de la régression entre les configurations d'un AVS/RS via une

simulation. Ils développèrent des fonctions mathématiques qui reflètent la relation qui existe entre les variables d'entrée qui sont les facteurs qui déterminent les dimensions du système, et les variables de sortie qui sont cinq mesures de performance. Dans un autre papier Ekren et al [28], essayent de déterminer les effets principaux et les effets d'interaction des points de repos, de la règle d'entrelacement entre transactions de stockage et de déstockage, de la règle d'ordonnancement des files d'attente et des localisations des entrées/sorties sur les temps de cycle et le taux d'utilisation des véhicules et ascenseurs.

### **1.5 Conclusion :**

Ce chapitre avait pour but, d'introduire au domaine des AS/RS ainsi que de se familiariser avec les différents termes et concept de ce jargon particulier. Une multitude de définitions ont été exposées, en plus des AS/RS les plus répandus, et en insistant sur les éléments les plus importants qui les constituent. La revue de la littérature à la fin du chapitre est venue synthétiser de manière globale ce qui a été fait dans ce domaine de recherche.

Dans le chapitre qui va suivre, des modélisations mathématiques du système choisi vont être élaborer. Ce seront des équations mathématiques qui vont traduire le temps moyen théorique que met ce système afin d'effectuer des transactions de stockage ou de déstockage. Deux approches ont été entreprises afin d'y parvenir, les équations de ces deux approches vont être validées via un programme codé sous Matlab, et dont les résultats vont être exposés.

## Chapitre 2

# Modélisation mathématique de l'AS/RS et validation

## Chapitre 2 :

### Modélisation mathématique de l'AS/RS et validation

#### **2.1 Introduction :**

L'étude d'un AS/RS peut se faire de plusieurs manières différentes, selon le type de système concerné ainsi que les résultats recherchés et l'angle action choisi. La mesure des performances d'un AS/RS peut se faire par exemple par rapport à ses temps de cycle, c'est-à-dire voir comment ce système se comporte en régime permanent lorsqu'il est sollicité pour accomplir sa fonction (effectuer des transactions de stockage/déstockage) du point de vue de la rapidité. L'une des techniques utilisées est de procéder à des modélisations mathématiques traduisant le comportement du système. Ce sont des équations qui, selon les mouvements effectués, leurs répétitions et leur probabilité d'occurrence arrive à illustrer de manière abstraite le fonctionnement du système d'un point de vue temporel.

Ce genre d'approches est très important lorsqu'il s'agit de mener des études comparatives entre différents types de systèmes, ou d'évaluer à quel point un investissement est justifié ou justifiable par rapport au gain de temps, ou même en procédant à des optimisations, identifier les politiques de gestion des stocks adéquates ainsi que la disposition géométrique qui satisfait le plus les attentes.

Dans ce chapitre, nous nous proposons de développer des modélisations mathématiques décrivant le comportement de l'AS/RS étudié, qui est le bi-directional flow-rack, du point de vue du temps de cycle. Deux approches distinctes ont été utilisées, l'une est dite discrète et l'autre continue. L'approche discrète est plus fidèle au comportement réel du système, alors que l'approche continue est basée sur des simplifications géométriques facilitant les calculs, mais qui peut en contrepartie faire perdre de sa pertinence à la modélisation.

De cette manière des équations traduisant les temps de cycle du système pour des opérations de stockage et de déstockage vont être exposées. S'en suivra une validation de ces modélisations via un programme codé sous Matlab, qui en générant plusieurs instances, et pour différentes tailles de système, calculera le niveau d'adéquation qui existe entre ces modèles. Les résultats qui en seront tirés vont être exposés, puis commentés, car des informations intéressantes vont pouvoir en être tirées.



## **2.2 Elaboration des modèles :**

### **2.2.1 Notation :**

Nous nous proposons de définir les différentes notations qui vont être utilisées dans les modélisations suivantes afin que la compréhension des différentes étapes et équations puisse se faire de manière aisée (voir Figure...) :

$b$	facteur de forme,
$\rho$	taux de charge,
$T$	facteur de normalisation,
$E(SC)$	temps moyen de simple cycle de stockage,
$E(RC)$	temps moyen de simple cycle de déstockage,
$N_h$	nombre de casiers en hauteur,
$N_l$	nombre de casiers en longueur,
$M$	nombre de segments de stockage dans chaque casier,
$h$	distance en hauteur séparant la station D/L et le casier le plus bas,
$l$	distance horizontale séparant la station D/L et le casier le plus proche,
$d$	décalage en hauteur entre deux casiers appareillés,
$t'_h$	temps nécessaire à un déplacement élémentaire horizontal,
$t'_v$	temps nécessaire à un déplacement élémentaire vertical,
$t'_p$	temps nécessaire à un déplacement entre deux casier appareillés

### **2.2.2 Approche discrète :**

Le temps moyen de stockage/déstockage exact peut être obtenu en sommant les temps de stockage/déstockage de tous les emplacements, et ensuite diviser cette somme par le nombre d'emplacements Bozer [29], à partir de là nous allons construire nos modélisations discrètes pour le stockage et le déstockage dans le système considéré.

Tout d'abord nous considérons les deux faces de notre système comme étant deux matrices de points, et dont chaque point représente un casier, le déplacement unitaire horizontal ou vertical sera tout simplement traduit par l'incrémenter de l'une ou des deux variables modélisant les coordonnées des casiers. Nous nous intéressons uniquement aux temps de cycle des machines, c'est-à-dire que nos équations traduiront des quantités temporelles, de plus le point de dépôt/livraison (qui est en même temps le point de repos des machines) est supposé se

trouver du même côté du rack pour les deux machines (le casier le plus proche pour la machine 1 est celui d'un stockage alors que pour la machine 2 est celui d'un déstockage).

### 2.2.2.1 Le stockage :

Notre système comporte deux machines identiques, qui dans le cas d'un stockage, travaillent d'une manière totalement indépendante, ce qui est équivalent à une station comportant deux machines en parallèle. Dans ce cas le temps d'un simple cycle de stockage pour le système est égale à la moitié de la moyenne des temps de cycle de chaque machine.

Si  $E(SC)_{Machine\ 1}^D$  était le temps nécessaire pour la machine 1 pour faire un stockage, et  $E(SC)_{Machine\ 2}^D$  le temps nécessaire pour la machine 2 pour procéder à un stockage, la moyenne serait :

$$E(SC)_m^D = \frac{E(SC)_{Machine\ 1}^D + E(SC)_{Machine\ 2}^D}{2} \dots (1)$$

Suivant le raisonnement précédent, le temps de cycle pour un stockage pour tout le système sera la moitié de la moyenne :

$$E(SC)^D = \frac{E(SC)_m^D}{2} \dots (2)$$

Après avoir eu une approche globale du système, nous nous penchons maintenant sur chacune des machines afin de modéliser précisément ces temps de déplacements.

Pour un stockage, afin d'atteindre un casier dont les coordonnées sont  $(i + 1; j + 1)$ , une machine doit tout d'abord traverser la distance qui la sépare horizontalement et verticalement du casier le plus proche puis ensuite faire  $i$  déplacements horizontaux et  $j$  déplacement verticaux. D'un autre coté pour un déstockage, chaque machine ne peut atteindre qu'une colonne sur deux pour effectuer cette transaction. Finalement les déplacements d'une machine pour un stockage se résume à un aller-retour entre le point de dépôt/livraison et le casier choisi.

On obtient le temps de cycle moyen de la première machine en calculant la moyenne de toutes les manœuvres possibles :

$$E(SC)_{Machine\ 1}^D = \frac{2}{NhNl} \sum_{i=0}^{\frac{Nl}{2}-1} \sum_{j=0}^{Nh-1} 2\max(2it'_h + l; h + d + jt'_v)$$

De la même manière nous calculons celui de la deuxième machine :

$$E(SC)_{Machine\ 2}^D = \frac{2}{NhNl} \sum_{i=0}^{\frac{Nl}{2}-1} \sum_{j=0}^{Nh-1} 2\max((2i+1)t'_h + l; h + d + jt'_v)$$

Afin de simplifier notre modélisation, on suppose que le point de repos des machines se situe horizontalement au niveau du casier le plus bas du système, d'une telle manière nous aurons  $h = 0$ , et que la distance séparant chaque machine et le casier le plus proche et la même qui sépare les casiers entre eux, nous aurons donc  $l = t'_h$ , par conséquent les modèles se simplifiant deviennent :

$$E(SC)_{Machine\ 1}^D = \frac{2}{NhNl} \sum_{i=0}^{\frac{Nl}{2}-1} \sum_{j=0}^{Nh-1} 2\max((2i+1)t'_h; d + jt'_v)$$

$$E(SC)_{Machine\ 2}^D = \frac{2}{NhNl} \sum_{i=0}^{\frac{Nl}{2}-1} \sum_{j=0}^{Nh-1} 2\max(2(i+1)t'_h; d + jt'_v)$$

A partir des équations (1) et (2) nous obtenons :

$$E(SC)^D = \frac{2}{4NhNl} \sum_{i=0}^{\frac{Nl}{2}-1} \sum_{j=0}^{Nh-1} 2\max((2i+1)t'_h; d + jt'_v) + 2\max(2(i+1)t'_h; d + jt'_v)$$

D'un autre côté on remarque que :

$$\begin{aligned} & \sum_{i=0}^{\frac{Nl}{2}-1} \sum_{j=0}^{Nh-1} 2\max((2i+1)t'_h; d + jt'_v) + 2\max(2(i+1)t'_h; d + jt'_v) \\ &= \sum_{j=0}^{Nh-1} 2\max((t'_h; h + d + jt'_v) + 2\max(2t'_h; d + jt'_v) \\ &+ 2\max((3t'_h; d + jt'_v) + 2\max(4t'_h; d + jt'_v) + \dots \\ &+ 2\max(((Nl-1)t'_h; d + jt'_v) + 2\max(Nlt'_h; d + jt'_v) \end{aligned}$$

Par conséquent la première somme peut se simplifier donnant alors :

$$\begin{aligned} & \sum_{i=0}^{\frac{Nl}{2}-1} \sum_{j=0}^{Nh-1} 2\max((2i+1)t'_h; d + jt'_v) + 2\max(2(i+1)t'_h; d + jt'_v) = \\ & \sum_{i=1}^{Nl} \sum_{j=0}^{Nh-1} 2\max(it'_h; d + jt'_v) \end{aligned}$$

Et finalement :

$$E(SC)^D = \frac{1}{NlNh} \sum_{i=1}^{Nl} \sum_{j=0}^{Nh-1} \max(it'_h; d + jt'_v) \dots (A)$$

### 2.2.2.2 Le déstockage :

Nous avons que pour un déstockage, les deux machines parfois travaillent indépendamment et d'autres fois travaillent ensemble. Lorsque l'article désiré se trouve en première position dans l'un des casiers, la machine concernée travaille toute seule de manière indépendante. Par contre lorsque le produit à déstocker ne se trouve pas en première position, les deux machines travaillent ensemble, l'une procède au déstockage du produit à proprement dit (en plus de déplacer les produits bloquants), et la seconde effectue le transfert des produits d'un casier à un autre afin que l'article désiré puisse être accessible pour la machine concernée.

Le temps moyen de déstockage exact peut être obtenu en sommant les temps de déstockage de tous les emplacements, et ensuite diviser cette somme par le nombre d'emplacements Bozer [29] comme indiqué précédemment.

Le temps de transport des machines S/R dépend de la configuration du rack, de la capacité de stockage et du nombre de produits stockés. Pour déstocker un produit se trouvant dans une couche donnée, tous les produits le précédant dans le même casier seront déstockés puis stockés directement dans le casier qui lui est appareillé.

Le calcul du temps de déstockage pour tout le système en régime permanent peut se calculer comme suit :

$$E(RC)^D = \frac{1}{2} (E(RC)_{Machine1}^D + E(RC)_{Machine2}^D) \dots (B)$$

$E(RC)_{Machine1}^D$  Etant le temps de déstockage que met en moyenne la machine 1.

$E(RC)_{Machine2}^D$  Etant le temps de déstockage que met en moyenne la machine 2.

Comme nous avons vu auparavant, lorsque l'article désiré se trouve en première position, les machines travaillent en parallèle, c'est-à-dire que le temps de déstockage du système en général en régime permanent est égal à la moitié des temps de cycle de chaque machine, comme par exemple lorsqu'il s'agit de deux machines travaillant en parallèle, si le temps de fonctionnement de la première est de 2 UT et de la seconde est de 3 UT, la durée opératoire de tout le système en régime permanent est égale à la moitié de la moyenne 1.25 UT.

De cette manière nous avons :

$$E(RC)_{Machine1}^D = \frac{2}{NlNh} \sum_{i=0}^{\frac{Nl}{2}-1} \sum_{j=0}^{Nh-1} \left\{ \frac{1}{m_{2(i+1);j+1}} \left( \frac{[2 \max(2(i+1)t'_h; jt'_v)]}{2} + \sum_{k=2}^{m_{2(i+1);j+1}} 2 \max(2(i+1)t'_h; jt'_v) + 2(k-1) \max(t'_h; d) \right) \right\}$$

La quantité  $2 \max(2(i+1)t'_h; jt'_v)$  est réduite de moitié, car elle représente le temps de cycle de la machine lorsqu'il s'agit du déstockage d'un produit se trouvant en première position, parce que dans le système dans sa vision globale et en régime permanent elle est amenée à être réduite de moitié comme expliqué précédemment.

$$E(RC)_{Machine1}^D = \frac{2}{NlNh} \sum_{i=0}^{\frac{Nl}{2}-1} \sum_{j=0}^{Nh-1} \left\{ \frac{1}{m_{2(i+1);j+1}} \left( \frac{[2 \max(2(i+1)t'_h; jt'_v)]}{2} + \sum_{k=1}^{m_{2(i+1);j+1}-1} 2 \max(2(i+1)t'_h; jt'_v) + 2.k. \max(t'_h; d) \right) \right\}$$

En simplifiant :

$$E(RC)_{Machine1}^D = \frac{2}{NlNh} \sum_{i=0}^{\frac{Nl}{2}-1} \sum_{j=0}^{Nh-1} \left\{ \frac{\max(2(i+1)t'_h; jt'_v)}{m_{2(i+1);j+1}} + \frac{2(m_{2(i+1);j}-1) \max(2(i+1)t'_h; jt'_v)}{m_{2(i+1);j+1}} + \frac{[2(m_{2(i+1);j+1})(m_{2(i+1);j+1}-1) \max(t'_h; d)]}{m_{2(i+1);j+1}} \right\}$$

Alors :

$$E(RC)_{Machine1}^D = \frac{2}{NlNh} \sum_{i=0}^{\frac{Nl}{2}-1} \sum_{j=0}^{Nh-1} \left\{ \frac{\max(2(i+1)t'_h; jt'_v)}{m_{2(i+1);j+1}} + \frac{2(m_{2(i+1);j}-1) \max(2(i+1)t'_h; jt'_v)}{m_{2(i+1);j+1}} + 2(m_{2(i+1);j}-1) \max(t'_h; d) \right\}$$

Donc :

$$E(RC)_{Machine1}^D = \frac{2}{NlNh} \sum_{i=0}^{\frac{Nl}{2}-1} \sum_{j=0}^{Nh-1} \left\{ \frac{\max(2(i+1)t'_h; jt'_v)}{m_{2(i+1); j+1}} - \frac{2\max(2(i+1)t'_h; jt'_v)}{m_{2(i+1); j+1}} + \right.$$

$$\left. 2\max(2(i+1)t'_h; jt'_v) + 2(m_{2(i+1); j+1} - 1) \max(t'_h; d) \right\}$$

$$E(RC)_{Machine1}^D = \frac{2}{NlNh} \sum_{i=0}^{\frac{Nl}{2}-1} \sum_{j=0}^{Nh-1} \left\{ 2\max(2(i+1)t'_h; jt'_v) \right.$$

$$\left. - \frac{\max(2(i+1)t'_h; jt'_v)}{m_{2(i+1); j+1}} + 2(m_{2(i+1); j+1} - 1) \max(t'_h; d) \right\}$$

De la même manière nous calculons  $E(RC)_{Machine2}^D$  :

$$E(RC)_{Machine2}^D = \frac{2}{NlNh} \sum_{i=0}^{\frac{Nl}{2}-1} \sum_{j=0}^{Nh-1} \left\{ 2\max((2i+1)t'_h; jt'_v) - \right.$$

$$\left. \frac{\max((2i+1)t'_h; jt'_v)}{m_{2i+1; j+1}} + 2(m_{2i+1; j+1} - 1) \max(t'_h; d) \right\}$$

Donc selon l'équation (B) :

$$E(RC)^D = \frac{1}{NlNh} \sum_{i=0}^{\frac{Nl}{2}-1} \sum_{j=0}^{Nh-1} \left\{ 2\max(2(i+1)t'_h; jt'_v) - \frac{\max(2(i+1)t'_h; jt'_v)}{m_{2(i+1); j+1}} \right.$$

$$\left. + 2(m_{2(i+1); j+1} - 1) \max(t'_h; d) + 2\max((2i+1)t'_h; jt'_v) \right.$$

$$\left. - \frac{\max((2i+1)t'_h; jt'_v)}{m_{2i+1; j+1}} + 2(m_{2i+1; j+1} - 1) \max(t'_h; d) \right\}$$

De la même manière que pour la simplification faite dans l'expression du temps de cycle de stockage :

$$E(RC)^D = \frac{1}{NlNh} \sum_{i=1}^{Nl} \sum_{j=0}^{Nh-1} \left\{ 2\max(it'_h; jt'_v) - \frac{\max(it'_h; jt'_v)}{m_{i;j+1}} \right. \\ \left. + 2(m_{i;j+1} - 1) \max(t'_h; d) \right\} \dots (B)$$

$$\text{où } \sum_{i=1}^{N_l} \sum_{j=1}^{N_h} m_{ij} = [\rho.N] \approx \rho.N$$

### 2.2.3 Approche continue :

Nous avons vu que la modélisation discrète était la plus fidèle au comportement réel du système, cela dit nous pouvons toujours avoir recours à la modélisation continue, qui selon les cas peut s'avérer très pertinente, chose qui peut faciliter la mise en place d'optimisation mathématique ou tout autre investigation nécessitant des procédures de calcul. Nous allons donc nous pencher sur cette autre approche afin de modéliser notre système.

Dans une approche continue, on suppose que les deux faces du rack sont une surface regroupant une infinité de points, de telle sorte que chaque point peut être le siège d'une transaction de stockage ou déstockage. Dans Bozer and White [29], dans l'étude d'un AS/RS à charge unitaire, il a été démontré que le temps moyen que met une machine S/R pour aller de son point de repos (dans l'un des coins du rack) vers n'importe quel autre point de la face du rack est :

$$E(V_1) = \frac{T}{2} \left( \frac{b^2}{3} + 1 \right) \dots (3)$$

Ce modèle reste vrai pour notre système, nous allons donc à partir de là construire notre modélisation des temps de cycle de stockage et de déstockage.

#### 2.2.3.1 Le stockage :

Lorsqu'il s'agit d'une transaction de stockage simple, les seuls mouvements effectués dans cette approche, sont celui d'un aller (de la station D/L jusqu'au casier de stockage) et d'un retour (du casier de stockage à la station D/L), et puisque tous des points pouvant être le siège de la transaction font partie de l'infinité des points de la surface du rack, le trajet entre le point de départ et d'arrivée est approximé par l'équation (3), par conséquent un stockage simple peut être modélisé comme suit :

$$E_{Machine\ 1}^C(SC) = E_{Machine\ 2}^C(SC) = 2E(V_1)$$

$$E_{Machine\ 1}^C(SC) = E_{Machine\ 2}^C(SC) = T \left( \frac{b^2}{3} + 1 \right)$$

D'autre part, comme nous l'avons mentionné auparavant, de la même manière que pour la modélisation discrète, suivant (1) et (2) :

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

### 2.2.3.2 Le déstockage :

Contrairement aux opérations de stockage, un déstockage nécessite des manœuvres supplémentaires de la part des deux machines de stockage lorsque le produit devant être déstocké ne se trouve pas en première position. De plus, chaque machine n'est pas sollicitée seulement lorsqu'un déstockage la concerne, puisqu'elle est utilisée même lorsque la transaction concerne la seconde machine afin de procéder au transfert des produits d'un casier à un autre. Il est donc nécessaire que ceci soit pris en considération lors de la modélisation, puisqu'en régime permanent, cette utilisation doit être comptabilisée comme étant un temps d'utilisation.

Afin que la modélisation soit faite de manière claire nous allons introduire les différents temps des différentes manœuvres de chaque machine au fur et à mesure de la modélisation.

Tout d'abord, le déstockage comporte un aller au début de la transaction et un retour à la fin, le tout est égal à la quantité  $2E(V_1)$ .

En second lieu, la position de l'article recherché définit le nombre de déstockages et de stockages successifs à effectuer pour que le produit désiré soit accessible, et donc du nombre d'allers-retours entre deux casiers appareillés, le temps moyen d'une telle manœuvre est traduit par la moyenne arithmétique de tous les temps que peut nécessiter cette opération.

- Pour un produit en première position le temps nécessaire est :

$$E(\text{Restockage}) = 0$$

- Pour un produit en deuxième position le temps nécessaire est :

$$E(\text{Restockage}) = 2t'_p$$

- Pour un produit en troisième position le temps nécessaire est :

$$E(\text{Restockage}) = 4t'_p$$

- Pour un produit en position m le temps nécessaire est :

$$E(\text{Restockage}) = 2(m - 1)t'_p$$

- Le temps moyen nécessaire est :



$$E(V_2) = \frac{1}{(M' - 1)} \sum_{m=2}^{M'} 2(m - 1)t'_p$$

Où  $M'$  est le nombre de produits se trouvant dans le casier

Nous avons maintenant le temps que met en moyenne la machine pour aller de la station D/L jusqu'au casier souhaité et revenir, et aussi le temps qu'elle met pour procéder au déstockage, maintenant ce qu'il manque, c'est le comportement du système globalement et la relation entre les deux machines, leurs interactions, et la traduction de cela sur le comportement du système en régime permanent. Nous avons vu auparavant que lors d'un déstockage les machines ne travaillent de manière indépendante que lorsqu'il s'agit d'un déstockage simple (article en première position), à ce moment le système sera considéré comme étant une station à deux machines parallèles, il suffit donc tout simplement que pour ce cas le temps nécessaire à cette opération soit divisé par deux, à la fin tout sera comptabilisé sous la forme d'une moyenne arithmétique simple sur toutes les positions possibles du produit dans le casier (selon le remplissage du système).

Tout d'abord le temps de fonctionnement du système en régime permanent pour un déstockage simple sera :

$$E^C_1(RC) = \frac{1}{4} (E^C_1(RC)_{Machine\ 1} + E^C_1(RC)_{Machine\ 2})$$

Puisqu'il ne s'agit que d'un aller-retour :

$$E^C_1(RC)_{Machine\ 1} = E^C_1(RC)_{Machine\ 2} = 2E(V_1)$$

Donc :

$$E^C_1(RC) = E(V_1) = \frac{T}{2} \left( \frac{b^2}{3} + 1 \right) \dots (4)$$

Où  $E_1(RC)_{Machine\ 1}$  et  $E_1(RC)_{Machine\ 2}$  le temps de déplacement pour le déstockage d'un produit en première position des machine 1 et 2 respectivement.

D'un autre côté le temps moyen de fonctionnement du système pour le déstockage d'un article se trouvant à la  $i$  ème position avec  $i > 1$  :

$$E^C_i(RC) = 2E(V_1) + E(V_2)$$

Donc :

$$E^C_i(RC) = T \left( \frac{b^2}{3} + 1 \right) + \frac{1}{(M' - 1)} \sum_{m=2}^{M'} 2(m - 1)t'_p$$

$$E^C_i(RC) = T \left( \frac{b^2}{3} + 1 \right) + M' t'_p \dots (5)$$

Comme expliqué plus haut le temps de fonctionnement moyen du système pour le déstockage de n'importe quel article :

$$E^C(RC) = \frac{1}{M'} \sum_{i=1}^{M'} E^C_i(RC)$$

De (4) et (5) :

$$E(RC) = \frac{1}{M'} (E^C_1(RC) + \sum_{i=2}^{M'} E^C_i(RC))$$

$$E^C(RC) = \frac{1}{M'} \left( \frac{T}{2} \left( \frac{b^2}{3} + 1 \right) + (M' - 1) \left( T \left( \frac{b^2}{3} + 1 \right) + M' t'_p \right) \right)$$

En on obtient :

$$E^C(RC) = \frac{T}{M'} \left( \frac{b^2}{3} + 1 \right) \left( \frac{2M' - 1}{2} \right) + (M' - 1) t'_p$$

Nous avons que  $M' = \rho M$  où  $\rho$  est le taux de charge du système, de cette manière l'équation devient :

$$E^C(RC) = \frac{T}{\rho M} \left( \frac{b^2}{3} + 1 \right) \left( \frac{2\rho M - 1}{2} \right) + (\rho M - 1) t'_p \dots (D)$$

Maintenant que toutes nos modélisations ont été établies (équations (A), (B), (C) et (D)), nous allons les faire valider les unes par rapport aux autres. Cela va se faire en mettant en place un programme sous Matlab qui va se charger de la simulation.

### **2.3 Simulation et validation :**

Dans ce qui va suivre nous parlerons de la simulation qui a été faite afin de valider les équations continues par rapport aux modélisations discrètes qui, elles, sont plus fidèles au comportement réel du système. Pour se faire un programme sous Matlab a été implémenté comme mentionné plus haut. Ce dernier aura pour mission de générer différentes instances qui, selon le taux de charge du système, le rempliront de manière aléatoire. S'en suivra le calcul des temps de cycle pour chaque instance en utilisant les modélisations discrètes afin que ces résultats puissent être comparés aux approximations qu'offrent les équations continues.

Nous avons choisi 24 configurations de système pour 3 tailles différentes, le tout est résumé dans le Tableau 2.1 :

**Tableau 2.1: Configurations du système utilisées lors de la simulation**

Taille du système	$N_l$	$N_h$	M	Facteur de forme
400	33	3	4	0,09090909
400	12	8	4	0,66666667
400	9	11	4	0,81818182
400	10	10	4	1
400	3	17	8	0,17647059
400	13	4	8	0,30769231
400	5	10	8	0,5
400	7	7	8	1
2000	4	50	10	0,08
2000	25	8	10	0,32
2000	10	20	10	0,5
2000	14	14	10	1
2000	3	17	40	0,17647059
2000	5	10	40	0,5
2000	6	8	40	0,75
2000	7	7	40	1
10000	15	80	8	0,1875
10000	50	25	8	0,5
10000	30	40	8	0,75
10000	35	35	8	1
10000	40	5	50	0,125
10000	10	20	50	0,5
10000	13	15	50	0,86666667
10000	14	14	50	1
10000	5	20	100	0,25
10000	15	7	100	0,46666667
10000	9	12	100	0,75
10000	10	10	100	1

Le choix de ces configurations a été fait d'une telle manière à ce que nous aillions d'une part trois gabarits différents pour notre système, et d'autre part aussi quatre facteurs de forme différents, sans oublier la profondeur des casiers.

**Tableau 2.2 : Résultats de la simulation pour les configurations allant de 1 à 4**

M = 4	E(RC)			
$\rho \downarrow$	b = 0,0909	b = 0,6666	b = 0,8181	b = 1
1	0,181341	2,625177	3,992065	3,610216
0,9	1,922679	4,192927	5,507632	5,218027
0,85	3,128876	5,229928	6,620623	6,300029
0,8	4,523855	6,376339	7,84002	7,483516
0,75	6,016382	7,886162	9,185216	8,810569
0,7	7,500334	9,309347	10,485025	10,261085
0,6	11,188296	12,45769	13,809751	13,525906
0,5	15,260887	16,285827	17,517629	17,115898
0,4	19,056711	19,771077	20,865463	20,638718
0,3	21,442744	21,243711	22,583079	22,396583
E(SC)→	0,021788	0,738809	2,731092	3,718943

**Tableau 2.3 : Résultats de la simulation pour les configurations allant de 5 à 8**

M=8	E(RC)			
$\rho \downarrow$	b=0,1764	b=0,3076	b=0,5	b=1
1	3,718943	1,039501	4,285714	3,501734
0,9	4,084628	1,321957	4,757305	3,90685
0,85	4,456156	1,603499	5,070278	4,100935
0,8	4,758878	1,945299	5,420243	4,495101
0,75	5,251843	2,355022	5,855264	4,968211
0,7	5,692784	2,683865	6,346734	5,342364
0,6	7,039789	3,972072	7,649774	6,552871
0,5	9,069579	5,910694	9,59487	8,567774
0,4	11,870117	8,604609	12,476714	11,337918
0,3	16,327446	13,298854	16,827981	15,552279
E(SC)→	4,643629	0,025465	5,084746	2,372685

Tableau 2.4 : Résultats de la simulation pour les configurations allant de 9 à 12

M=10	E(RC)			
$\rho \downarrow$	b=0,08	b=0,32	b=0,5	b=1
1	1,620827	0,717781	2,593387	2,224373
0,9	1,910154	0,966979	2,891208	2,510226
0,85	2,096489	1,138407	3,086169	2,698047
0,8	2,32177	1,344611	3,312335	2,917288
0,75	2,58489	1,583566	3,573804	3,175945
0,7	2,902067	1,873671	3,891776	3,480114
0,6	3,771074	2,68557	4,742196	4,30927
0,5	5,141898	3,990532	6,085146	5,623935
0,4	7,487009	6,257602	8,329676	7,858956
0,3	11,658341	10,311562	12,300018	11,792185
E(SC)→	1,826484	0,072605	2,796174	1,462626

Tableau 2.5 : Résultats de la simulation pour les configurations allant de 13 à 16

M=40	E(RC)			
$\rho \downarrow$	b=0,1764	b=0,5	b=0,75	b=1
1	1,622269	1,578106	1,429956	1,237693
0,9	1,752398	1,718533	1,560399	1,351314
0,85	1,825035	1,798221	1,634524	1,415885
0,8	1,903667	1,884992	1,715732	1,486564
0,75	1,988899	1,980509	1,805078	1,564204
0,7	2,081616	2,085867	1,904012	1,650465
0,6	2,297221	2,3347	2,138561	1,855171
0,5	2,566415	2,654701	2,442684	2,121011
0,4	2,922163	3,086623	2,85854	2,486016
0,3	3,450949	3,727496	3,480332	3,040299
E(SC)→	4,643629	5,084746	3,984064	2,372685

Tableau 2.6 : Résultats de la simulation pour les configurations allant de 17 à 20

M=8	E(RC)			
$\rho \downarrow$	b=0,1875	b=0,5	b=0,75	b=1
1	1,054217	0,647413	1,336939	1,198481
0,9	1,522588	1,096417	1,786926	1,64753
0,85	1,846724	1,414332	2,101351	1,962792
0,8	2,233609	1,793123	2,48043	2,341745
0,75	2,694565	2,242673	2,931385	2,782734
0,7	3,238939	2,786191	3,460494	3,320475
0,6	4,701691	4,210933	4,882874	4,739797
0,5	6,860813	6,343855	6,996446	6,865075
0,4	10,137598	9,620608	10,207734	10,079503
0,3	15,123177	14,578323	15,128908	14,992805
E(SC)→	1,057771	0,136027	0,996735	0,660028

Tableau 2.7 : Résultats de la simulation pour les configurations allant de 21 à 24

M=50	E(RC)			
$\rho \downarrow$	b=0,125	b=0,5	b=0,8666	b=1
1	0,113841	1,142006	1,000557	0,931395
0,9	0,128172	1,233018	1,08365	1,009084
0,85	0,135695	1,283614	1,125769	1,052485
0,8	0,143428	1,338118	1,180182	1,09931
0,75	0,151284	1,39717	1,230087	1,150226
0,7	0,159867	1,461407	1,294356	1,205902
0,6	0,181157	1,610348	1,433421	1,335953
0,5	0,212536	1,796407	1,608956	1,500291
0,4	0,26574	2,040375	1,84231	1,719804
0,3	0,384137	2,393119	2,183364	2,043108
E(SC)→	0,007893	2,796174	1,914414	1,462626

Tableau 2.8 : Résultats de la simulation pour les configurations allant de 25 à 28

M=100	E(RC)			
$\rho \downarrow$	b=0,25	b=0,4666	b=0,75	b=1
1	0,749391	0,303958	0,632002	0,555197
0,9	0,81832	0,333244	0,693254	0,609452
0,85	0,857577	0,349941	0,728409	0,640602
0,8	0,900659	0,368293	0,767244	0,675043
0,75	0,948289	0,388653	0,810418	0,713361
0,7	1,001213	0,411387	0,858742	0,756289
0,6	1,127208	0,465971	0,975097	0,85988
0,5	1,289842	0,537731	1,128224	0,996579
0,4	1,508472	0,63645	1,339382	1,185847
0,3	1,820546	0,782804	1,650459	1,466628
E(SC)→	3,738318	0,268555	2,919708	1,885993

Après quelques heures de calcul, la simulation donna un ensemble de résultats, qui ont été condensés et résumés dans les tableaux allant du Tableau 2.2 jusqu'au Tableau 2.8. Ce qui est exposé dans ces tableaux sont en fait les erreurs ou différences en pourcentage qui existent entre les modélisations discrètes et continues dont le calcul a été préalablement expliqué.

Ce qu'il est remarquable directement en regardant ces tableaux, c'est que les erreurs relatives à E(SC) ne réquisitionnent qu'une seule ligne. Et cela est dû au fait que les opérations de stockage ne sont pas fonction du taux de charge du système, puisque quel que soit le taux de remplissage du système un stockage dans n'importe quel casier prendra toujours le même temps. De ce fait une seule comparaison par configuration est nécessaire, ce qui explique pourquoi cette valeur change seulement lorsque le facteur de forme change (qui lui change à chaque configuration différente). D'autre part le calcul des différences pour le déstockage est nécessaire lors du changement du taux de charge, car il est clair que le déstockage d'un article ne prendra pas le même temps pour un système plein et un système vide.

En ce qui concerne les résultats numériques de cette simulation, nous allons tout d'abord nous intéresser à ceux relatifs au stockage. Dans un premier lieu, on remarque que plus M diminue plus l'erreur diminue, ce qui est équivalent à dire que plus la face du rack est grande plus les modélisations discrètes et continues se rapprochent, chose qui était attendue puisque plus la face du rack grandit plus sont assimilation à une infinité de points est cohérente, ce qui peut être vérifié en comparant par exemple 1,462626 % et 2,372685% (Tableaux 2.4 et 2.5) qui pour une même taille du système et des facteurs de forme identiques mais pour un M différent donnent des erreurs différentes. Outre cette remarque, il est à noter aussi que pour des facteurs de forme petits mais associés à des cas où  $N_l$  est supérieur à  $N_h$  cette erreur chute considérablement.

Parallèlement à ces remarques, nous nous intéressons aussi au comportement de ces modèles pour les transactions de déstockage, lors de la variation des tailles du systèmes, de leurs configurations et du taux de charge.

Premièrement, pour de petits systèmes (Tableau 2.2 et 2.3) l'erreur semble plus importante, et augmente avec la diminution du taux de charge, puisque plus le système se vide moins l'approximation  $M\rho \approx M'$  (ou  $m$  lorsqu'il s'agit d'une modélisation discrète) est précise. Cela dit plus la taille du système augmente moins la variation de  $\rho$  influe négativement sur la concordance entre les deux modèles. Un autre point important mérite d'être souligné, puisque contrairement aux modèles du stockage, ceux du déstockage se rapproche plus lorsque  $M$  augmente, car cette augmentation contre balance l'effet de la diminution du taux de charge sur l'approximation précédemment citée (Tableaux 2.7 et 2.8 en comparaison avec Tableau 2.6).

## **2.4 Conclusion :**

Il a été donc question de l'étude théorique de ce nouveau système de stockage automatisé, du point de vue des temps de cycle et des différentes approche existantes. Cela dit, aucune procédure d'optimisation ni d'étude du comportement de cet AS/RS n'a été faite. Le travail s'est principalement axé sur la modélisation et la vérification de l'adéquation en fonction de paramètres, comme la taille du système et le taux de charge par exemple. Des conclusions en ont été tirées, et le terrain est à présent préparé pour de futurs travaux.

Dans le prochain chapitre, nous aborderont le volet de la réalisation de cet AS/RS, plus précisément de la partie commande, qui regroupe le logiciel de gestion et de commande et puis aussi le circuit de contrôle. Il sera question d'expliquer le fonctionnement de ces deux éléments ainsi que de la liaison qui leur permet de communiquer.



# Chapitre 3

## Réalisation de la partie commande de l'AS/RS

## Chapitre 3

### Réalisation de la partie commande de l'AS/RS

#### **3.1 Introduction :**

Les chapitres précédant ont fait un état des lieux concernant le domaine du « material handling », ou plus précisément des systèmes de stockage/déstockage automatisés, en précisant au passage les différents types de ces systèmes, leurs composants ainsi qu'une brève revue de la littérature, puis nous nous sommes focalisé sur l'un de ces systèmes, en procédant à une étude théorique de ce dernier, la clôturant par une validation à travers l'outil informatique.

Ces équipements si particuliers qui sont le sujet de notre étude, sont venus résoudre un grand nombre de problèmes liés à l'organisation interne des entreprises, mais aussi, à fortiori, bien d'autres relevant de la dynamique existante entre l'entreprise et son environnement extérieur, avec lequel elle interagit, et qui sans lequel sa définition même n'aurait pas de sens. De ce fait, prendre en compte l'aspect systémique dans la gestion d'une entreprise est primordial, voire même vital, il faut donc procéder à un raisonnement en intramuros mais aussi en extramuros afin d'évaluer les performances d'une telle entité, qui est l'entreprise, industrielle soit elle ou de service.

En ayant cette pensée dans l'appréciation d'une entreprise et des éléments qui la constituent, en plus de l'environnement qui l'entoure, il apparaît clairement que la possession de cette technologie (les AS/RS) seule n'a pas plus de sens qu'être en pole position avec le plus puissant des bolides sans avoir son permis. Chose qui fait de la connaissance managériale dans la gestion d'un AS/RS un élément primordial.

La science a donc réussi à résoudre un problème technique qui relève de la gestion des stocks en introduisant les AS/RS dans l'industrie, d'un autre côté afin de permettre la performance de l'aspect organisationnel et managérial indispensable à ce type de système, il est nécessaire de mettre au point des outils permettant que cette activité soit des plus performantes. Car il faut l'avouer la mise en place des AS/RS dans l'industrie a entraîné une grande complexité dans la gestion des stocks, d'où l'indispensabilité de l'existence de systèmes informatiques aidant le savoir-faire humain dans sa fonction. Et c'est justement au niveau de ce chaînon primordial que nous voulons agir grâce à notre dispositif.

Les troisième et quatrième chapitres, exposent le travail fait au niveau de la réalisation de l'AS/RS choisi, cependant, ce chapitre s'intéresse à la partie commande de ce dernier, car comme on vient de le préciser cet élément est primordial quant à la bonne utilisation de ce système. Ce qui nous a poussé à élaborer avec soin chaque partie de l'unité de commande, que cela s'agisse du programme de gestion qui offre plusieurs avantages tout en étant facile d'utilisation, ou même du circuit de commande et de sa simplicité. Dans ce qui va suivre une brève description du dispositif va entamer ce chapitre avant que des explications plus poussées ne soient exposées.

### **3.2 Description du dispositif :**

Le dispositif qui a été mis en place, est, comme expliqué plus haut, ce qui fera office de partie commande du système. Il s'agit tout d'abord d'une interface utilisateur, à travers laquelle on pourra commander et interagir avec l'AS/RS, et qui se chargera aussi de la gestion des données relatives aux articles stockés. En plus du circuit de commande, qui se compose principalement d'un microcontrôleur. Il est donc question de deux parties distinctes qui sont la partie logicielle et matérielle qui constituent la commande de notre système, nous allons dans ce cas présenter plus en détail chacune de ces deux parties.

#### **3.2.1 Partie logicielle :**

Il s'agit d'un programme informatique muni d'une interface graphique qui permet une utilisation facile et rapide. Ce dernier a été codé en C#, puisque ce langage est d'un niveau assez élevé pour permettre une programmation simplifiée, et d'un autre côté assez bas, permettant plus de flexibilité et un accès aux ressources de l'ordinateur (port RS232). Ce programme permet en plus de commander l'AS/RS, une gestion des articles stockés, et offre des avantages par rapport aux temps de cycles de déstockage et dates de péremption.



Figure 3.1 : Illustration de l'interface graphique du Flow-Rack Manager

Ce logiciel a été principalement inspiré de celui développé est présenté dans un travail de licence en productique par Hamzaoui et Baba Ahmed et qui a fait l'objet d'une communication internationale [30], en étant adapté au système traité dans ce projet de fin d'études de master, et totalement recodé, nous l'avons nommé Flow-Rack Manager (Figure 3.1).

### 3.2.1.1 Description des différents modules du Flow-Rack Manager :

Le Flow-Rack Manager est un programme modulaire, il offre à l'utilisateur un ensemble de modules avec un code de couleur permettant de procéder aux opérations souhaitées. Chaque module est donc dédié à accomplir des fonctions bien distinctes, nous allons donc les énoncer un à un en expliquant leurs caractéristiques en détails.

a) Le module « STOCKER » :

Ce module (Figure 3.2), comme son nom l'indique, servira à l'utilisateur pour stocker des produits, les champs à remplir sont : « Nom du produit » à choisir, « Code produit » selon une codification désignée par l'utilisateur, et enfin « N° » qui est le numéro incrémental au cas où il y aurait plusieurs produits identiques en nom et en code. En second lieu on choisit la « Date de péremption » dans le calendrier qui s'affiche, puis on sélectionne le type de stockage désiré, soit selon un choix aléatoire du casier de stockage, ou bien selon le casier de stockage désiré. A ce moment-là, le programme va procéder à un ensemble de vérifications dans la base de données, il va d'abord chercher si le produit existe déjà (Identique en nom, code et numéro incrémental) dans ce cas, l'utilisateur est informé de l'existence d'un produit dont les identifiants sont similaires, ce dernier doit donc les changer. Et dans un deuxième temps, le logiciel procédera à une vérification relative à l'emplacement du produit si la formule « Stocker en choisissant l'emplacement » a été choisie, et avertit l'utilisateur si cet emplacement est libre ou non, si tout se passe bien le logiciel informera l'utilisateur de l'ajout du produit.

The screenshot shows the 'STOCKER' module interface. It features a green header with the title 'STOCKER' in white. The main area contains several input fields: 'Nom:' with a text box, 'Code:' with a text box, and 'N°:' with a spinner box showing '0'. Below these is a date picker showing 'mercredi 11 mai 2016'. There are two buttons: 'Stockage dédié' and 'Stockage Aléatoire'. Below the buttons are two more input fields labeled 'NI:' and 'Nh:'. At the bottom, there is a long empty text box.

Figure 3.2 : Illustration du module STOCKER

Une fois la saisie des informations terminée, le programme procédera à un travail d'actualisation de la base de données, en ajoutant le produit en question, et fera aussi appel au port COM de l'ordinateur afin d'envoyer les informations relatives à la transaction en question et à l'emplacement du produit, nous verrons comment cela se fait plus en détails dans la section qui lui est dédiée.

b) Le module « DESTOCKER » :

Par opposition au premier, ce module (Figure 3.3) permettra de déstocker des produits, d'une manière extrêmement simple. Ce dernier se divise en deux parties ; pour la première (celle du haut) il suffit d'entrer le « Code produit » ainsi que le « N° » (Numéro incrémental) et d'appuyer sur le bouton « Déstocker ». Cependant, cela permet de déstocker un produit en particulier d'une manière presque « passive », la seule réflexion que le programme aura à faire, sera sur l'existence du produit dans le système, car dans le cas où ce dernier n'apparaît pas dans la base de données, l'utilisateur en est averti.

Par contre la seconde partie de ce module offre à l'utilisateur un déstockage intelligent, qui rompt avec la passivité de la précédente. A ce niveau l'utilisateur n'introduit que le « Nom » du produit à déstocker (Le nom va définir dans la très grande majorité des cas un ensemble de produits identiques dispersés aux quatre coins de l'AS/RS), puis à l'appui du bouton correspondant, le logiciel va choisir soit le produit qui assure le temps de déstockage le plus court, ou bien celui dont l'échéance de péremption est la plus proche, tout dépend du choix de l'utilisateur.

Si tout se passe bien, dans tous les cas le programme procédera à la suppression du produit concerné de la base de données, et appellera encore une fois le circuit de commande, qui procédera à son tour à la traduction de ces instructions.

The image shows a software interface for the 'DESTOCKER' module. It has a dark red background with white text and buttons. The title 'DESTOCKER' is at the top in a large, bold, white font. Below the title, there are two input fields: 'Code:' followed by a white text box, and 'N°:' followed by a white spinner box showing the number '0'. Below these is a white button with the text 'Déstocker'. A horizontal dashed white line separates this section from the one below. The second section is titled 'Nom:' in white. Below it is a white text input field. Underneath the input field are two white buttons: 'Selon date de péremption' and 'Selon temps de cycle'. At the bottom of the interface is a large, empty white rectangular area.

Figure 3.3 : Illustration du module DESTOCKER

c) Le module « RECHERCHER » :

Ce module (Figure 3.4) est un module « Violet » qui contrairement aux « Verts » et « Rouges » qui affectent et provoquent une actualisation de la base de données (Les premiers y rajoutent des produits en procédant au stockage, les seconds en retranchent en procédant au déstockage), n'effectue aucun changement dans la base de données et ne communique pas avec le dispositif matériel.

Le module « RECHERCHER », permet de rechercher tous les produits du même « Nom », et dont la codification est différente bien sûr (Soit au niveau du Code soit au niveau du numéro incrémental), et les affiche, chacun suivi de son « Code », « N° » incrémental et date de péremption.



Figure 3.4 : Illustration du module RESCHERCHER

d) Le module « ALERTE PEREMPTION » :

Comme pour le module « RECHERCHER » ce dernier (Figure 3.5) n'agit pas sur la base de données et ne procède à aucune communication avec le dispositif électronique, mais permet d'obtenir la liste exhaustive de tous les produits périmés, en plus de ceux à qui il reste moins d'une semaine pour être périmés, et cela en lançant l'alerte péremption en appuyant sur le bouton « Lancer ».



Figure 3.5 : Illustration du module ALERTE PEREMPTION

C'était brièvement une description des différents modules du Flow-Rack Manager ainsi que de leurs différentes caractéristiques, nous allons maintenant expliquer comment se fait la transmission d'informations du logiciel vers le circuit de contrôle.

### 3.2.1.2 Processus de communication :

Puisque notre partie commande se compose d'une partie logicielle et d'une autre matérielle comme expliqué plus haut, il faut bien qu'il y ait une communication entre elles, cette section est justement dédiée à l'explication du processus de transfert d'information qui se fait à ce niveau.

Tout d'abord lorsque l'utilisateur sollicite l'un des modules « Vert » ou « Rouge », et après que l'interaction soit faite avec l'humain et que les manipulations nécessaires soient faites sur la base de données, une codification de la transaction à effectuer est faite, et cette codification est la partie la plus importante du processus de communication.

La transaction est codifiée en un sorte de vecteur linéaire, dont chaque élément a une signification bien particulière (Figure 3.6).

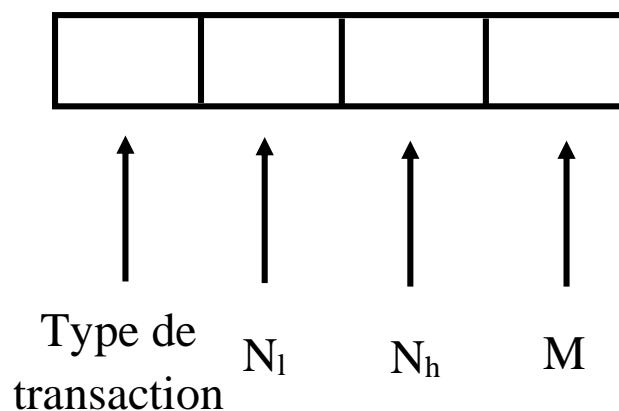


Figure 3.6 : Illustration du vecteur de codification

Comme illustré dans la Figure 3.6, le premier élément désigne le type de transaction, il est clair que les trois suivant ont une grande importance puisqu'ils désignent l'endroit où la transaction se déroule, mais le premier élément du vecteur est la clé qui permet la traduction des données informatiques en mouvement physique par la suite, et cela d'une manière extrêmement simplifiée, le tout étant résumé dans le Tableau 3.1.

**Tableau 3.1 : Signification des caractères envoyés vers le circuit de commande**

Caractère à envoyer	Interprétation du circuit de commande
S	Stockage simple
D	Déstockage simple
P	Déstockage complexe (machine principale)
A	Déstockage complexe (machine secondaire)

L'envoi de ce vecteur (chaîne de caractères) se fait via un protocole RS232, cela dit au niveau du branchement pour l'ordinateur ce seront les ports USB de ce dernier qui vont être utilisés, puisqu'une émulation sera faite afin de les faire passer pour des ports COM, cette émulation sera expliquée dans la section dédiée à la partie matérielle qui va suivre.

### **3.2.2 Partie matérielle :**

Nous avons vu de quoi s'agissait la partie logicielle plus ou moins en détail, avant d'aborder le mode de communication qui va permettre la transmission de données de cette dernière vers la partie matérielle. Il ne reste donc plus qu'à aborder la description du dernier maillon de la chaîne afin que toute la partie commande soit assimilée.

Pour notre circuit de commande nous avons choisi d'utiliser une carte Arduino, et plus précisément une Arduino UNO.

#### **3.2.2.1 La carte Arduino :**

Une carte Arduino est le nom que porte la carte électronique programmable issu du projet Arduino. Ce projet a été mis en place par les développeurs Massimo Banzì, David Cuartiles, Tom Igoe, Gianluca Martino, Mellis et Nicholas Zambetti, qui en plus de la carte ont programmé un environnement de développement intégré (IDE) gratuit permettant l'utilisation de cette carte à tous, qui est de plus compatible avec tous les systèmes d'exploitation.

La Figure 3.7 illustre une carte Arduino UNO utilisé comme circuit de contrôle de la partie commande, nous avons choisi quelques composants de celle-ci afin de les identifier et mettre en évidence leur importance.



### 3.2.2.2 Principaux composants de la carte :

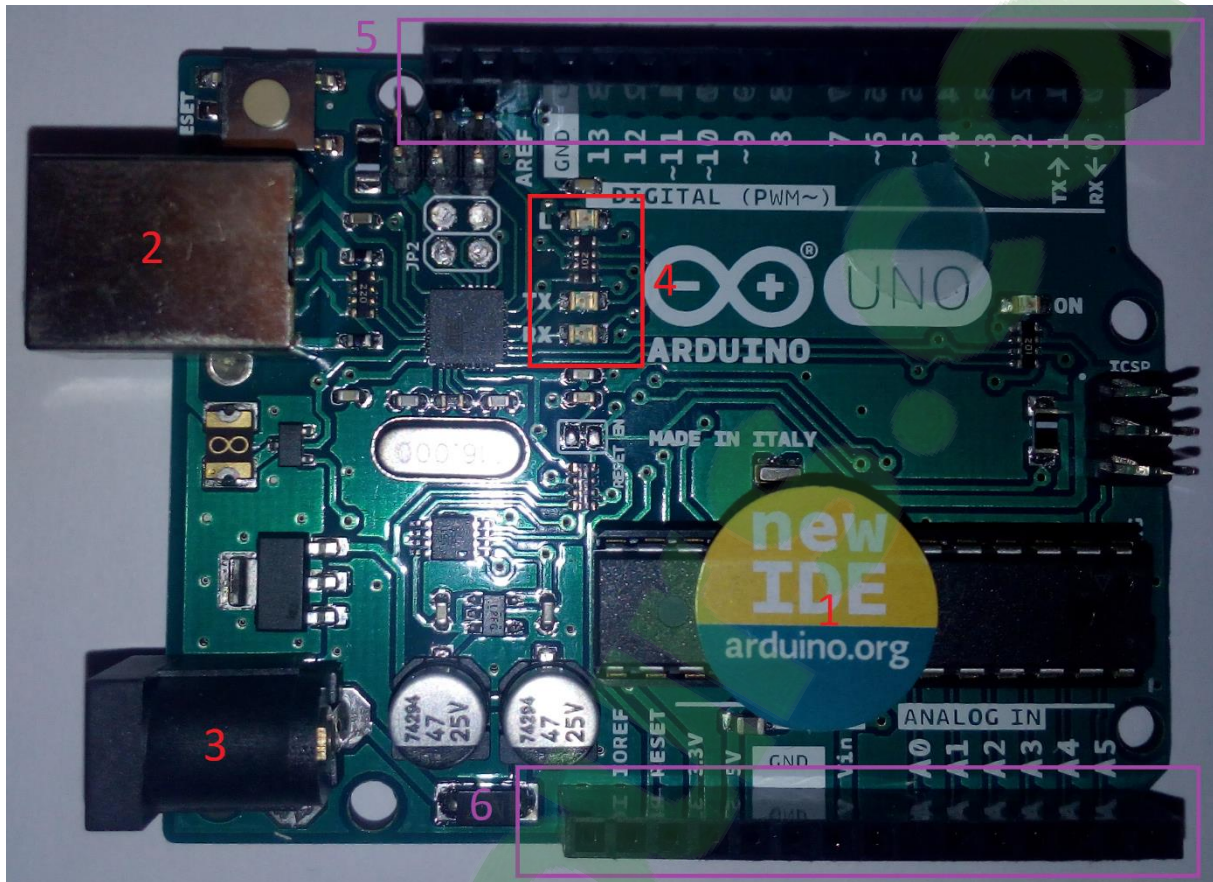


Figure 3.7 : Illustration de la carte Arduino UNO utilisée

#### 1) Le microcontrôleur :

C'est le cerveau du dispositif Arduino, c'est lui qui va stocker le programme que nous allons lui injecter et puis l'exécuter afin de réaliser les opérations pour lesquelles on l'aura programmé.

#### 2) Le Port USB

C'est l'un des ports de communication de la carte Arduino (en plus du RS232 que l'on peut mettre en place via les pins numérique 0 et 1 à travers un MAX232, sans oublier qu'elle dispose aussi de la liaison I2C). Ce port sera utilisé pour programmer notre carte, mais aussi pour communiquer avec l'ordinateur (RS232 émulée en USB), et enfin chose très importante ce port suffit pour alimenter le dispositif en 5V.

#### 3) L'alimentation :

Si on n'a pas l'intention de brancher la carte avec un ordinateur à plein temps, et qu'elle est dédiée à travailler de manière indépendante, on peut toujours utiliser une alimentation externe de 5V à brancher ici (Voir 3 dans la Figure 3.7)

#### 4) LEDs de visualisation :

La LED du haut, est une LED qui est reliée au microcontrôleur, et qui sert à vérifier le bon fonctionnement du matériel. Cette dernière clignote quelques secondes après le branchement de la carte avec un ordinateur via le port USB. Cette dernière est reliée à la broche 13, et permet de savoir si la carte répond au moins aux sollicitations de base (Mettre au niveau haut la sortie 13 lors de la réception d'un caractère ou lorsque l'une des broches déclarées comme entrée est vraie par exemple).

Par contre les deux LEDs du bas, servent à visualiser la communication RS232 ou port série (émulée en USB), puisque l'une s'allume lors de l'envoi de données (TX) et l'autre lors de la réception de données (RX).

#### 5) La connectique :

Afin que la carte Arduino puisse traduire l'exécution de son programme dans l'environnement extérieur elle doit être connectée à d'autres composants externes, comme par exemple des LEDs, des moteurs, des capteurs, d'autres cartes ...etc. Et pour se faire elle utilise la connectique en sa possession (ce qui est encadré en violet), les « 5 » sont des entrées/sorties numériques, alors que les « 6 » sont des entrées/sortie analogiques, en plus des pins relatifs à l'alimentation de la carte ou à la délivrance de tension (les pins POWER). On peut aussi y connecter différents « Shields », comme le « Shield Wifi », « Shield Ethernet », « Shield pour moteur pas à pas » ...etc.

#### 6) L'émulation de la communication série :

Comme nous l'avons mentionné auparavant, la communication entre le PC et la carte Arduino se fait via un protocole RS232, qui est en fait émulé en USB. Cela a pu être effectué grâce à un petit composant se trouvant sur la carte et qui est le « ATMEGA16U2 » (encadré en bleu dans la Figure 3.8). Cette émulation nous facilite les choses dans le sens où le branchement physique se fait sur USB alors que la transmission effective des données, et la sollicitation de la communication via le programme de gestion en C# et le programme du microcontrôleur se fait pour un protocole RS232. Nous évitant ainsi des branchements supplémentaires (en utilisant les pins numérique « 0 » et « 1 ») et de faire appel à un composant de plus qui est le MAX232.

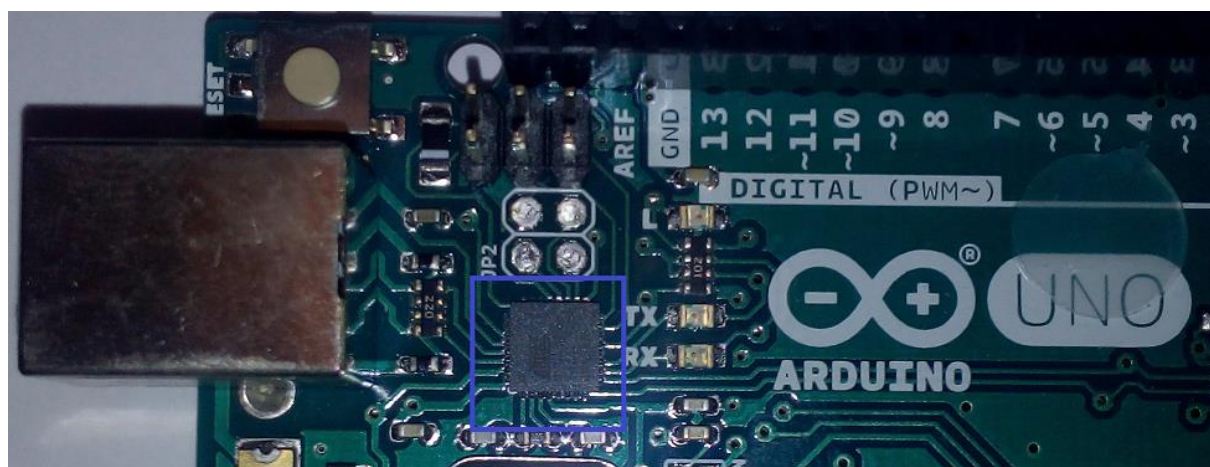


Figure 3.8 : Illustration montrant le composant responsable de l'émulation de la communication série

7) L'IDE d'Arduino :

Arduino dispose d'un IDE totalement gratuit, et d'une communauté d'utilisateurs très importante, qui, via des milliers de forums d'entre-aide permet de développer l'utilisation de cette solution technologique et de la rendre accessible à tous. L'IDE d'Arduino est très simple d'utilisation, de plus il est compilé en JAVA, ce qui permet son utilisation sur différents systèmes exploitations.

8) Le langage d'Arduino :

Le langage d'Arduino est basé sur le langage C/C++. Concernant sa structure il dispose de deux fonctions de base qui sont « void `setup()` » qui est dédiée aux déclarations des entrées/sorties et des protocoles de communication entre autres, et « void `loop()` » dans laquelle se trouve très généralement le programme principal, cette dernière est une boucle qui s'exécute continuellement lorsque la carte est mise sous tension. En plus de cela ce langage est riche en structure de contrôle, en variable et fonctions prédéfinies ...etc. Le fait que ce langage s'apparente au C/C++ facilite beaucoup la programmation de ce dispositif, chose qui a largement contribué à la démocratisation de l'utilisation de ce microcontrôleur, contrairement à la programmation en  $\mu$ C ou en langage assembleur qui est assez lourde.

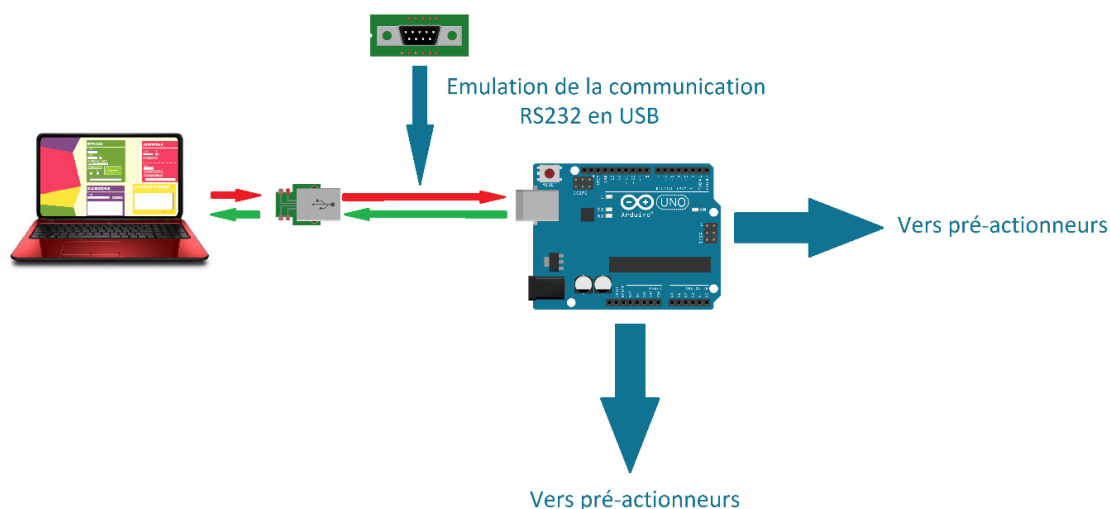


Figure 3.9 : Illustration synthétisant le fonctionnement de la partie commande

### 3.3 Conclusion :

Pour conclure, ce chapitre a exposé l'essentiel du travail accompli dans l'élaboration de la partie commande de notre système, décrivant le programme de gestion et de commande en passant par le protocole de communication et le codage de l'information, avant d'arriver aux circuits de contrôle, l'ensemble du dispositif a été résumé dans le schéma de la Figure 3.9.

Dans le dernier chapitre, nous continuerons dans la même lancée, en abordant le volet opératif. Puisqu'il s'agira de mécanique, d'électronique, et d'électrotechnique, il sera question de la

structure du rack, ainsi que de la fabrication des machines S/D, qui viendra clôturer ce qui fût accompli pendant cette réalisation pratique.

**Clicours.COM**

# Chapitre 4

## Réalisation de la partie opérative de l'AS/RS

## Chapitre 4 :

### Réalisation de la partie opérative de l'AS/RS

#### **4.1 Introduction :**

L'introduction de nouveaux systèmes de stockage automatisés de plus en plus performants et de plus en plus innovants en jouant sur leur architecture globale ou leur disposition, est l'une des approches les plus en vogue dans le domaine du « material handling », afin de rendre l'industrie toujours plus performante, plus rapide, flexible, adaptative et surtout évolutive afin qu'elle puisse certes s'adapter à la fulgurance des changements économiques mais tout en s'améliorant.

Cependant, une fois ce concept mis sur la table, sa réalisation reste une tout autre histoire, car l'adaptation de cet équipement et de ses caractéristiques à ce qui est technologiquement possible, n'est pas une mince affaire. La réalisation ne peut se faire qu'après le passage par des bureaux d'études et de méthodes, d'ingénieurs chevronnés, qui feront en sorte qu'il puisse voir le jour de la meilleure des manières possible.

Dans le chapitre qui va suivre, nous proposons des solutions effectives qu'elles soient d'ordre mécanique ou électrotechnique pour la réalisation d'un AS/RS à chariots gravitationnels (bi-directional flow-rack) et cela selon les moyens qui étaient en notre disposition, il a été question de voir plusieurs options et alternatives ainsi que plusieurs solutions technologiques, chose qui va être bien expliquée par la suite. Après avoir donc expliqué comment s'est fait l'élaboration de la partie commande du système, nous allons exposer tout ce qui concerne la partie opérative ainsi qu'une brève synthèse du tout.

#### **4.2 Description du système et identification de ses principaux organes :**

L'architecture de ce système a été brièvement décrite dans le premier chapitre, il a été question de parler des concepteurs de cette architecture particulière ainsi qu'à quoi se résumait le travail qu'ils avaient accompli concernant ce système, résumé dans leur papier cité dans ledit chapitre. Maintenant, nous allons exposer les différents composants que comporte ce système,

ou plus précisément les principaux organes de ce dernier, mais seulement de la manière dont nous nous le sommes représenté et que nous avons choisi pour le réaliser physiquement.

Ce système reste un AS/RS compact, ce qui veut dire qu'il dispose d'un rack compact dans lequel se trouvent les différents articles stockés, le rack est donc un organe principal de ce système. Les palettes qui circulent dans ce rack et qui contiennent nos articles sont elles aussi particulières, assez particulières pour que nous leur réquisitionnions un paragraphe afin d'expliquer ce qui les sort du lot et pourquoi elles ont été faites de cette manière.

En second lieu, viennent les principaux composants de ce système, qui sont nos deux robots, qui vont procéder aux opérations de stockage et de déstockage, saisir déplacer et livrer nos palettes, nous reviendrons en détails sur leur architecture et leur principe de fonctionnement dans la section qui leur est dédiée.

Enfin le dernier organe auquel nous avons décidé de donner une importance particulière est le circuit de puissance du système et sa liaison avec le circuit de commande qui était l'un des sujets du troisième chapitre. Nous verrons les différents branchements existants, l'importance et le rôle de chaque composant.

#### **4.2.1 Le rack :**

Il s'agit d'une multitude de casiers penchés d'un côté ou de l'autre et distribués sur toute la face (les deux faces dans ce cas) du rack. Les casiers appartenant à la même colonne, sont donc superposés et sont penchés vers la même face. De cette manière les colonnes de casiers sont penchées vers l'une ou l'autre des faces par alternance, de telle sorte que les casiers soient appareillés deux à deux (chaque casier appareillé à un autre d'une colonne adjacente à la sienne).

Nous avons choisi de construire cette structure à l'aide de taules pliées, grâce auxquelles nous avons fabriqué des montants faisant office de piliers, qui eux supporteront les casiers. Chaque casier se résumera à deux rails parallèles identiques sur lesquels glisseront et seront stockées nos palettes.

Trois montants sont nécessaires afin de soutenir deux moitiés de colonnes, un au milieu et deux autres supplémentaires aux extrémités. Entre les rails d'une même colonne aucun élément de soutien de la structure ne doit exister, puisqu'il ne doit rien y avoir tout le long de chaque casier afin que les palettes puissent glisser du début du rack jusqu'à sa fin. De plus, le fait qu'il n'y ait aucun élément du système tout le long des rails de chaque colonne, des produits de différentes tailles en hauteur peuvent être stockés sans ne rien changer à la structure du système.

Cela dit afin que la distance entre les rails des colonnes puisse être maîtrisée et que le rack puisse se tenir debout, des fixations solides aux extrémités inférieures et supérieures doivent être installées. Tout en bas du rack, une base solide le supportant a été installée qui elle-même se divise en deux parties accomplissant deux fonctions différentes. La partie qui est fixée directement aux montants, est une multitude de taules pliées épaisses en forme de U, fixées d'un côté et de l'autre à deux rangées de montants différentes, fixant par conséquent la distance



entre les rails d'une même colonne. Les fixations sont faites à l'aide de tiges filetées qui traversent de part en part les montants d'une même colonne ainsi que la taule en U qui les maintient, faisant en sorte ainsi que tous les montants soient alignés. La deuxième partie de la base précédemment citée, est en fait un cadre fait en tube rectangulaire, sur lequel ont été fixées des roues freinées, et par-dessus duquel sera posé tout le rack, permettant ainsi son déplacement si besoin il y a.

Parallèlement à cela, nous avons parlé des fixations supérieures. Ces dernières ont aussi pour rôle de maintenir une même distance entre les montants d'une même colonne. Il s'agit toujours de taule pliée qui relie tous les montants d'un des trois groupes de montant du rack (nous avons mentionné l'existence de trois montants par demie colonne deux aux deux extrémités et un au milieu, par conséquent tous les montants du milieu sont reliés entre eux et les montants de chaque extrémité du rack sont reliés entre eux) Figure 4.1.

La fabrication de toutes ces colonnes et leur montage, ont été faits à l'aide de gabarits que nous avons confectionné, afin que l'architecture soit harmonieuse, ce qui est plus que nécessaire, non pas seulement du côté esthétique mais fonctionnel (voir Figure 4.2).

De cette manière-là, nous avons un rack bien structuré et solide. Il reste néanmoins un détail important à ajouter, qui est celui des butées ou des cales qui doivent arrêter le glissement des palettes une fois arrivées à la fin du casier. Nous avons opté pour des cales en caoutchouc, qui en plus d'arrêter le mouvement des palettes, amortissent le choc de la collision.



**Figure 4.1 : Photo du rack après le montage final**





Figure 4.2 : Photo de l'un des gabarits utilisés

#### 4.2.2 Les palettes :

Nous avons choisi de dédier une section à ce compostant qui peut paraître sans grande importance dans un tel système, cependant cela est nécessaire dans ce cas, car nous avons apporté une légère modification à ce dernier, mais cette modification change beaucoup de choses.

Lorsque l'on parle de convoyeur gravitationnel, on parle de mécanisme permettant le glissement des articles sous l'effet de la gravité à travers ledit convoyeur. Le mécanisme le plus répandu est celui de convoyeurs gravitationnels dotés de rouleaux ou de roulettes en plastique permettant de faire glisser les containers ou palettes de produits (voir Figure 4.3 et 4.4).

Nous avons décidé de rompre avec cette tendance et de proposer une autre alternative. Nous avons décidé de mettre le mécanisme permettant le glissement, sur les palettes et non pas sur les convoyeurs. C'est-à-dire que ce seront les palettes qui seront dotées de roues Figure 4.5, chose qui aura deux principales retombées positives sur le système. Le premier avantage relève de la maintenance, puisqu'il est beaucoup plus facile de maintenir des palettes, qui peuvent être réparées à l'extérieur du système que de maintenir des convoyeurs gravitationnels solidaires du rack de l'AS/RS. L'autre avantage, est qu'alléger ces convoyeurs de leurs traditionnelles roues ou encore leurs rouleaux, diminuera considérablement le poids du rack, puisque ne seront utilisées que les palettes nécessaires.



Figure 4.3 : Illustration d'un convoyeur à rouleaux



Figure 4.4 : Illustration des roulettes en plastiques utilisées dans les convoyeurs gravitationnels



Figure 4.5 : Photo de l'une des palettes confectionnées pour le système

### **4.2.3 Les machines S/D :**

L'AS/RS réalisé dispose de deux machines S/R distinctes et tout à fait identiques, chacune d'elles est affectée à l'une ou l'autre des deux faces du système, afin qu'elles puissent procéder aux opérations de stockage/déstockage durant l'activité de l'AS/RS.

Nous allons exposer ce qui relève de la structure mécanique et de la transmission du mouvement pour les trois axes, tout en abordant les volets, électrotechnique, électronique et informatique entre autres.

Nos machines sont en fait des robots cartésiens de 3 axes, cela dit la transmission du mouvement pour chaque axe et totalement différente que celle des deux autres, nous allons exposer tout ce qui concerne ces systèmes un à un.

#### **4.2.3.1 Le mouvement horizontal :**

Le bas de nos machines se présente sous la forme d'un chariot motorisé, qui à l'aide de cela peut effectuer des mouvements selon l'axe horizontal en entraînant tout le robot. Notre chariot dispose de quatre roues, deux d'entre elles sont motorisées les deux autres ne font que suivre le mouvement.

La paire de roues motorisées, l'est, grâce à un système d'engrenage simple (voir Figure 4.8). Les deux roues en question sont solidaires d'un pignon arbré (voir Figure 4.6), dont le mouvement est entraîné par une roue dentée, qui elle, est fixée à un moteur pas à pas (voir Figure 4.7).



Figure 4.6 : Photo du pignon arbré entrainant le mouvement

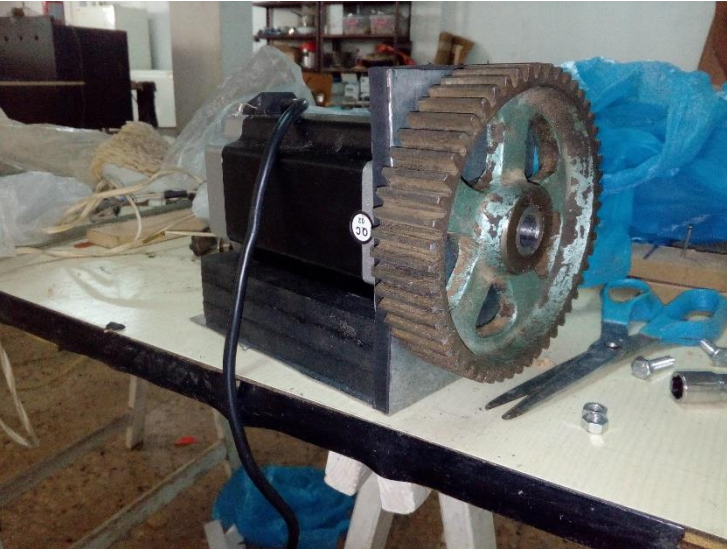


Figure 4.7 : Photo du moteur pas à pas ainsi que de sa roue dentée





Figure 4.8 : Photo de l'engrenage permettant de faire le déplacement horizontal

De plus afin qu'il n'y ait pas de frottements des deux arbres avec les parois du chariot, des roulements ont été installés au niveau de ces parois, facilitant ainsi le mouvement du robot et évitant l'usure précoce de ce dernier. Ces roulements ont été installés dans des socles parallélépipédiques, afin qu'il puisse par la suite être fixés aux parois (voir Figure 4.6 et 4.8)

#### 4.2.3.2 Le mouvement vertical :

Comme il a été mentionné plus haut, la transmission du mouvement vertical diffère totalement de celle du mouvement horizontal. Nous avons opté pour un transfert du mouvement via une tige filetée, mais pas seulement, puisqu'une autre forme de transmission a été sollicitée.

Tout d'abord, la tige filetée qui a été choisie est celle qui avait le pas de filetage le plus important trouvée sur le marché, et cela afin que le mouvement se fasse rapidement. Cette tige dispose d'un pas de filetage de 10mm, c'est-à-dire qu'à chaque tour du moteur un mouvement vertical de 10mm est effectué. Cela dit, ce mouvement reste lent et loin de nos attentes, nous décidons alors d'ajouter un mécanisme supplémentaire afin d'augmenter encore plus la vitesse.

La solution mécanique qui est choisie est celle de désaxer la tige et le moteur, et puis de fixer une roue sur l'axe du moteur qui est deux fois plus grande que le pignon à axer avec la tige, et enfin de transmettre le mouvement à l'aide d'une chaîne (voir Figure 4.9).

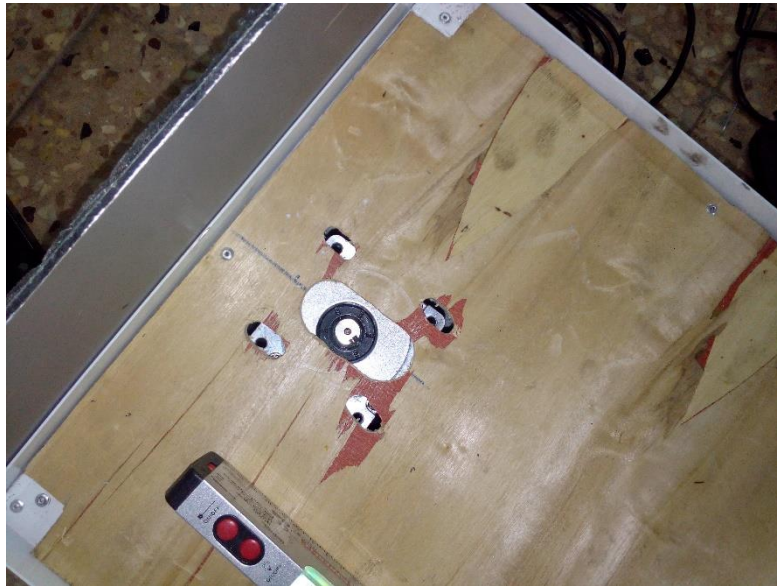


Figure 4.9 : Photo du système de transmission entre le moteur et la tige

Le pignon que nous avons confectionné est réglable en hauteur à travers la tige, et cela grâce à des vis de serrage et à deux trous taraudés au niveau du pignon (voir Figure 4.10). D'autre part les fixations du moteur ont été faites d'une manière à ce que sa position puisse être réglable horizontalement afin de tendre ou détendre la chaîne qui le relie à la tige (voir Figure 4.11).



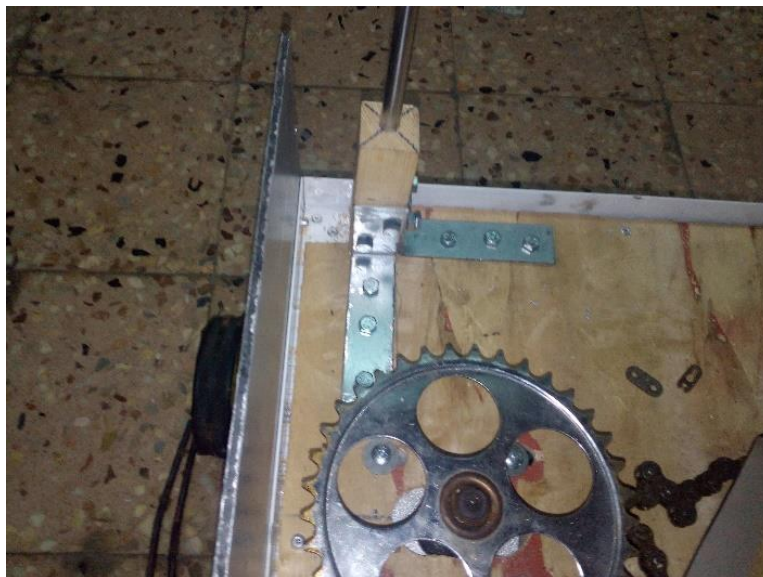
Figure 4.10 : Photo du pignon pendant son taraudage



**Figure 4.11 : Photo des fixations réglables du moteur**

Grace à ce mécanisme supplémentaire, la vitesse de la tige est doublée, et le mouvement vertical est donc deux fois plus rapide. De même que pour le mouvement horizontal, un moteur pas à pas a été choisi, la justification de ce choix se fera dans la section qui lui est dédiée.

Donc en récapitulant le tout, lorsque le moteur tourne, il fait tourner la grande roue dentée, qui elle entraine le mouvement du petit pignon solidaire de la tige. La rotation de cette dernière, fait en sorte que l'écrou, qui lui ne tourne pas, puisse soit monter ou descendre, tout dépend du sens de rotation de moteur. A cet écrou sera par la suite fixé un plateau dans lequel les palettes prendront place. Et afin que le plateau ne bouge pas pendant ces mouvements et puisse avoir une trajectoire stable, nous avons utilisé des axes de guidage ainsi que des roulements linéaires (voir Figure 4.12 et 4.13).



**Figure 4.12 : Photo des fixations des axes de guidage**





Figure 4.13 : Illustration des roulements linéaires

#### 4.2.3.3 Le mouvement en profondeur (mouvement de saisi) :

Afin de saisir les palettes, un système à fourches a été implémenté. Il s'agit de deux fourches parallèles qui sortent suivant un mouvement en profondeur (le troisième axe), et puis lorsque la machine effectue un mouvement vers le haut, la palette concernée se voit soulevée. Faire rentrer ces fourches clôturera cette manœuvre puisque la palette prendra place au sein de la machine. Le mécanisme électromécanique concerné se trouve à l'intérieur du plateau précédemment cité.

Puisque le mouvement des fourches reste toujours le même, c'est-à-dire que ses points de départ et d'arrivée sont toujours les mêmes. L'utilisation d'un moteur à courant continu ainsi que de deux capteurs du type « fin de course » est suffisante.

La transmission du mouvement du moteur vers les fourches, a été inspirée de celle utilisée pour les lèves vitres électriques des automobiles. Le dispositif en question est composé d'un moteur à courant continu qui est relié à une poulie, autour de laquelle s'enroule un fil de fer. Lorsque le moteur tourne d'un côté ou de l'autre, il prend du fil d'un côté et en libère de l'autre et vice versa. De cette manière nous fixons les deux extrémités du fil à une taule qui elle est fixée aux deux fourches, de cette manière lorsque le moteur tourne dans un sens ou dans l'autre, les fourches rentrent ou sortent. En plus de cela leur course est délimitée par des capteurs du type « fin de course » (voir Figure 4.14), le tout régi par notre carte Arduino à travers un circuit de puissance sur lequel nous reviendrons plus en détail par la suite.



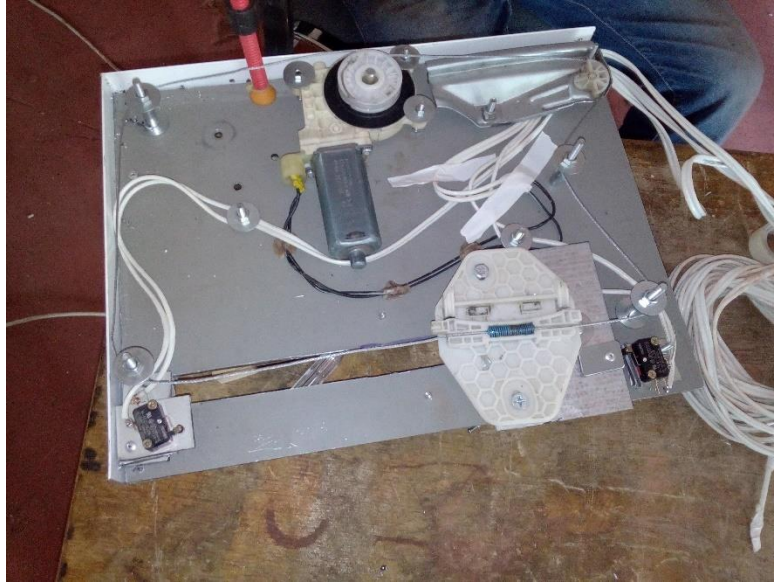


Figure 4.14 : Photo du mécanisme intérieur du plateau

#### **4.2.4 L'électromécanique des machines S/D :**

Nous avons dans les sections précédentes brièvement fait allusion aux différents moteurs utilisés dans la fabrication de ces robots, nous allons maintenant justifier nos choix, puis parler de leur fonctionnement, depuis la source de tension en passant par les circuits de puissance et leur liaison avec la partie commande.

##### **4.2.4.1 Les moteurs pas à pas :**

Les moteurs pas à pas sont des dispositifs électromécaniques qui permettent de transformer une impulsion électrique en mouvement angulaire. Les moteurs que nous avons utilisés sont des moteurs pas à pas bipolaires, leur pas (mouvement angulaire unitaire) est égal à  $1,8^\circ$  et leur couple est de 8 N.m.

Nous avons choisi d'utiliser des moteurs pas à pas pour leur précision, puisqu'ils nous permettent de contrôler le mouvement de nos machines en boucle ouverte, en plus de pouvoir effectuer des arrêts précis. Comme tout l'AS/RS est basé sur la précision du mouvement, le choix de ces moteurs s'est imposé comme une évidence. Car puisque le rack se compose d'une multitude de casiers, chacun aillant ses propres coordonnées, et que tous les emplacements et les articles sont gérés par le logiciel qui a été élaboré pour cet AS/RS, il est nécessaire que lorsque ce dernier envoie des ordres précis, qu'ils soient précisément exécutés.

##### **4.2.4.2 Les circuits de puissance pour moteur pas à pas (drivers) :**

Comme nos moteurs pas à pas fonctionnent avec une tension et un courant élevé (48V et 4.5A par phase) et que notre circuit de contrôle fonctionne avec du 5V puisque c'est un circuit logique, il est nécessaire d'interfacer ces deux éléments à l'aide de circuits de puissance, ou communément appelés driver pour moteurs pas à pas.

Le driver que nous avons choisi est le MD882ES (voir Figure 4.15) qui en plus de nous permettre d'interfacer la partie opérative et la partie commande, nous donne la possibilité de fixer l'intensité du courant à faire passer dans les phases du moteur et aussi de faire appel aux « Microsteps ». Ces derniers sont en fait des micro-pas qui nous permettent d'avoir plus de précision (puisque le pas ou angle unitaire se voit réduit). Pour notre part nous avons fait appel à ces micro-pas, non pas afin d'augmenter la précision mais plutôt pour le problème de la résonance du moteur. Car pour le mouvement horizontal il nous fallait une vitesse du chariot qui ne soit pas trop élevée, mais lorsque les impulsions qui sont envoyées au moteur afin qu'il fasse des pas supplémentaires sont trop espacés en temps entre elles, le moteur entre en résonance et commence à vibrer. Nous avons alors utilisé les « microsteps » car cela nous permettait de faire appel à une grande fréquence sans pour autant que le moteur ne tourne rapidement.

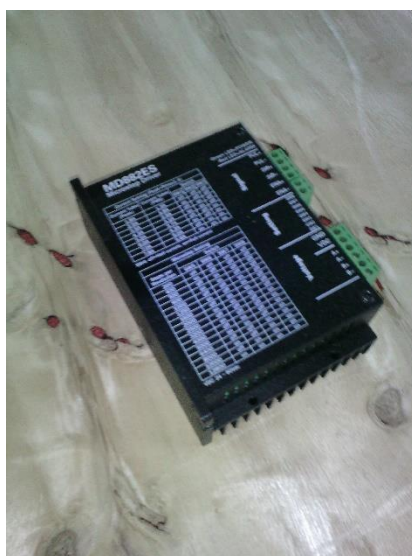


Figure 4.15 : Photo de l'un des drivers utilisés

D'autre part, comme la carte Arduino ne dispose que d'un seul microcontrôleur, elle exécute son programme de manière séquentielle. Or nous utilisons une seule carte pour contrôler deux moteurs pas à pas simultanément, car les machines se déplacent sur les deux axes en même temps. Nous avons grâce aux micro-pas, pu créer l'illusion du parallélisme, car en utilisant cette possibilité, nous avons pu avec une seule est même fréquence avoir deux vitesses différentes pour les deux moteurs, pour l'un en utilisant les plein pas (200 pas/tour) et l'autre les micro-pas (2000 pas/tour), et en ajoutant quelques formes conditionnelles au programme de la carte chacun des moteurs peut faire le nombre de pas qu'il doit faire.

D'un autre côté, comme nos moteurs sont assez particuliers, nous n'avons pas pu trouver des sources de tensions adéquates sur le marché, nous en avons donc fabriquer une. A l'aide d'un transformateur ou abaisseur de tension 220V-48V d'une puissance de 1000VA, nous avons eu la valeur de la tension souhaitée, mais il fallait redresser ce signal car les drivers doivent être alimentés en courant continu. Nous avons donc installé un pont de diodes à la sortie du transformateur, puis branché un condensateur en parallèle afin de lisser au mieux la tension.

#### 4.2.4.3 Les circuits de puissance des moteurs à courant continu :

Comme il a été mentionné auparavant, les mouvements des fourches sont effectués à l'aide d'un moteur DC, et lui aussi nécessite une interface ou circuit de puissance. Cela dit, puisque notre moteur consomme du 12V avec du 3A, nous avons pris la décision de fabriquer nous même le circuit de puissance à l'aide de relais.

L'idée est donc que la tension d'alimentation soit envoyée dans un sens ou dans l'autre au moteur (afin de le faire tourner dans un sens ou dans l'autre ou qu'il reste au repos) lorsque la carte l'ordonne. Cela dit la tension nécessaire à l'excitation de la bobine des relais est elle-même de 12V, très loin de celle que fournit la carte (l'Arduino fournit du 5V).

Afin de remédier à ce problème, nous avons utilisé des transistors MOSFET, et l'alimentation de 12V se retrouve avoir deux rôles ; exciter les bobines des relais et alimenter le moteur. Lorsque l'Arduino émet un ordre (tension de 5V à l'une de ses sorties) vers le « Gate » du MOSFET le circuit se ferme entre le « Source » et le « Drain » laissant ainsi passer les 12V vers la bobine du relais concerné, ce qui fait basculer le relais vers l'autre circuit, permettant donc au moteur d'être alimenté et de tourner dans le sens voulu (Voir Figure 4.16). L'arrêt du mouvement est ordonné par l'Arduino une fois qu'elle a pris connaissance de la position des fourches, c'est-à-dire lorsque l'un des capteurs « fin de course » aura émis un signal.

Nous avons via la Figure 4.17 essayé d'avoir une vue globale des branchements de tous les circuits de puissance (les pré-actionneurs), des moteurs (les actionneurs) ainsi que du circuit de contrôle, qui lui-même sera relié à la seconde moitié de la partie commande qui est la partie software, incarnée par le programme en C# et le programme de l'Arduino en C/C++. Il est à noter que les drivers illustrés dans cette figure ne sont pas ceux utilisés dans le vrai système, car ceux-là n'étaient pas disponible dans la bibliothèque de composants du logiciel de conception des circuits. Les différents composants du schéma sont listés dans le Tableau 4.1.

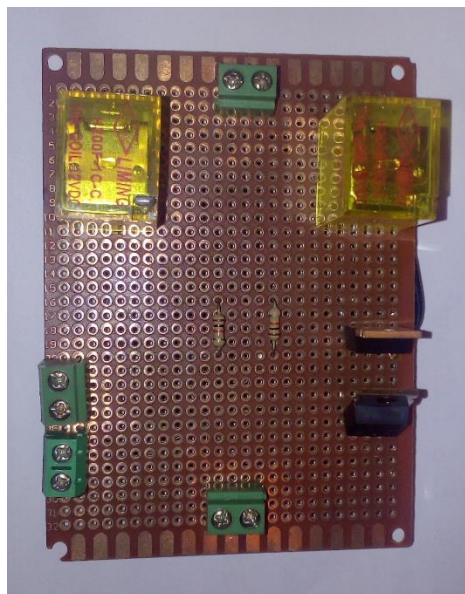


Figure 4.16 : Photo du circuit de puissance du moteur DC

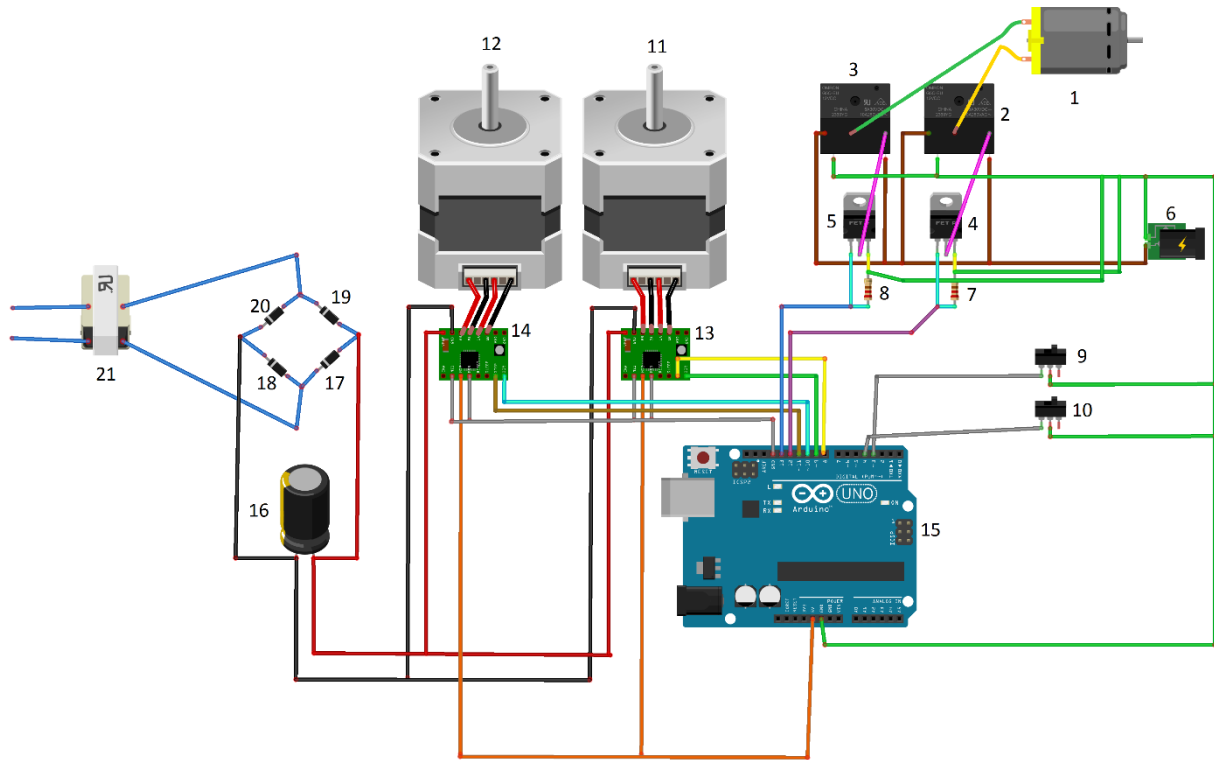


Figure 4.17 : Schéma récapitulatif de l'ensemble des branchements électriques des machines S/D

Tableau 4.1 : Liste des composants apparaissant dans la Figure 4.17

Numéro	Composant
01	Moteur à courant continu
02	Relais 1
03	Relais 2
04	Transistor MOSFET 1
05	Transistor MOSFET 2
06	Source de tension 12V DC
07	Résistance 1
08	Résistance 2
09	Fin de course mécanique 1
10	Fin de course mécanique 2
11	Moteur pas à pas 1
12	Moteur pas à pas 2
13	Driver pour moteur pas à pas 1
14	Driver pour moteur pas à pas 2
15	Carte Arduino UNO
16	Condensateur

17	Diode 1
18	Diode 2
19	Diode 3
20	Diode 4
21	Abaisseur de tension 220V-48V

### **4.3 Synthèse du fonctionnement global :**

Maintenant que tout le système a été dissocié et toutes ses parties ont été exposées, qu'il s'agisse du logiciel et son circuit de contrôle aux pré-actionneurs et actionneurs en arrivant aux capteurs et transmissions mécaniques du mouvement selon les différents axes, nous allons faire une synthèse de tout le fonctionnement du système depuis l'émanation d'une commande jusqu'à sa satisfaction.

Tout d'abord, lorsque l'utilisateur veut procéder à une demande de transaction, il saisit grâce au Flow-rack Manager, soit une demande de stockage ou de déstockage, et cela selon les différentes options que lui offre ce dernier. A ce moment le programme exécute une batterie d'instructions afin de vérifier et ajouter ou supprimer l'article concerné avant de faire appel au circuit de contrôle. La communication avec les cartes Arduino, se fait comme expliqué plus haut via RS232 émulé en USB selon un codage très simple communs aux deux entités, mentionné dans le troisième chapitre.

A la réception des informations nécessaires, le circuit de commande exécute la parcelle de code adéquate avec les paramètres appropriés, afin que la transaction puisse se faire correctement. Ce dispositif va activer des sorties à tour de rôle et selon des fréquences bien déterminées et à des moments convenablement choisis afin que des mouvements coordonnés puissent s'exécuter lorsque certaines conditions seront satisfaites.

Les signaux sortant des cartes Arduino iront vers les pré-actionneurs, qui dans notre cas sont soit les drivers des moteurs pas à pas ou bien les circuits de puissances à base de relais des moteurs DC. Ces composants vont joindre les signaux logiques et l'alimentation en voltage élevée afin de faire fonctionner les actionneurs de la bonne manière sans risquer de nuire à la partie commande.

De ce fait les rotations de nos moteurs dans un sens ou dans l'autre aux moments désirés entraineront les mouvements de nos robots ans les différents axes à travers les mécanismes choisis et précédemment cités, de cette manière la transaction de stockage/déstockage pourra être effectuée.

### **4.4 Perspectives :**

Il est clair que le travail présenté dans ce mémoire et accompli pendant ce projet de fin d'études et malgré les efforts consentis est très loin d'être parfait. C'est pour cela que l'on se doit de présenter une liste non exhaustive de perspectives à atteindre ou dépasser pour quiconque dans



le futur veut perfectionner ce travail ou l'utiliser comme base pour d'autres travaux. Nous allons exposer ces perspectives dans l'ordre des chapitres auxquels elles sont relatives :

- L'état de l'art mérite d'être poussé plus en profondeur, et remis à jour vue l'avancée rapide dont fait l'objet ce type de recherches.
- Les modélisations exposées illustraient le comportement du système en simple cycle de stockage/déstockage, il reste à trouver des équations traduisant les temps de fonctionnement de ce dernier en double cycle.
- Il n'a été question dans ce travail que de la validation des équations proposées, une optimisation de ces dernières peut être mener et une comparaison des performances avec d'autres systèmes peut faire l'objet de recherches très intéressantes.
- Le programme de gestion et de commande élaboré et exposé dans ce travail intègre des fonctions de base de l'AS/RS même s'il offre des options innovantes comme le déstockage par temps de cycle le plus faible ou bien les échéances de péremption les plus proches. Malgré cela il reste ouvert aux améliorations, comme la définition d'accès pour différents utilisateurs ou des communications en réseau avec d'autres logiciels de l'entreprise.
- Le circuit de commande peut par la suite être remplacé par des équipements plus fiables et plus robustes, surtout lorsqu'il s'agit d'un milieu industriel, comme des automates programmables. On peut y ajouter aussi des dispositifs permettant une communication sans fil avec le logiciel.
- Les actionneurs choisis (moteurs principalement) peuvent être changé pour d'autres solutions technologiques. On peut par exemple utiliser des motoréducteurs qu'on contrôlera en boucle fermée à l'aide de capteurs incrémentaux. Ce qui offrira plus de couple au moteur, lui permettant de soulever des charges plus importantes, ou bien même des vérins pneumatiques à la place du moteur DC.
- Les différentes transmissions de mouvement peuvent être revues, en utilisant de nouvelles approches technologiques ou de nouveaux matériaux légers, ou bien en faisant appel à des outils de la mécanique de précision, chose qui permettra d'augmenter considérablement les performances du système.
- La réalisation du système, a coûté entre nos apports financiers personnels, ceux de notre encadrant, de nos sponsors et des bienfaiteurs qui ont voulu nous apporter leur aide environ 400.000 DA (40 millions de centimes). Si nous avions disposé d'une aide de la part de l'université pour un budget plus important ou pour des prestations de services, ce travail aurait été sûrement beaucoup plus abouti. Nous espérons que les personnes qui voudront améliorer ce travail auront la chance d'avoir à leur disposition plus de moyens pour que leur travail soit à la hauteur de leurs attentes, et que l'université sera à l'écoute des étudiants qui voudront faire un travail de qualité.

#### **4.5 Conclusion :**

Nous arrivons à la fin de ce chapitre, dans lequel ont été exposées les solutions technologiques que nous avons choisies afin de mener à bien cette réalisation, que ce soit au niveau mécanique ou bien au niveau de l'électrotechnique. Les différents actionneurs et pré-actionneurs utilisés ont été exposés, et leur utilité mise en évidence. Ce chapitre vient clôturer ce mémoire mais laissant tout de même la porte ouverte à toute entreprise d'amélioration ou de changements qui pourraient être apportés à ce travail.

## Conclusion générale

Afin de mener à bien ce projet, notre intérêt s'est porté sur les systèmes de stockage automatisés ou communément appelés AS/RS. Ces systèmes sont une solution technologique très répandue dans le domaine de l'industrie, et leur valeur ajoutée dans la compétitivité des entreprises qui y font appel est très importante. L'installation de ce genre d'équipement n'est pas une mince affaire, car en plus du choix du type de système, de sa taille, et de son implémentation afin de satisfaire au mieux les exigences d'un cahier des charges méticuleusement rédigé, la périphérie du système est quasiment aussi importante que l'entité elle-même. Car comme nous l'avons vu, le système de commande et de contrôle, regroupant des logiciels informatiques et des circuits de contrôle, ainsi que l'ensemble des circuits de puissance sont loin d'être négligeables.

Dans ce mémoire nous avons choisi de travailler sur l'AS/RS à chariots gravitationnels, et cela du point de vue pratique et théorique. Ce choix du système a été guidé par le fait que ce système soit très récent, en plus de présenter a priori des caractéristiques intéressantes, en trouvant un juste équilibre face au dilemme espace-temps (grande densité du rack en parallèle avec des temps de cycles réduits par rapport aux AS/RS à convoyeurs gravitationnels classiques).

Dans notre travail théorique nous avons voulu ouvrir une brèche vers des travaux futurs, en procédant à des modélisations mathématiques traduisant les temps de cycles de ce système. Seuls les simples cycles de stockage et de déstockage ont été modélisés, mais avec deux approches différentes. L'approche dite discrète, qui est plus fidèle au vrai fonctionnement du système en régime permanent, puis la modélisation continue, qui se base sur des équations approximant les distances et les temps du système. D'autre part, un programme codé sous Matlab a été implémenté, afin que des vérifications et des validations de ces modélisations soient faites. Et cela en générant plusieurs instances de remplissage du système et en comparant à chaque fois l'évaluation faite des temps deux cycles selon les deux approches. Des résultats résumés de cette simulation ont été exposés, puis des interprétations et des commentaires ont été faits sur la signification de ces chiffres.

Les deux derniers chapitres du mémoire ont traité de la réalisation de l'AS/RS en question, cette seule réalisation nous a pris environ 1300 heures de travail chacun. La fabrication de ce système a presque été entamée de zéro, puisque presque toutes des parties de ce système ont été soit récupérées, soit détournées de leur utilisation habituelle, puis adaptées en fonction de nos besoins.

Dans le troisième chapitre, nous avons évoqué comment la partie commande a été conçue. Cette dernière étant divisée en deux éléments distincts, qui sont le logiciel de gestion et de commande, et puis le circuit de contrôle. Le programme de gestion a été codé en C#, ce dernier offre les utilités de base d'un logiciel de ce genre, comme stocker et déstocker, puis

## *Conclusion générale*

rechercher des produits. De plus, il permet de faire quelques manœuvres supplémentaires, comme la gestion des dates de péremption à travers l'alerte péremption, effectuer des stockages dédiés ou aléatoire, et aussi procéder à des déstockages intelligents, car ce programme offre la possibilité de déstocker des produits selon le temps de cycle le plus court ou bien l'échéance de péremption la plus proche.

Puis nous avons évoqué le mode de communication existant entre la partie logicielle et la partie matérielle, qui est incarné par le protocole RS232 émulé en USB. Par la suite une brève explication du codage utilisé pour que l'information transmise par le logiciel soit compréhensible par le circuit de contrôle a été faite. Ce même circuit de contrôle, auquel fût dédiée une section, afin d'exposer ses principales caractéristiques et son principe de fonctionnement. Puisqu'il s'agit de cartes Arduino, vers lesquelles sera transmise l'information de la part du logiciel, et en fonction de laquelle l'exécution de l'une des parcelles du code entrainera le fonctionnement des machine S/D.

Cependant avant d'arriver aux mouvements, il est question de pré-actionneurs, ou circuits de puissance dans notre cas. Car nous avons installé des drivers pour moteurs pas à pas, afin que les signaux provenant des Arduino puissent être transmis vers les moteurs en leur donnant assez de puissance pour les faire fonctionner. La même chose a été faite pour les moteurs à courant continu utilisés dans ces machines, et cela à travers l'élaboration de petits circuits de puissance à base de relais et de transistors MOSFET, afin d'une part alimenter les moteurs et d'autre part protéger le circuit de contrôle.

Par la suite quelques capteurs du type « fin de course » ont été installés, en plus des différents actionneurs ou moteurs utilisés. Nous avons eu affaire à des moteurs pas à pas pour la précision en plus des moteurs DC dont les mouvements étaient délimités par les capteurs précédemment cités. Ce matériel a été utilisé afin que nos machines puissent faire des mouvements précis selon 3 axes, et nous avons à chaque fois utilisé des transmissions de mouvement différentes, qu'il s'agisse d'engrenages ou de tige fileté, en passant par des poulies et du fil de fer.

D'autre part, le rack à convoyeur gravitationnel, a complètement été réalisé par nos soins, en y apportant une modification, qui est que les mécanismes de glissement ne doivent pas se situer à son niveau, mais plutôt sur les palettes ou chariots, et cela pour les raisons citées dans le chapitre qui lui est dédié. Nous avons essayé de choisir plusieurs solutions technologiques, qui selon les moyens à notre disposition et le matériel disponible nous permettaient d'avoir des résultats acceptables.

Nous avons pris la décision avec nos proches, notre encadrant, ainsi qu'avec nos sponsors et toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin, de laisser ce système à la disposition du nouveau laboratoire de pédagogie de la filière de génie industriel (malgré la non-participation de la faculté à ce projet) afin qu'il puisse servir pour des travaux pratiques ou des travaux de recherches.

Ce projet de fin d'études vient donc ponctuer cinq années d'études au sein de l'université de Tlemcen, et plus précisément au niveau de la filière à recrutement national en génie industriel



## *Conclusion générale*

et productique, grâce à laquelle nous avons acquis un savoir, que nos professeurs ont su nous inculquer, et à travers laquelle nous avons pu nous forger une identité professionnelle, à travers laquelle nous espérons être capable de faire valoir nos compétences sur le terrain.

## Références bibliographiques

- [1] TOMPKINS, J. A., and WHITE, J. A., 1984, *Facilities Planning* (New York: Wiley).
- [2] Material Handling Institute., “Consideration for planning and installing an automated storage/retrieval systems”, *Inc AS/RS document*, 100 7M, 1977.
- [3] Maleki. R.A, (1991), *Flexible Manufacturing Systems: the Technology and Management*, Prentice Hall.Malmborg C.J., “ Interleaving models for the analysis of twin shuttle automated storage and retrieval systems”. *International journal of production research*, 2000, 38(18), p 4599-4610.
- [4] Sari. Z, “Modélisation, analyse et évaluation des performances d’un AS/RS à convoyeur gravitationnel”. *Thèse de doctorat d’état*, Université de Tlemcen Algérie, 2003.
- [5] Kouloughli. S, “Optimisation de systèmes automatisés de stockage/déstockage multi-allées et à racks glissants ”. *Thèse de doctorat*, Université de Tlemcen Algérie, 2013.
- [6] Zollinger. H, (1999), “AS/RS application, benefits and justification in comparison to other storage methods”: *a white paper. Automated Storage Retrieval Systems Production Section of the Material Handling Industry of America*.
- [7] Sari, Z., and Bessnouci, N.H. (2012). Design & modeling of a single machine flow rack AS/RS, proceeding of IMHRC2012, Gardanne, France.
- [8] Zhuxi Chen, Xiaoping Li & Jatinder N.D. Gupta (2015) A bi-directional flow-rack automated storage and retrieval system for unit-load warehouses, *International Journal of Production Research*, 53:14, 4176-4188, DOI: 10.1080/00207543.2014.980459.
- [9] Sari, Z., and Hamzaoui, M.A. (2013). Optimization of a Single Machine Flow Rack AS/RS for Minimum Expected Travel Time, *IFAC Proceedings Volumes*, Volume 46, Issue 7, May 2013, Pages 57–62, DOI: 10.3182/20130522-3-BR-4036.00021
- [10] Hamzaoui, M.A., and Sari, Z. (2013). Single closed form travel time model based optimization of flow rack AS/RS, *IESM 2013*, Isfahan, Iran.
- [11] Hamzaoui M.A. and Sari Z. (2015), Optimal dimensions minimizing expected travel time of a single machine flow rack AS/RS, *Mechatronics*, Volume 31, October 2015, Pages 158–168, DOI: 10.1016/j.mechatronics.2014.10.006.
- [12] Sari Z., and Hamzaoui M.A. (2015) Travel Times Models Of A Single Machine Flow-Rack AS/RS , *International Journal Of Production Research*, TPRS-2015-IJPR-2168.
- [13] De koster, M.B.M., Le-Anh, T., and Yu, Y. (2008). Optimal storage rack design for a 3-dimensional compact AS/RS. *International journal of production research*, 46, 6, 1495–1514.
- [14] Yugang, y., and De koster, M. B. M. (2009). Designing an optimal turnover-based storage rack for a 3D compact automated storage and retrieval system. *International Journal of Production Research*, 47, 6, 1551-1571.

- [15] Kouloughli, S., Sari, Z., and Sari, T. (2010). Optimisation des dimensions d'un AS/RS multi-allée basée sur un modèle analytique du temps de simple cycle. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, 44, 2, 135-159.
- [16] Parikh, P.J., and Meller, R.D. (2010). A travel-time model for person-onboard order picking system. *European Journal of Operational Research*, 200, 2, 385-394.
- [17] Lerher, T., Sraml, M., Potrc, I., and Tollazzi, T. (2010). Travel time models for double-deep automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 48, 11, 3151-3172.
- [18] Fukunari, M., Malmborg, C.J. (2008). A heuristic travel time model for random storage systems using closest open location load dispatching. *International Journal of Production Research*, 46, 8, 2215-2228.
- [19] Ghomri, L., Sari Z., Guezzen, A.H., and Sari, T. (2009). Continuous Models for Single and Dual Cycle Times of a Multi Aisle Automated Storage and Retrieval System. *INCOM'09, Moscow, Russia*.
- [20] Sari, Z., Saygin, C., and Ghouali, N. (2005). Travel Time Models for Flow-Rack Automated Storage and Retrieval Systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25, 9-10, 979-987.
- [21] Chen, L., Langevin, A., Riopel, D. (2010). The storage location assignment and interleaving problem in an automated storage/retrieval system with shared storage. *Int. Jou. of Production Research*, 48, 4, 991-1011.
- [22] Sari, Z., Grassman, S., and Ghouali, N. (2007). Impact of Pickup/Dropoff Stations and Restoring Conveyor Locations on Retrieval Time Models of Flow-rack Automated Storage and Retrieval Systems. *Production Planning and Control*, 18, 2, 105-116.
- [23] Sari, Z. (2010). Performance evaluation of flow-rack and unit load Automated storage & retrieval systems” *Proceedings of ISTEC 2010*, 605-615 Cyprus.
- [24] Bessenouci, H.N., Sari, Z., and Ghomri, L. (2012). Metaheuristic based control of a flow rack automated storage retrieval system. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23, 4, 1157-1166.
- [25] Meghelli-Gaouar, N., and Sari, Z. (2010). Assessment of Performance of a Class-Based Storage in a Flow-Rack AS/RS. *Journal of Studies on Manufacturing*, 1, 2-3, 100-107.
- [26] Cardin, O., Castagna, P., Sari, Z., and Meghelli, N. (2012). Performance evaluation of In-Deep Class Storage for Flow-Rack AS/RS. *International Journal of Production Research*, DOI:10.1080/00207543.2011.624561
- [27] Ekren, B.Y., and Heragu, S.S. (2010). Simulation-based regression analysis for the rack configuration of an autonomous vehicle storage and retrieval system. *International Journal of Production Research*, 48, 21, 6257-6274.
- [28] Ekren, B.Y., and Heragu, S.S., Krishnamurthy, A., and Malmborg, C.J. (2010). Simulation based experimental design to identify factors affecting performance of AVS/RS. *Computers and Industrial Engineering*, 58, 1, 175-185.
- [29] Bozer, Yavuz A., and John A. White. 1984. Travel-time Models for Automated Storage/Retrieval Systems. *IIE Transactions* 16 (4): 329–338.

- [30] Hamzaoui M.A., Baba Ahmed M.N., Hassam A. (2014). Human Machine Interface Device for AS/RS. International Conference on Human Machine Interaction 2014, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India.
- [31] Google images.

# Résumé

Ce travail s'est intéressé au domaine des systèmes automatisés de stockage/déstockage. A travers les chapitres de ce mémoire il a été question d'évoquer et d'exposer les différents types d'AS/RS existants, citer leurs avantages et inconvénients ainsi qu'une brève revue de la littérature. Par la suite nous avons exposé les modélisations mathématiques du système (AS/RS à chariots gravitationnels bidirectionnels) que nous avons calculé, selon différentes approches, avant de procéder à une validation via un programme codé en Matlab. Les deux derniers chapitres ont traité de la réalisation pratique qui a été effectuée. Nous avons premièrement parlé de la partie commande du système, qui regroupe un programme de gestion et de commande codé en C#, en plus d'un circuit de contrôle à base de cartes Arduino. Par la suite nous avons exposé comment fut la réalisation de la structure du rack du système, ainsi que des machines S/D. Il a été question d'évoquer les différents pré-actionneurs utilisés, qui étaient en fait pour la majorité des circuits de puissance, des actionneurs pour la plupart des moteurs, et enfin des différentes formes de transmissions mécaniques qui permettent de faire mouvoir nos machines.

# Abstract

This work has addressed the field of automated storage / retrieval systems. Through the chapters of this thesis we discussed and exposed different types of existing AS / RS, cited their advantages and disadvantages, in addition of a brief review of the literature. Subsequently we presented the mathematical models of the system (bi-directional flow-rack) that we have calculated, using different approaches, prior to validation via a coded in Matlab program. The last two chapters dealt with the practical realization that was made. We first talked about the control part of the system, which includes a management and control program coded in C #, in addition to a control circuit based on Arduino cards. Thereafter we exposed how was the realization of the system rack structure, as well as S / R machines. Finally, we discussed about the different used pre-actuators, which were in fact for most power circuits, actuators for most motors, and finally various forms of mechanical transmissions which allow to move our machines.

## ملخص

اهتم هذا العمل بمجال أنظمة التخزين والاسترجاع الأتوماتيكية AS/RS. من خلال فصول هذه الأطروحة ناقشنا وعرضنا مختلف الأنواع الموجودة لهذه الأنظمة، تم ذكر مزاياها وعيوبها، بالزيادة الى استعراض موجز لما تم تقديمه في هذا المجال من أعمال وبحوث علمية. فيما بعد، عرضنا بعض النماذج الرياضية للنظام المدروس، والتي تم حسابها من خلال منهجين مختلفين، قبل أن يتم اثبات تناسقها من خلال برنامج دون ب Matlab.

البابين الأخيرين تناولا التطبيق العملي الذي تم اجراؤه. أولا تكلمنا على نظام التحكم والمراقبة، والذي يتكون من جزأين. وهما برنامج للإدارة و القيادة، بالإضافة الى دارة إلكترونية للتحكم مبنية على بطاقات Arduino.

ذكرنا مختلف المشغلات القبلية فيما بعد عرضنا كيف تمت صناعة هيكل الرف، بالإضافة الى آلات التخزين والاسترجاع. ومختلف المشغلات التي كانت في معظمها محركات كهربائية، وأخيرا تطرقنا الى مختلف أشكال نقل الحركة الميكانيكية