



Projet de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de
Ingénieur d'état
Spécialité
Mécatronique

- Thème –

Conception et Réalisation d'un Système de Manutention à Base d'AGV.

Réalisé par :

AMIRA Djawher

ATHMANI Ikram

Les membres du Jury :

AMRANE Ahmed	MCB	Président
GHAZI Nawal	MAA	Promotrice
CHABANE Ali	Docteur	Co-encadrant
BOUSSOUFA Ahmed	MAA	Examineur

Alger, le 14/07/2022

Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie du plus profond de mon cœur ce travail à :

*Mon cher père, **Abdenaceur**, qui m'a inculqué le sens de la responsabilité et qui a toujours été présent à mes côtés pour me guider vers le bon chemin. Mon père qui m'a accompagné tout au long de mon parcours, MERCI infiniment.*

*Ma chère maman, **Chafika**, pour son soutien moral et physique quotidien pendant toutes ses années, elle qui a toujours su m'encourager et me pousser d'aller vers l'avant.*

*Mes deux frères, **Amine** et **Boubakeur**, et mes belles-sœurs pour leurs encouragements et leurs conseils.*

*Mon frère, **Chafik**, pour son soutien, pour ses conseils et pour ses encouragements toutes ses années.*

*Mon neveu **Malik** et mes nièces **Camélia** et **Leila**.*

*Mon binôme, **Damia**, pour sa patience et son sens de la responsabilité tout le long des trois (03) années que nous avons passé ensemble à étudier.*

*Mes chères amies, **Nesrine**, **Lamia**, **Hasna**, **Meriem** et **Agnès**.*

Tous les membres de ma famille.

Djaouher.

Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverai jamais à leur exprimer mon amour sincère.

- *A l'homme, mon précieux offre d'ALLAH, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père.*
- *A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère.*
- *A ma chère sœur **Daya** qui n'a pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu la protège et l'offre le succès et le bonheur.*
- *A mes adorables, ma petite sœur **Dina** et mon petit frère **Amazigh** qui savent toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.*
- *A mon binôme **Djawher** pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*
- *A toutes mes amies : **O.Malak, M.Nesrine, R.Nesrine, B.Roeya, B.Manel, C.Lamia** qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.*

Merci pour leurs amours et leurs encouragements.

Akram.

Remerciements

الحمد والشكر لله الذي بنعمته تتم الصالحات

Nous tenons à adresser nos remerciements à toutes les personnes qui nous ont assistées, aidées et contribuées à la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Plus particulièrement, nous remercions Mme GHAZI Nawal pour son encadrement, son aide, ses conseils et ses orientations tout le long de l'élaboration et de la réalisation de notre projet de fin d'études, et ce malgré son plan de charge.

Nous adressons également nos vifs remerciements à M. CHABANE Ali pour son aide et son assistance précieuses.

Nous tenons à remercier tous les enseignants, qui ont participé, contribué et prodigué toutes les connaissances nécessaires à notre formation durant toute la durée que nous avons passé à l'Ecole Nationale Supérieure de Technologie ainsi qu'à l'élaboration de ce travail représentant le fruit de plusieurs années d'études.

Nous remercions aussi, Messieurs le Président et les membres du jury, M. AMRANE Ahmed et M. BOUSSOUFA Ahmed, qui ont accepté d'évaluer notre projet de fin d'études.

Sommaire

Liste des Figures	1
Liste des Tables	3
Introduction Générale	4
Chapitre 1.....	6
Les Systèmes de Manutention à Base d'Automated Guided Vehicle « AGV » au Sein d'un Système de Production Flexible « FMS »	6
1.1 Introduction.....	7
1.2 Système de Production Flexible « SPF ou FMS ».....	7
1.2.1 Définition.....	7
1.2.2 Classification d'un FMS	8
1.2.2.1 Types de FMS selon l'Opération Réalisée.....	8
1.2.3 Les Composants d'un FMS	10
1.3 Système de Manutention.....	10
1.3.1 Problème de Sélection du Système de Manutention	10
1.3.2 Types d'Equipements de Manutention	11
1.4 Système de Manutention à Base d'AGVs.....	11
1.4.1 Définition de l'AGV	12
1.4.2 Types d'AGV	12
1.4.2.1 Selon Mode de Navigation :	13
1.4.2.2 Selon l'Utilisation	13
1.4.3 Composants de Base d'un AGV	14
1.4.3.1 Châssis	14
1.4.3.2 Dispositif d'Entrainement.....	14
1.4.3.3 Éléments d'Alimentation	14
1.4.3.4 Unité de Contrôle	15
1.4.3.5 Éléments de Sécurité.....	15
1.4.4 Intégration de la Technologie RFID	15
1.4.4.1 Définition de la Technologie RFID	15
1.4.4.2 Avantages de la Technologie RFID	16
1.5 Conclusion	16
Chapitre 2.....	17
Le Pilotage des Systèmes de Manutentions à Base d'AGV	17
2.1 Introduction.....	18
2.2 Définition du Système de Pilotage.....	18

2.3	Architecture de Pilotage des Systèmes de Productions	18
2.4	La Fonction Ordonnancement dans un Système de Production Flexible (FMS)	21
2.5	Le Sous-Problème de Routage.....	22
2.5.1	Algorithmes du Chemin le Plus Court.....	22
2.6	Le Problème de Séquencement	23
2.6.1	Les Règles de Séquencement	24
2.7	Conclusion	24
Chapitre 3.....		25
Processus de Conception d'un Produit		25
3.1	Introduction.....	26
3.2	Projet de Conception d'un Produit.....	26
3.2.1	Définir le Problème	26
3.2.2	Définir le Besoin et les Objectifs.....	27
3.2.3	Synthèse du Système	27
3.2.4	Développement de Conceptions Provisoires	27
3.2.5	Prototypage et Validation	27
3.3	Description des Etapes de Conception du Cas d'Etude	28
3.3.1	Définition du Problème	28
3.3.2	Définition du Besoin et des Objectifs.....	28
3.3.3	Conception Détaillée	29
3.3.4	Prototypage et Essais	30
3.4	Conclusion	30
Chapitre 4.....		31
Etude Générale du Système de Manutention à Base d'AGV		31
4.1	Introduction.....	32
4.2	Présentation de la Cellule d'Assemblage Flexible.....	32
4.2.1	Présentation de la Cellule d'Assemblage	32
4.3	Définition du Projet	33
4.4	Analyse Fonctionnelle	34
4.4.1	Analyse Fonctionnelle Externe.....	34
4.4.1.1	Définition du Besoin.....	35
4.4.1.2	Expression du Besoin.....	35
4.4.1.3	Cahier des Charges Fonctionnel	36
4.4.2	Analyse Fonctionnelle Interne.....	37
4.4.2.1	Diagramme de Définition de Blocs BDD	37

4.4.2.2	Digramme de Blocs Interne IBD	38
4.5	Fonctionnement de l'AGV	40
4.5.1	Algorithme Principal	41
4.5.2	Algorithme de Routage.....	41
4.6	Conclusion	42
Chapitre 5.....		43
Conception Détaillée du Système de Manutention à Base d'AGV		43
5.1	Introduction.....	44
5.2	Sous-Système Automatique	44
5.2.1	Modélisation du Système AGV	44
5.2.1.1	Modélisation par Bond Graph.....	44
5.2.1.2	Modélisation par Equation d'Etat	47
5.3	Sous-Système Mécanique	48
5.3.1	Système électromécanique :	48
5.3.1.1	Choix du Moteur	48
5.3.2	Présentation du Châssis	50
5.3.3	Etude RDM.....	52
5.4	Sous-Système Electronique	54
5.4.1	Composants Electroniques de l'AGV.....	54
5.4.2	Circuit Electrique.....	55
5.5	Le Circuit de Manutention	56
5.6	Sous-Système Informatique	57
5.6.1	Installation de Raspbian et Préparation de Raspberry pi.....	57
5.6.2	Description des Données Nécessaires à la Programmation.....	57
5.6.3	Programmation	57
5.7	Conclusion :	57
Chapitre 6.....		58
Réalisation du Système de Manutention à Base d'AGV		58
6.1	Introduction.....	59
6.2	Etapes d'Assemblage de l'AGV	59
6.3	Mise en Place du Circuit de Manutention.....	60
6.4	Tests et Résultats	62
6.5	Conclusion	63
Conclusion Générale et Perspectives.....		64
Références.....		66

Annexe A.....	71
1.1. Présentation des Produits à Assembler	72
Annexe B.....	75
2.1. Installation de Raspbian :.....	76
2.1.1. Connecter la Carte Raspberry PI au PC	76
2.1.1.1. Configuration du Protocole de Communication SSH	76
2.1.1.2. Afficher le Contenu de la Carte Raspberry	77
2.2. Connecter les composants Electroniques aux Pins de la Carte Raspberry Pi	78
2.2.1. H-bridge motor driver.....	78
2.2.2. Capteurs Ultrasons.....	78
2.2.3. Capteurs Infrarouge IR	78
2.2.4. RFID	79
2.3. Identification des Paramètres Relatifs à la Partie Informatique de l'AGV	79
2.3.1. Identification des IDs des TAGs RFID	79
2.3.2. Description des Opérations.....	81
Annexe C	82
3.1. Introduction.....	83
3.2. Principe de Causalité du Bond Graph	83
3.3. Représentation d'Etat.....	83
Annexe D.....	87
4.1. Types d'AGVs Selon l'Utilisation.....	88
4.2. Types de Navigation des AGVs.....	88
4.3. Les Fonctions de Pilotage d'un Système de Production	89
4.3.1. La Planification	89
4.3.2. L'Ordonnancement.....	89
4.3.3. La Conduite	89
4.3.4. La Commande	90

Liste des Figures

Figure 1- 1: Illustration d'un système flexible de production [3].	7
Figure 1- 2: Pyramide CIM d'un système de production automatisé.	8
Figure 1- 3: Types de FMS selon l'opération réalisée.	9
Figure 1- 4: Types de FMS selon le nombre de machines.	9
Figure 1- 5: Types d'équipements de manutention	11
Figure 1- 6: (a) AGV suiveur de ligne, (b) AGV guidé par un rail métallique, (c) AGV guidé par laser [14].	12
Figure 1- 7: Différentes méthodes de navigation des AGVs [15]	13
Figure 1- 8: Types d'AGVs selon leurs utilisations.	13
Figure 2- 1: Système de pilotage d'un système de production [19].	18
Figure 2- 2: pilotage d'un système (a) : Architecture centralisée, (b) : Architecture décentralisée [21].	19
Figure 2- 3: Représentation des différentes classes de système de pilotage [23]	20
Figure 2- 4: Types de routage.	22
Figure 3- 1: Etapes de conception d'un nouveau produit.	26
Figure 3- 2: Diagrammes SysML.	29
Figure 3- 3: Diagramme du processus de développement du système AGV.	30
Figure4- 1: Présentation de la cellule en 2D.	32
Figure4- 2: Présentation de la cellule en 3D.	33
Figure4- 3: Diagramme d'activité du fonctionnement du système global	33
Figure4- 4: Les diagrammes utilisés dans l'analyse fonctionnelle.	34
Figure4- 5: Diagramme de cas d'utilisation.	35
Figure4- 6: Diagramme d'exigences de l'AGV	36
Figure4- 7: Diagramme de Définition de Blocs BDD de l'AGV.	37
Figure4- 8: Diagramme de Blocs Internes IBD de l'AGV.	39
Figure4- 9: Diagramme d'activité du fonctionnement de l'AGV.	40
Figure 5- 1: Circuit électrique de l'induit d'un moteur DC	45
Figure 5- 2: Circuit de commande d'un moteur DC.	45
Figure 5- 3 : Modélisation par Bond Graph du système « Moto-réducteur + Roue »	46
Figure 5- 4: Caractéristiques du moteur utilisé pour le projet	50
Figure 5- 5: Conception du châssis de l'AGV sous Solidworks.	51
Figure 5- 6: Mécanisme de fixation par-dessus l'AGV.	51
Figure 5- 7: Mécanisme de fixation.	51
Figure 5- 8: Face avant de l'AGV avec emplacement des capteurs ULTRASON	52
Figure 5- 9: Simulation de la charge P1	53
Figure 5- 10: Simulation avec la charge P2	53
Figure 5- 11: Composants électroniques de l'AGV	55

Figure 5- 12: Le schéma électrique de l'AGV.....	55
Figure 5- 13: La cellule flexible d'assemblage en millimètre « mm ».....	56
Figure 6- 1: Partie mécanique et électronique de l'AGV assemblées.	59
Figure 6- 2: Le diagramme de programmation	60
Figure 6- 3: Circuit de manutention de la cellule d'assemblage flexible.....	61
Figure 6- 4: Parking, Poste de chargement/déchargement et stocks pièces maitresses et produits finaux.....	61
Figure 6- 5: Poste de Travail PT1 Figure 6- 6: Poste de Travail PT2.....	61
Figure 6- 7: Poste de Travail PT3 Figure 6- 8: Poste de Travail PT4.....	62
Figure 6- 9: Exemple de fonctionnement de l'AGV pendant le premier test effectué.	63
Figure B- 1: Installation de Raspbian Os sur la carte mémoire	76
Figure B- 2: Interface de la configuration des protocoles SSH et VNC.....	77
Figure B- 3: Affichage du contenu de Raspberry Pi à travers VNC Viewer	77
Figure D- 1: Les fonctions principales d'un système de pilotage [18].	90

Liste des Tables

<i>Tableau 2- 1: Les algorithmes du chemin le plus court.....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 4- 1: Définition du projet par la méthode de QQQQCP.....</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 4- 2: Cahier des charges fonctionnel.....</i>	<i>36</i>
<i>Tableau 4- 3: Tableau des abréviations de l'algorithme</i>	<i>40</i>
<i>Tableau B- 1: Les PINs connectés au L298N motor driver.....</i>	<i>78</i>
<i>Tableau B- 2: Les Pins des Ultrasons</i>	<i>78</i>
<i>Tableau B- 3: Les PINs des capteurs d'IRs.</i>	<i>79</i>
<i>Tableau B- 4: Liste des PINs de connexions du lecteur RFID</i>	<i>79</i>
<i>Tableau B- 5: Les identifiants IDs des TAGs RFID</i>	<i>80</i>
<i>Tableau B- 6: Les durées des opérations par machine</i>	<i>81</i>

Introduction Générale

Au cours des dernières décennies, le domaine industriel a connu une importante transformation numérique en raison du développement de plusieurs technologies de pointe telles que l'intelligence artificielle industrielle, l'Internet des objets (IoT), le big data et le cloud computing. Ces technologies ont apporté une nouvelle révolution industrielle connue sous le nom de l'Industrie 4.0 qui a été identifiée comme un facteur majeur d'amélioration de la flexibilité de la production. En effet, la connectivité, l'automatisation et l'échange de données sont des caractéristiques précieuses de l'industrie 4.0 qui permettent d'atteindre une nouvelle dimension de flexibilité.

Un système de production flexible « FMS » est un système de production hautement automatisé, il se compose principalement de postes de travail (ex. robots d'usinage), de centres d'inspection automatiques et des systèmes de stockage et de récupération automatisés « AS/RS » reliés par des systèmes de manutention automatisés, le tout est contrôlé par un système de pilotage. Parmi les systèmes de manutention automatisés, le moyen le plus flexibles sont les véhicules à guidage automatisé capables de gérer différentes situations, telles que de fonctionner dans un environnement dynamique ou de s'adapter à un changement de disposition etc.

Les véhicules à guidage automatique, ou AGVs pour Automated Guided Vehicles en anglais, fonctionnent avec succès dans les grandes et moyennes entreprises depuis plus de dix ans. Ces véhicules sont capables de s'adapter à l'automatisation. Les industries de production automobile, telles que l'entreposage et la distribution, le textile, etc., sont les principaux consommateurs d'AGV.

Les systèmes de manutention sont essentiels à un transport efficace dans le secteur manufacturier. Les AGVs intelligents sont largement utilisés et peuvent être considérés comme un bon choix pour la distribution efficace de différents produits.

Dans ce mémoire, nous étudions la conception et la réalisation d'un système de manutention à base d'AGV qui permet l'acheminement d'un produit dans une cellule flexible d'assemblage. La réalisation proposée utilise, dans la mesure du possible, un matériel standard existant. Le guidage sera matérialisé par une bande de couleur noire tracée au préalable sur le sol pour s'arrêter au niveau des différentes stations afin d'effectuer le processus d'assemblage. Si l'AGV rencontre un obstacle sur son chemin, il doit le détecter, s'arrêter, suivre à nouveau son guidage.

Ce mémoire est organisé comme suit : Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur les Systèmes de Production Flexibles (FMS) et les systèmes de manutention, leurs classifications et leurs principaux composants. Dans le deuxième chapitre, la fonction du pilotage et ses différents sous problèmes sont présentés. Le troisième chapitre est consacré à la partie conception d'un produit présentant un guide pour notre travail. Dans le quatrième chapitre, nous commençons l'étude du projet avec une analyse fonctionnelle et nous proposons un algorithme du processus d'assemblage. Dans le cinquième chapitre, nous décrivons la réalisation matérielle de notre robot en explicitant respectivement la modélisation du système, la description de la partie mécanique et électronique ainsi que la partie informatique.

Introduction Générale

Dans le processus de réalisation notre projet, nous présentons dans le dernier chapitre l'impression 3D, la programmation et les résultats obtenues ainsi que des perspectives pour une prochaine réalisation du projet. Enfin, nous présentons une conclusion générale.

Chapitre 1

Les Systèmes de Manutention à Base d'Automated Guided Vehicle « AGV » au Sein d'un Système de Production Flexible « FMS »

1.1 Introduction

Dans un environnement manufacturier incertain et de très haute compétitivité, la flexibilité est un atout majeur qu'un système de production doit posséder afin de fonctionner de manière optimale et de s'adapter aux aléas auxquels peut être soumise l'industrie avec une intervention humaine minimale.

Les systèmes de production flexible (SPF ou FMS) sont composés généralement de postes de travail reliés par un système de manutention approprié et l'ensemble est contrôlé par un système de pilotage. Les systèmes de production flexible munis d'un système de manutention à base d'AGV permettent une réduction importante du temps de cycle de production ainsi qu'une réduction du coût de production [1].

Dans ce chapitre, on introduit les différents concepts élémentaires nécessaires à la réalisation de notre projet, à savoir, les systèmes de production flexible et les systèmes de manutentions correspondants, parmi lesquels on se focalisera plus particulièrement sur les systèmes de manutention à base d'AGV en présentant leurs principales composantes ainsi que les technologies leur permettant une autonomie.

1.2 Système de Production Flexible « SPF ou FMS »

1.2.1 Définition

Un système flexible de production, en anglais Flexible Manufacturing System (FMS), est composé d'un ensemble de postes de traitement reliés entre eux par un système automatisé de manutention et de stockage et contrôlés par un système de contrôle informatique intégré, comme le montre la **figure 1-1**. Il est appelé flexible car il peut traiter simultanément plusieurs types de produits différents au niveau des postes de travail, et les quantités de production peuvent être ajustées en fonction des demandes [2].

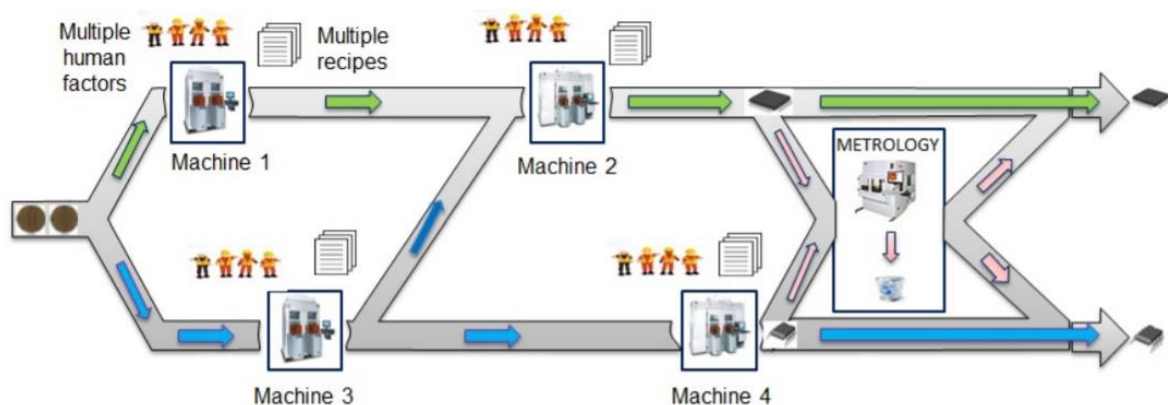


Figure 1- 1: Illustration d'un système flexible de production [3].

Le FMS est généralement caractérisé par de multiples produits, lignes de production, recettes et facteurs humains. En général, les processus de production d'un FMS sont pilotés par un algorithme de contrôle pour répondre aux exigences du système de pilotage. La structure d'un processus de production décrit les types de produits, les gammes de produits, les équipements correspondants, les recettes et les facteurs humains dans la partie opérationnelle du système contrôlé. Toute modification de l'un des éléments (tel qu'un produit, un équipement, une recette ou un humain) causée par la loi de commande nécessite l'adaptation des processus existants.

Chapitre 1 : Les Systèmes de Manutention à Base d'Automated Guided Vehicle « AGV » au Sein d'un Système de Production Flexible « FMS »

De plus, les systèmes peuvent être constitués de nombreux composants et sous-systèmes. Les contrôles hiérarchiques et modulaires présentés par A. JONES *et al* [4] sont fréquemment utilisés pour surveiller l'exécution de ces éléments. Un système automatisé de production est organisé dans ce contexte par la pyramide CIM (Computer Integrated Manufacturing), qui comprend : un système contrôlé, un flux de produits et un système de contrôle, comme illustré par la **figure 1-2** [3].

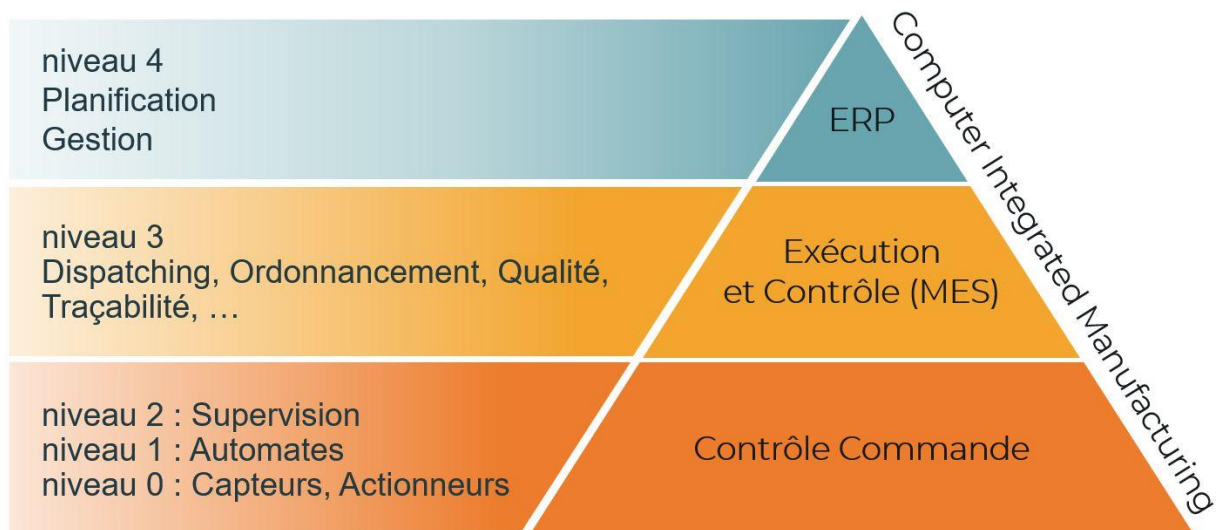


Figure 1- 2:Pyramide CIM d'un système de production automatisé.

1.2.2 Classification d'un FMS

Chaque FMS est conçu pour une application spécifique, c'est-à-dire une famille spécifique de pièces et de processus [2].

- Chaque FMS est conçu sur mesure et est unique.
- On trouve une grande variété de conceptions de systèmes pour satisfaire une grande variété d'exigences d'application.

Les FMS sont classés en fonction :

- Des types d'opérations réalisées ;
- Du nombre de machines ;
- Du niveau de flexibilité.

1.2.2.1 Types de FMS selon l'Opération Réalisée

Les FMS peuvent être classés en fonction des opérations qu'ils effectuent : opérations de transformation ou opérations d'assemblage [2]. De ce fait, un FMS est généralement conçu pour faire l'un ou l'autre, mais rarement les deux car la différence entre les systèmes d'usinage est de savoir si le système traitera des pièces rotatives ou non rotatives. Les systèmes d'usinage flexibles avec plusieurs stations qui **traitent des pièces rotatives** sont **moins courants** que les systèmes de traitement de pièces non rotatives [2].

Chapitre 1 : Les Systèmes de Manutention à Base d'Automated Guided Vehicle « AGV » au Sein d'un Système de Production Flexible « FMS »

Selon SHIVANAND et al [5], les FMS peuvent être classés selon les opérations effectuées tel illustré dans la **figure 1-3** :

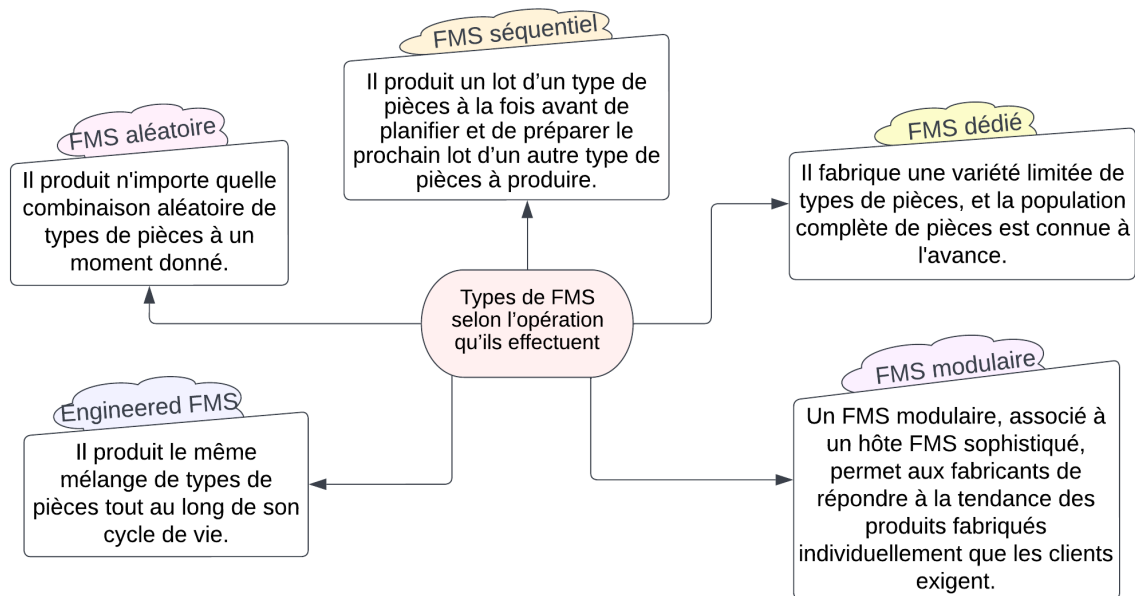


Figure 1- 3: Types de FMS selon l'opération réalisée.

Selon TETZLAFF et al [6], les systèmes de production flexibles peuvent être divisés en quatre catégories distinctes selon le nombre de machines opérantes, tel qu'illustré par la **figure 1-4** :

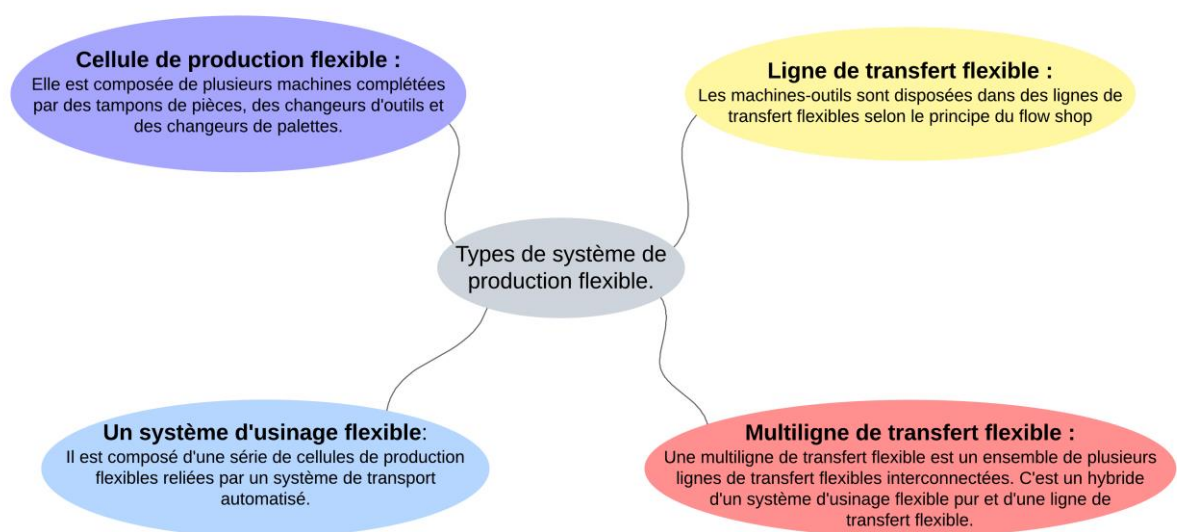


Figure 1- 4: Types de FMS selon le nombre de machines.

Chapitre 1 : Les Systèmes de Manutention à Base d'Automated Guided Vehicle « AGV » au Sein d'un Système de Production Flexible « FMS »

1.2.3 Les Composants d'un FMS

Selon Groover [2], les principaux composants d'un système flexible de production sont :

- Machines (ex : CNC, robots...) et stations de chargement/déchargement.
- Système de contrôle informatique.
- Système de stockage.
- Système de manutention.

1.3 Système de Manutention

La manutention au sein des usines industrielles est connue comme étant une tâche très épuisante et difficile. Un tel problème peut être réglé en concevant un système de manutention adapté aux besoins sur la chaîne de production. Un tel système peut réduire l'effort humain et a un impact direct sur le temps de cycle de production ainsi que sur le coût du produit conçu [7] [8].

Les systèmes de manutention (Material Handling System (MHS)) dans les FMSs ont pour objectif d'assurer l'acheminement des pièces à partir des postes de stockage vers les postes de traitement et entre ces derniers. Ils doivent être dotés d'une certaine performance afin de permettre le transport des pièces en toute sécurité et à moindre coût [9][10].

Selon Eloundou [10], les deux (02) principaux facteurs ayant un impact direct sur la (les) performance (s) d'un système de manutention sont :

- **La disponibilité des moyens de manutention :** Dans un système de manutention, les ressources assurant le transport ne sont pas toujours en nombre suffisant pour répondre aux besoins de déplacement des ressources ou des produits, cela engendre alors des contraintes de disponibilité. Les problèmes de disponibilité des moyens de manutention sont surtout très importants lorsque des contraintes de délais de commandes sont à satisfaire ou lorsque les contraintes de limitation des stocks s'imposent au système.
- **La flexibilité :** dans un système de production, la flexibilité d'une ressource de manutention est l'aptitude de cette dernière à assurer des déplacements à travers les différents postes de travail du système.

1.3.1 Problème de Sélection du Système de Manutention

Selon Soufi et al [8], l'impact direct que peut avoir le système de manutention sur le coût et le temps de cycle de production mène à d'important problèmes divisés en trois principales catégories :

- **Haut niveau :** Une sélection axée sur la recherche d'un système de manutention approprié parmi les différentes catégories, par exemple : Convoyeurs ; Automatic Guided Vehicle (AGV) ; Chariots élévateurs.
- **Niveau intermédiaire :** Une sélection axée sur la recherche d'un système de manutention adapté parmi la catégorie choisie, par exemple : le choix du mode de navigation d'un AGV adapté à la situation.
- **Bas niveau :** Une sélection axée sur la recherche d'un modèle de système de manutention parmi le type choisi, par exemple : sélectionner les meilleures alternatives parmi les AGV en termes de dimensions.

1.3.2 Types d'Équipements de Manutention

Il existe plusieurs types d'équipements de manutention différenciés par le design, le degré d'automatisation et leur mobilité. Selon Kay [7], les principaux équipements de manutention sont montrés sur la **figure 1-5** :

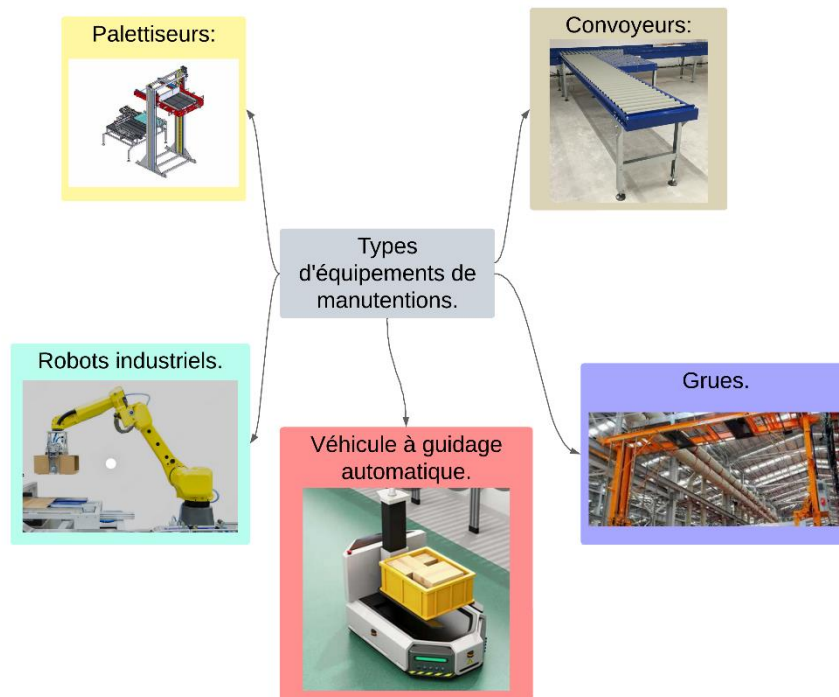


Figure 1- 5: Types d'équipements de manutention

Parmi les différents types d'équipements de manutention, les véhicules industriels sont utilisés pour transporter des objets sur différents trajets d'une surface non spécifique. Ils permettent plus de flexibilité que les convoyeurs et les grues et ils sont utilisés lorsqu'il n'y a pas de flux suffisamment important justifiant l'utilisation des convoyeurs. Parmi les différents types disponibles, il y a les véhicules industriels automatiques très souvent utilisés dans les FMSs.

1.4 Système de Manutention à Base d'AGVs

Selon Mehami et al. [11], les avancées technologiques qu'a connu l'industrie ainsi que l'intégration de l'Internet des Objets (IoT) et la connectivité entre les différents constituants d'un système manufacturier lui ont permis des avancées majeures en ce qui concerne l'automatisation des systèmes manufacturiers.

L'un des composants essentiels des systèmes manufacturiers sont les systèmes logistiques. Les véhicules à guidage automatique (AGV) sont largement utilisés pour transporter des produits à travers les différentes parties d'une usine et sont considérés comme étant les systèmes les plus répandus dans ce secteur et les plus performants. L'avantage majeur des AGVs est qu'ils soient capables d'opérer dans un environnement dynamique de façon autonome. [11][12]

Chapitre 1 : Les Systèmes de Manutention à Base d'Automated Guided Vehicle « AGV » au Sein d'un Système de Production Flexible « FMS »

1.4.1 Définition de l'AGV

Le véhicule de guidage automatisé, ou Automated Guided Vehicle (AGV), est défini comme un système de manutention à base de robots mobiles à fonctionnement indépendant guidés le long de voies définies dans le sol de l'installation.

Les systèmes de manutention à base d'AGV sont utilisés pour transporter les produits entre les postes de stockage et les différents postes de travail, ils permettent l'augmentation de la productivité, la flexibilité et l'agilité des systèmes de production, réduisant ainsi les coûts de production et permettant un niveau d'automatisation plus important. Selon son application, l'AGV peut être guidé par des bandes peintes par terre, des voies magnétiques, des fils électriques ou encore des systèmes à base de LASER [9][13][1].

1.4.2 Types d'AGV

Les AGVs sont très utilisés dans l'industrie du fait qu'ils apportent de la flexibilité, et nécessitent peu de modifications lors de l'ajout d'un nouveau produit sur la chaîne de production. Ils se divisent en plusieurs types selon leur utilisation ou encore selon leur mode de navigation.

La **figure 1-6** illustre trois types d'AGV selon leurs modes de navigation.

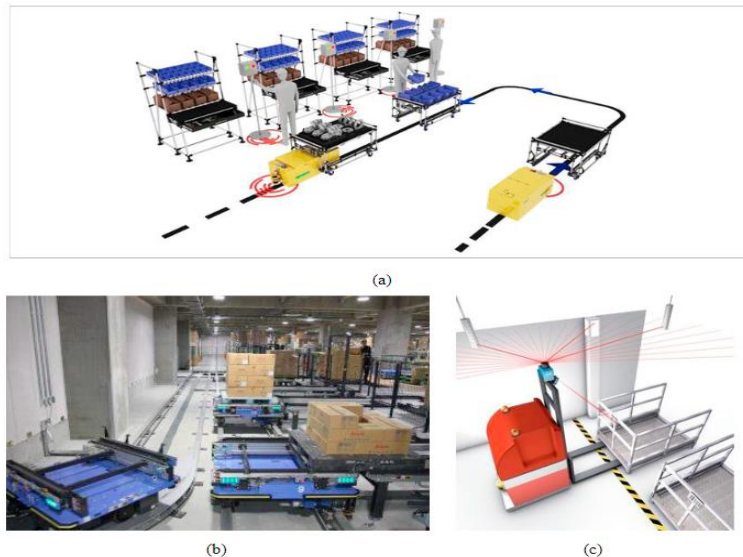


Figure 1- 6: (a) AGV suiveur de ligne, (b) AGV guidé par un rail métallique, (c) AGV guidé par laser [14].

1.4.2.1 Selon Mode de Navigation :

Selon le type d'application pour laquelle un AGV sera conçu et élaboré ainsi que l'environnement au niveau duquel il va opérer, la méthode de navigation adaptée à la situation sera déterminée [13]. Ces méthodes de navigation sont présentées par Liu [15] et sont scindées en cinq méthodes principales illustrées par la **figure 1-7**. « Voir Annexe D »

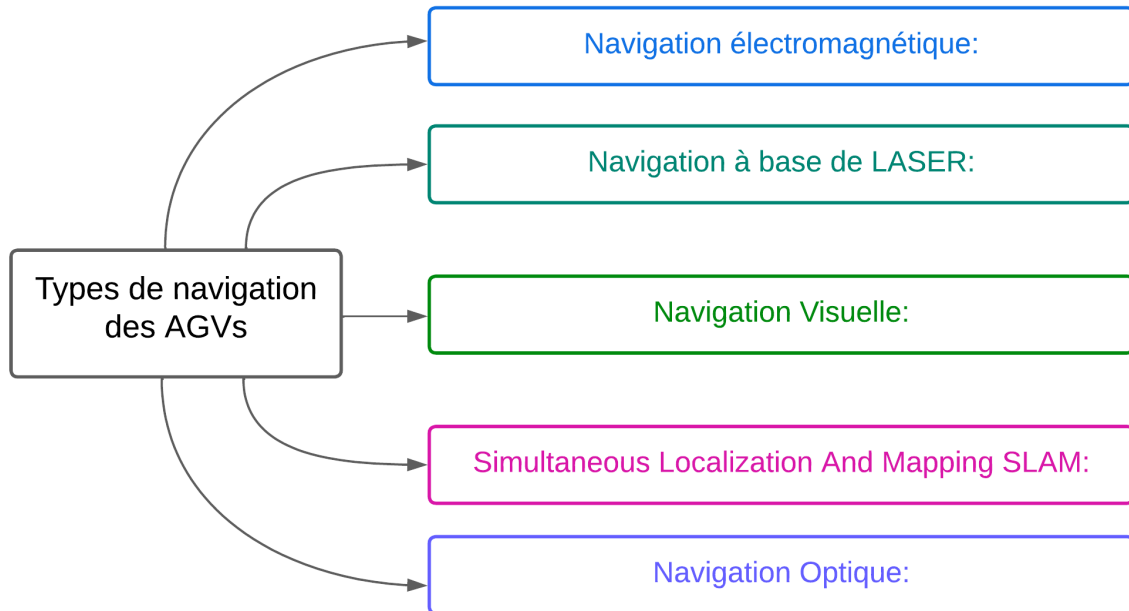


Figure 1- 7: Différentes méthodes de navigation des AGVs [15]

1.4.2.2 Selon l'Utilisation

Selon leur utilisation dans l'industrie, les AGVs sont classifiés en cinq (05) principales catégories illustrées par la **figure 1-8** « Voir Annexe D » :

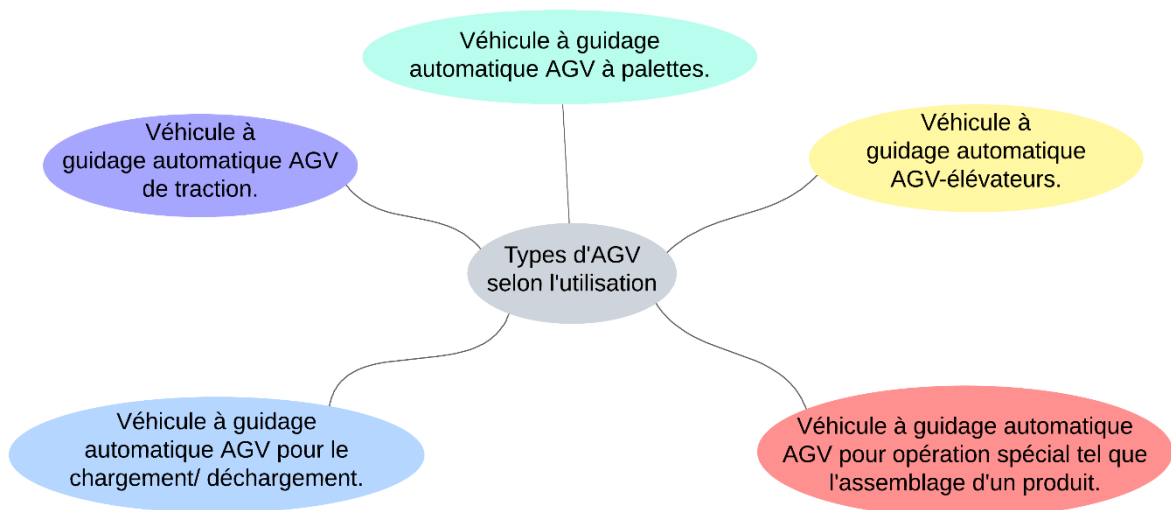


Figure 1- 8: Types d'AGVs selon leurs utilisations.

1.4.3 Composants de Base d'un AGV

Afin d'être capables de se déplacer dans un environnement dynamique, les AGV doivent être composés d'un châssis, d'un dispositif d'entraînement, d'une unité de contrôle ainsi que de différents éléments de sécurité. Ces composants ont été détaillés selon Liu [15] pour les AGV sur rail. Pour un AGV suiveur de ligne nous adaptons les composants nécessaires pour assurer le bon fonctionnement de l'AGV comme suit :

1.4.3.1 Châssis

Le châssis, qui représente la partie de base d'un AGV, est conçu principalement d'une plateforme composée de plusieurs pièces assemblées. La plateforme du châssis nécessite une bonne résistance et une rigidité afin de pouvoir supporter le système de pilotage de l'AGV, son dispositif d'entraînement ainsi que la charge qu'il doit transporter [15].

1.4.3.2 Dispositif d'Entrainement

Le dispositif d'entraînement permet de déplacer l'AGV et peut avoir des fonctions de commande de vitesse et de freinage. Il se compose principalement de roues, d'un moteur, d'une boîte de vitesses, d'un frein et d'un régulateur. De plus, selon les différents modes de fonctionnement de l'AGV, le mécanisme de direction typique d'un AGV se présente sous la forme d'un arbre articulé, d'un différentiel et d'une direction intégrale. Divers mécanismes de direction permettent à l'AGV de se déplacer vers l'avant, vers l'arrière et de faire des rotations 360° [15].

Parmi les différents actionneurs qui peuvent faire partie du dispositif d'entraînement d'un AGV, on trouve la liste suivante exprimée selon Carlberg [16] :

- Les actionneurs électromécaniques sont idéaux pour une intégration intelligente avec les AGV conçus pour une utilisation en usine ;
- Les engrenages à cames et les systèmes hydrauliques à entraînement par courroie et à ciseaux à faible coût ont peu ou pas de capacité d'intégration numérique ;
- Les vis à engrenage offrent une meilleure intégration numérique, mais comme elles nécessitent également un moteur et un contrôleur supplémentaires, elles peuvent être tout aussi chères, voire plus chères, qu'un actionneur électromécanique intelligent ;
- Les actionneurs à vis creuses ont des capacités et des technologies d'intégration numérique comparables, mais leur coût élevé les rend inadaptés sauf aux applications d'entreposage et de distribution à grande vitesse et à volume élevé, telles que l'emballage et l'expédition du commerce électronique.

1.4.3.3 Éléments d'Alimentation

L'alimentation par batterie est très exploitée pour les AGV car elle simplifie non seulement les dispositifs énergétiques, mais offre une meilleure flexibilité du contrôle de la puissance de sortie et de la récupération d'énergie. Elle permet également de réduire les émissions de gaz d'échappement et la pollution sonore. Les facteurs les plus importants dans un système d'alimentation d'AGV sont la durée du temps de charge et la simplicité de maintenance. Il existe deux types de batteries de puissance : au plomb et au lithium [15].

- Les batteries au plomb ont une grande densité d'énergie, un encombrement et une durée de vie relativement courte mais leurs coûts d'approvisionnement sont faibles.
- Les batteries au lithium ont une densité d'énergie élevée et une longue durée de vie et sont légères. Cependant, la technologie des batteries au lithium est complexe et coûteuse.

1.4.3.4 Unité de Contrôle

Le contrôle d'un AGV nécessite généralement deux contrôleurs : un contrôleur embarqué et un contrôleur au sol. En règle générale, le **contrôleur au sol** envoie des commandes de contrôle au contrôleur à bord grâce à un dispositif de communication.

Un microcontrôleur est utilisé pour positionner l'AGV, contrôler son mouvement et lui permettre de déplacer les produits le long d'un chemin donné. Il assure la rapidité, la précision et la stabilité des AGVs ainsi que l'amélioration de la fiabilité et l'autonomie des prises de décision des AGVs.

Le microcontrôleur de l'AGV communique également avec un contrôleur externe au véhicule afin de recevoir les instructions de fonctionnement et l'état actuel des différents constituants de l'environnement dont l'AGV fait partie.

Afin d'assurer la fonction de contrôle et de pilotage d'un AGV, une variété de capteurs doit être utilisée, tel que des capteurs de navigation et de distance et un encodeur. Ces capteurs reflètent avec précision les caractéristiques de l'environnement de l'AGV afin qu'il puisse prendre des décisions [15].

1.4.3.5 Éléments de Sécurité

Les dispositifs de sécurité des AGV sont d'une importance vitale. Il est nécessaire d'assurer la sécurité de l'AGV lui-même pendant le fonctionnement, ainsi que celle de son environnement. Par conséquent, le choix des dispositifs de sécurité d'un AGV est important. Les dispositifs de sécurité sont divisés en deux catégories : avec contact et sans contact. Les dispositifs de sécurité sans contact sont ceux utilisés pour assurer la sécurité des AGVs. Ils comprennent la détection infrarouge, les ultrasons, les micro-ondes, le balayage laser et le radar laser.

En général, les AGV sont équipés de matériels assurant une sécurité optimale. Par exemple, l'extrémité avant de l'AGV est équipée d'un capteur anticollision sans contact et le haut de l'AGV est équipé d'un voyant de signalisation accrocheur et d'un dispositif d'alarme sonore pour rappeler sa présence aux opérateurs autour de lui [15].

1.4.4 Intégration de la Technologie RFID

1.4.4.1 Définition de la Technologie RFID

La technologie RFID est une technologie d'identification automatique sans contact qui utilise des signaux radio pour positionner la cible et lire les données d'informations sur les étiquettes. Elle peut être utilisée à grande échelle dans les entrepôts, la logistique et d'autres domaines. Il s'agit de l'une des technologies de base de la notion actuelle d'Internet des objets. Le module RFID consiste en général en un lecteur, une antenne, un transpondeur et un logiciel d'application. Le lecteur, monté sur un véhicule, transmet un signal radio fréquence fixe dans l'espace à l'antenne en temps réel. Lorsqu'une étiquette RFID entre dans la zone de détection du lecteur, il reçoit les informations de l'étiquette, les décode et les transmet au contrôleur embarqué [12].

1.4.4.2 Avantages de la Technologie RFID

Selon *Xu et al* [12], la technologie RFID présente les avantages suivants :

- Le lecteur peut lire et écrire des données sur des étiquettes RFID sans contact direct et sans problème de visibilité ;
- Les données des multiples étiquettes RFID sont accessibles par le lecteur grâce aux ondes radio ;
- Sans aucun frais d'entretien, la technologie RFID peut fonctionner dans différents environnements et peut être utilisée efficacement pendant plus de 10 ans ;
- Lecture et écriture rapides avec un temps de lecture/écriture de quelques millisecondes ;
- Les étiquettes RFID modernes sont fabriquées avec de très bonnes capacités de mémoire allant de 16 à 64 Ko, ce qui est bien plus qu'un code-barres typique ;
- Les étiquettes RFID peuvent fonctionner avec GPRS et sont utilisées pour le suivi ;
- Les étiquettes RFID peuvent également s'intégrer à d'autres technologies. Par exemple, elles sont utilisées avec des réseaux de capteurs sans fil pour une meilleure connectivité ;

1.5 Conclusion

Ce chapitre a pour objet la présentation globale de notre projet. Nous avons tout d'abord présenté le contexte de notre travail qui sont les systèmes de production flexible. Parmi les différents systèmes composant les FMS, dans le cadre de notre projet, nous nous sommes focalisés sur les systèmes de manutention à base d'AGV que nous avons défini par la suite de ce chapitre.

Dans le chapitre suivant, nous abordons les systèmes de pilotage utilisés pour le contrôle des FMS et deux de ses sous-problèmes, à savoir, le routage et le séquençement des AGVs dans les FMS.

Chapitre 2

Le Pilotage des Systèmes de Manutentions à Base d'AGV

2.1 Introduction

Les systèmes de production flexible sont des systèmes complexes nécessitant un niveau élevé d'automatisation afin d'assurer le bon fonctionnement et une performance optimale. Le système de pilotage est l'élément clé d'un bon fonctionnement du FMS.

Dans ce chapitre, nous abordons les systèmes de pilotage ainsi que les différentes architectures adoptées dans les systèmes de production. Nous nous intéressons par la suite à la fonction ordonnancement du pilotage à travers laquelle nous présentons les sous-problèmes de routage et de séquençage des AGVs dans un FMS.

2.2 Définition du Système de Pilotage

Le fonctionnement d'un AGV au sein d'un FMS repose généralement sur un système de pilotage parfait. Il s'agit en effet, d'une tâche complexe et très importante au sein de tout système de production.

Pour un système de production, le pilotage « **figure 2-1** » consiste en son aptitude à décider de façon dynamique des commandes à donner à ce système afin d'atteindre un objectif prédéfini tout en prenant en considération les perturbations présentes et en maintenant voire en améliorant la performance du système [18] [17].

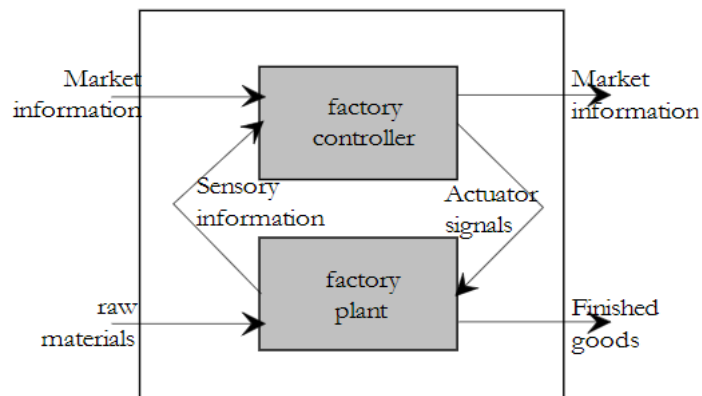


Figure 2- 1: Système de pilotage d'un système de production [19].

2.3 Architecture de Pilotage des Systèmes de Productions

Un système de production est caractérisé par la complexité de gestion des différentes tâches, la nécessité d'atteindre les objectifs, la flexibilité et l'adaptation aux perturbations externes. De ce fait, le système de pilotage d'un système de production doit être adapté aux différentes conditions afin d'assurer le bon fonctionnement du système de production.

Selon les agencements entre les différentes entités décisionnelles et exécutives, les architectures de système de pilotage sont divisées en deux catégories distinctes : architectures centralisées et architectures décentralisées (figure 2-2). Suite aux problèmes de coordinations, entre les différentes entités décisionnelles, apparus après l'adoption des architectures décentralisées, les recherches se sont orientées vers plusieurs approches d'hybridation des systèmes de pilotage [9][20][19].

La **figure 2-2** représente les deux architectures principales de pilotage d'un système de production.

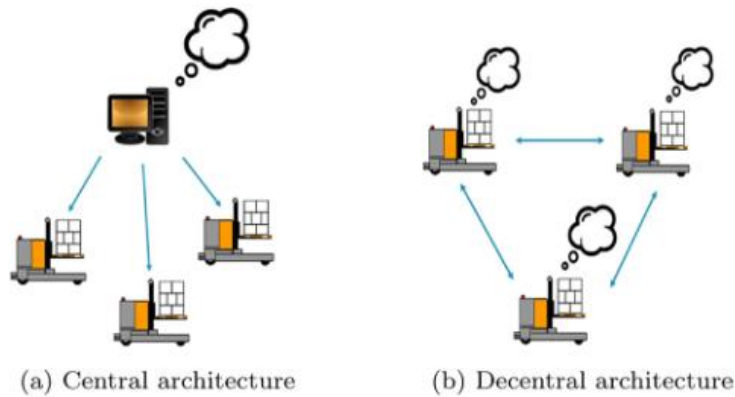


Figure 2- 2: pilotage d'un système (a) : Architecture centralisée, (b) : Architecture décentralisée [21].

Le pilotage centralisé est caractérisé par une seule entité qui pilote tous les sous-systèmes considérant que tous les paramètres du système sont connus et restent inchangés dans le temps. Bien qu'il présente des avantages de structuration, d'optimisation du processus et d'intégration, après les majeures évolutions qu'a connu l'industrie 4.0 où l'agilité et la flexibilité d'un système de production détermine ses performances, un tel système centralisé n'est plus capable de gérer les systèmes de productions tout en assurant la prise en compte des différents aléas et perturbations que peut rencontrer un système [9], [20] et [19]. Par conséquent, une nouvelle architecture de pilotage a été mise en œuvre, il s'agit de l'architecture décentralisée qui est plus adaptée aux nouvelles conditions des industries. En effet, un pilotage décentralisé permet un niveau de performance plus élevé dans des environnements dynamiques. Dans les systèmes de production récents, une telle architecture de pilotage règle les différents problèmes posés lors de l'emploi d'un pilotage centralisé. Néanmoins, cette architecture présente tout de même des inconvénients la rendant moins attractive et moins intéressante notamment l'effort qui doit être fourni afin de relier et coordonner les différentes entités cherchant à atteindre des objectifs de façon indépendantes du système global [21].

Selon Jimenez et al [22] et Trentesaux [23] [19], la classification des différentes architectures de pilotage décentralisé peut être répartie en trois classes selon le type d'agencement entre les entités du système. La **figure 2-3** illustre un schéma représentatif des trois différentes classes :

a) Système Hiérarchique

Ce type de pilotage est le premier système distribué adopté basé principalement sur la pyramide Computer Integrated Manufacturing (CIM). Selon cette architecture, les systèmes de pilotage sont divisés en plusieurs sous-systèmes décisionnels de types Maître-Esclave. Bien qu'elle permette une bonne maîtrise des informations et des données, cette approche ne peut pas assurer la fiabilité d'un système de production flexible.

b) Système Hétérarchique

Ce type de pilotage est apparu suite à la nécessité de réactivité entre les différentes entités décisionnelles sans avoir à être supervisé par un système de niveau décisionnel supérieur. Cette architecture élimine tous les niveaux décisionnels supérieurs et elle est constituée de relation Maître-Esclave sur un seul niveau décisionnel tout en permettant la coordination entre les entités décisionnelles.

Dans un tel système, les problèmes de coordination sont résolus. Ce système permet une réponse plus adaptée et plus efficace aux perturbations externes que peut rencontrer le système de production et diminue le risque de panne du système. En revanche, la performance et l'optimisation globale d'un système ne peuvent être assurées à travers cette architecture.

c) Système Hybride

Les deux architectures citées précédemment ont chacune de son côté assuré des avantages nécessaires aux systèmes de production mais présentent tout de même des inconvénients qui ne peuvent être ignorés. De ce fait, l'apparition d'architecture de pilotage hybride a permis l'exploitation des avantages des deux architectures hiérarchique et hétérarchique tout en évitant leurs limitations respectives. La caractéristique principale d'une telle architecture est le fait qu'elle regroupe des relations hiérarchiques et hétérarchiques simultanément de sorte à obtenir un niveau décisionnel hétérarchique avec un niveau de supervision supérieur. Par conséquent, les unités décisionnelles sont capables de communiquer entre elles de façon autonome lors d'événements inattendus, tout en étant supervisées par une entité supérieure assurant la performance optimale du système.

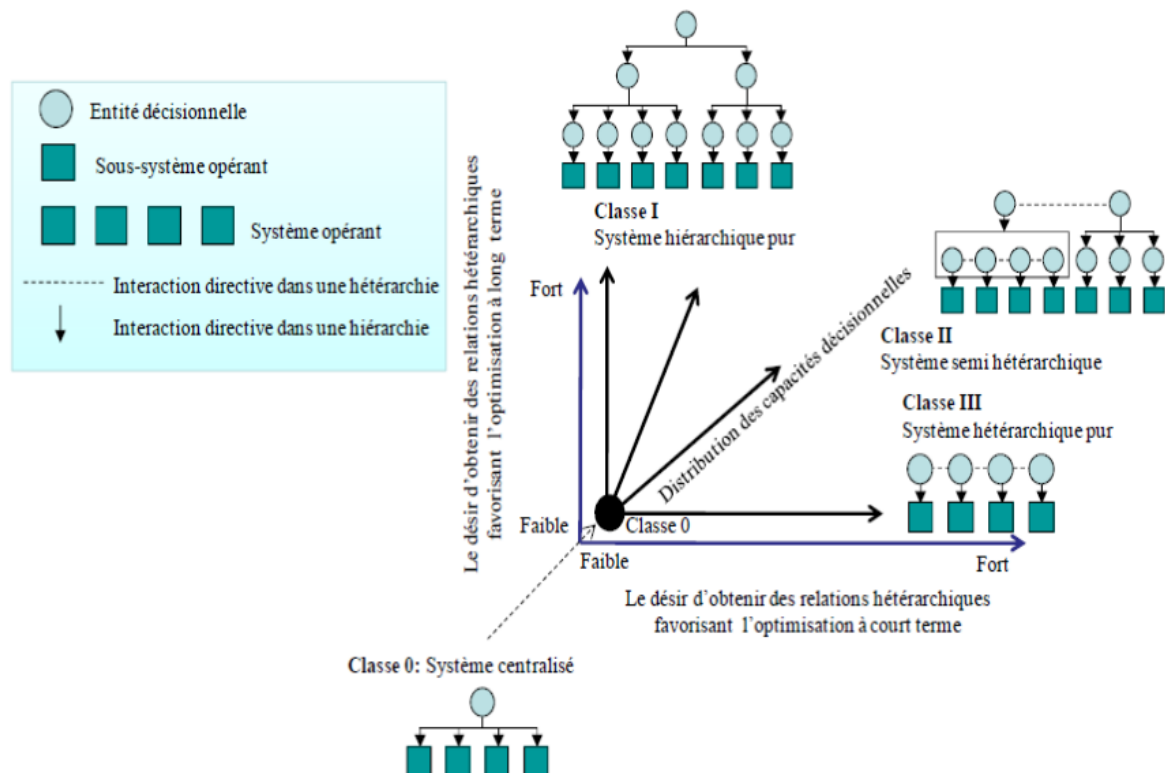


Figure 2- 3: Représentation des différentes classes de système de pilotage [23]

Dans le cadre de notre étude, nous optons pour une architecture de pilotage hybride que nous considérons être la plus adaptée. Le choix du pilotage hybride résulte du fait que l'AGV nécessite une certaine indépendance de prise de décision notamment lors de son déplacement à travers un environnement dynamique où il devra choisir le chemin le plus court mais aussi éviter les éventuels obstacles. Par ailleurs, il est nécessaire de communiquer avec les autres postes de travail afin de garantir une coordination globale.

2.4 La Fonction Ordonnancement dans un Système de Production Flexible (FMS)

La fonction ordonnancement représente l'allocation des différentes ressources, humaines ou techniques, aux tâches sur une durée spécifique avec le but d'atteindre un ou plusieurs objectifs [24]. Il s'agit de la fonction la plus complexe mais aussi la plus importante dans un système de pilotage.

Les systèmes de production flexible sont des systèmes manufacturiers hautement automatisés et constitués de plusieurs sous-systèmes. Les systèmes de production flexible sont contrôlés par un système de pilotage décentralisé. Durant le cycle de vie d'un FMS, plusieurs problèmes sont discutés notamment le design, l'ordonnancement, la planification et le contrôle. Le problème fondamental reste l'ordonnancement car il affecte directement les performances du système. Le problème d'ordonnancement des AGVs dans un FMS sont reliés au Flexible Job Shop Problem (FJSP) en considérant le routage de l'AGV transportant les produits à réaliser [25].

Le Flexible Job-Shop Scheduling Problem (FJSP) est une version complexe du problème d'ordonnancement d'atelier de travail standard (JSP : Job Shop Problem) qui permet à une opération d'être effectuée par n'importe quelle machine à partir d'un sous-ensemble de machines. L'objectif est d'affecter chaque opération à une machine et d'organiser les opérations sur les machines de manière à ce que le temps total pour effectuer toutes les opérations (makespan) soit le plus court possible [26].

Les sous-problèmes de la fonction ordonnancement dans un système de production flexible :

Selon Ghazi et al [27], le FJSP englobe quatre sous problèmes d'ordonnancement présentés comme suit :

- Sous-problème de la séquence d'entrée du système : concerne la détermination de la manière d'introduire un groupe de produits P dans le FMS dans un ordre spécifique, ainsi que le temps d'entrée.
- Sous-problème d'allocation des machines : correspond au choix de la machine adéquate pour accomplir l'opération « i » sur le produit « j ».
- Sous problème du routage du produit : ce sous-problème concerne le choix du chemin optimal pour le déplacement entre deux machines.
- Sous problème du séquençement du produit : consiste en la commande de produit sur l'entrée d'une machine permettant ainsi la gestion des files d'attentes d'entrées.

En conséquence, le FJSP est confronté à deux sous-problèmes : l'affectation des machines et le séquençement des opérations en suivant le plus court chemin.

L'affectation des machines fait référence au processus d'affectation d'une machine à chaque opération, tandis que le séquençement des opérations fait référence au processus de planification de toutes les opérations sur les machines afin d'optimiser les indicateurs de performance.

2.5 Le Sous-Problème de Routage

Les systèmes AGVs assurent un flux et une distribution efficaces des matériaux entre les postes de travail en temps et à l'endroit précis. Le processus de détermination des itinéraires pour que les AGVs remplissent leurs tâches de transport respectives est appelé **routage**. Le problème du plus court chemin sur un réseau de transfert peut être utilisé pour étudier le problème de routage de l'AGV dans un FMS.

Son but est de trouver le chemin le plus court entre deux nœuds ou sommets. La majorité des systèmes de manutention basés sur les AGV sont centralisés et utilisent un routage statique (itinéraires prédéfinis) qui suivent un chemin fixe. Au lieu d'utiliser un chemin fixe, le routage dynamique pour AGV peut être utilisé pour donner au système beaucoup plus de flexibilité.

Comme mentionné précédemment, l'objectif du routage AGV est de trouver l'itinéraire le plus court et le plus faisable. Par conséquent, plusieurs facteurs doivent être pris en compte lors du choix d'un algorithme de routage. Pour commencer, le routage doit déterminer s'il existe un itinéraire qui conduira l'AGV de sa station d'origine à la destination souhaitée. L'itinéraire choisi doit alors être réalisable, ce qui signifie qu'il ne doit pas y avoir d'embouteillage, de conflit ou d'impasse. Enfin, le parcours de l'AGV doit être optimal, ou à tout le moins partiellement optimal, afin de réduire le nombre d'immobilisations des AGV [17] [28].

Selon Hasan et al [29] les différents types de routage sont représentés par la **figure 2-4** :

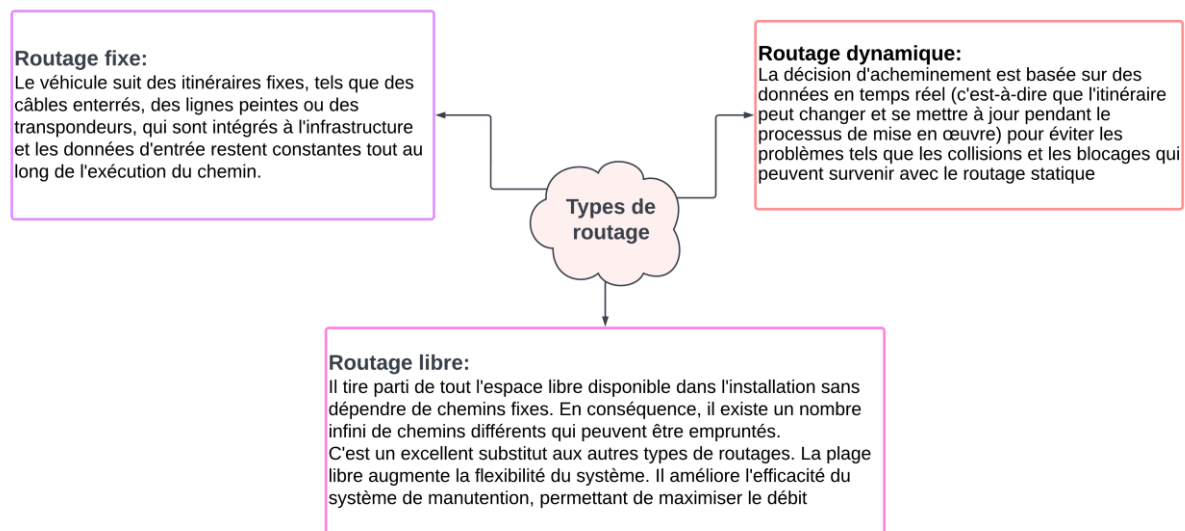


Figure 2- 4: Types de routage

2.5.1 Algorithmes du Chemin le Plus Court

Plusieurs algorithmes peuvent être utilisés pour trouver le chemin le plus court. L'objectif de l'algorithme de routage AGV est de rendre l'optimisation du routage simple et réalisable en termes d'heure d'arrivée, d'évitement d'obstacles statiques et de trajectoires planifiées d'autres AGV.

Chapitre 2 : Le Pilotage des Systèmes de Manutention à Base d'AGV

Selon Hasan et al [29], les algorithmes qui pourrait être proposés pour choisir le chemin le plus court sont présentés dans le **tableau 2-1**.

Tableau 2- 1: Les algorithmes du chemin le plus court.

Algorithme	Définition
Dijkstra [30]	L'un des algorithmes les plus utilisés pour la résolution des problèmes du plus court chemin. L'algorithme débute au nœud d'origine du graphe, puis recherche les nœuds liés, en les marquant avec des valeurs de distance à partir du nœud d'origine. L'algorithme vérifie ensuite tous les nœuds du graphe jusqu'à ce qu'ils soient tous marqués. Le chemin le plus court est créé en connectant les nœuds avec les valeurs les plus basses jusqu'à ce qu'ils atteignent le nœud final.
A* [30]	C'est un algorithme heuristique peut être utilisé en marquant le nœud actuel dans la recherche afin d'aider l'algorithme à déterminer si le nœud actuel est un premier choix pour une recherche ultérieure. L'efficacité du système peut être améliorée en ignorant les nœuds non pertinents.
Fenêtre de temps (SPPTW) [29]	Le chemin est segmenté en plusieurs segments de période fixe. En cas de conflit, l'AGV sera retardé ou réacheminé sur un segment de trajet précédent. Une requête contenant les nœuds à la source et à la destination, ainsi que l'heure d'accès à l'entrée, permettent de déterminer les trajets des différents AGVs.
Particle Swarm Optimization (PSO) [30]	PSO est une technique stochastique basée sur la population inspirée du comportement social des volées d'oiseaux ou des bancs de poissons. Les performances et la précision du processus de calcul peuvent être influencées par la façon dont la première génération est initialisée.
Algorithmes génétiques GA [18]	Les algorithmes génétiques (GA) sont un type d'algorithme de recherche heuristique adaptatif basé sur la sélection naturelle et la génétique. En conséquence, ils représentent une application intelligente d'une recherche aléatoire pour résoudre des problèmes d'optimisation.
PSO-GA [29]	Il possède à la fois un algorithme PSO et un algorithme GA, donc il comporte deux phases ce qui offre l'avantage de l'étude PSO-GA qui est de voir une augmentation de l'amélioration individuelle au fil du temps.

2.6 Le Problème de Séquencement

Plusieurs séquences de lancement de produits peuvent exister en raison de la flexibilité de séquencement, qui définit l'ordre de passage des produits dans les files d'attente dans les postes de travail du système de production [23].

2.6.1 Les Règles de Séquencement

Les règles de séquencement sont utilisées pour choisir une pièce dans une file d'attente de pièces à traiter sur une machine. Lorsqu'un bon de travail est saisi dans le système, la décision de lancer une pièce est cruciale.

Le délai de fabrication de divers composants peut être déterminé par le type de processus, le temps de fonctionnement, la disponibilité des ressources/machines, l'utilisation des fixations de palettes et le niveau d'encombrement des pièces dans le système [31].

Ci-dessous quelques règles de séquencement importantes à prendre en compte :

- En raison de leur rapidité et de leur simplicité, les règles de répartition à attribut unique telles que First In First Out (FIFO) ou Shortest Processing Time (SPT) sont largement utilisées dans les applications industrielles. Étant donné que les règles d'attribut unique ont tendance à bien fonctionner uniquement dans des combinaisons de paramètres très spécifiques, les règles de répartition composites, qui combinent plusieurs terminaux, sont devenues de plus en plus importantes [32].
- La règle du temps de traitement restant le plus court ou SRPT pour Shortest Remaining Processing Time : additionne les temps de traitement des étapes restantes de chaque lot en file d'attente et choisit en premier celle dont le temps de traitement restant est le plus court. Bien que le SRPT soit l'une des règles les plus efficaces pour réduire le temps de cycle, les temps de cycle résultants présentent une quantité de variation inacceptable. En conséquence, la politique de mou est plutôt utilisée comme règle générale de répartition. Pour toute entreprise, de nombreux problèmes devaient être sérieusement pris en compte lors de la phase de conception des règles [31] [33].
- Temps de traitement maximal (MBPT : Maximum Balance Processing Time) : cette option permet de choisir la pièce avec le temps de traitement le plus long [31].

2.7 Conclusion

Les systèmes de pilotage étant les systèmes clés d'un système de production flexible nous avons présenté ces systèmes à travers ce chapitre tout en mettant en exergue les problèmes concernés par notre cas d'étude qui sont les problèmes de routage et de séquencement des AGVs dans un FMS.

Dans le chapitre suivant, nous abordons une présentation globale du processus de conception d'un produit, qui nous permettra par la suite de mettre en application les acquis dans la conception de notre système.

Chapitre 3

Processus de Conception d'un Produit

3.1 Introduction

Dans le monde industriel, la conception d'un produit consiste à inventer, développer et commercialiser un nouveau marché, bien ou service.

Selon la norme NF L00-007, la CONCEPTION D'UN PRODUIT est l'activité créatrice qui, partant des besoins exprimés, des moyens existants et des possibilités technologiques, aboutit à la définition d'un produit satisfaisant ces besoins et industriellement réalisable.

L'application des concepts scientifiques, des mathématiques et de la créativité pour imaginer une structure, une machine, un système ou un artefact remplissant une fonction prédéterminée est la définition de la conception d'un point de vue technique.

Dans ce chapitre nous traitons les différentes étapes de la conception d'un nouveau produit.

3.2 Projet de Conception d'un Produit

La conception est un sous-ensemble de la résolution de problèmes, étant donné que le cycle d'activités requises pour créer une conception est répétitif selon Mital [34], ces activités fondamentales sont les suivantes :

- **Définir le problème** : en recherchant les besoins et l'environnement.
- **Créer un système de valeurs** : en énonçant des objectifs et des critères.
- **Synthèse du système** : le processus de génération d'alternatives.
- **Analyse des systèmes** : (analyse des alternatives).
- **Choisir le meilleur système** : comparer les alternatives par rapport à des critères prédéterminés.
- **Planification des actions** : préciser les choix.

3.2.1 Définir le Problème

Connaître les besoins du marché est essentiel pour développer de nouveaux produits innovants ; cette connaissance est ce qui mène au développement d'une stratégie commerciale réussie. Toute stratégie de développement de produits qui n'est pas basée sur les besoins du marché échouera.

Avant qu'un produit réussi puisse être développé, on doit proposer ou développer une idée pour le conceptualiser. Avant de créer des plans détaillés pour une nouvelle activité commerciale, plusieurs idées prometteuses doivent être développées et analysées. La **figure 3-1** décrit la séquence d'événements qui se produisent lors de la création d'une nouvelle activité commerciale [34].

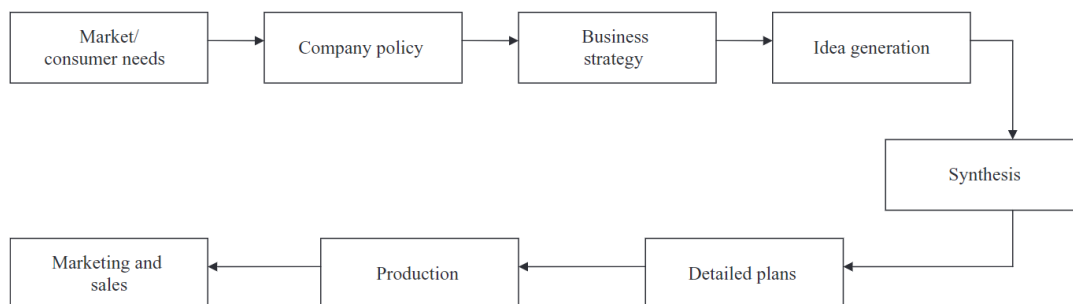


Figure 3- 1: Etapes de conception d'un nouveau produit.

Chapitre 3 : Processus de Conception d'un Produit

Selon Mital [34], une entreprise doit créer des produits de haute qualité que le marché **veut rapidement**, à **moindre coût**, **facilement** et **efficacement**. Cette définition donne les caractéristiques suivantes d'un processus de développement de produit réussi :

- **Coût** : à la fois le coût de production et le coût total de développement.
- **Qualité** : la qualité du produit.
- **Temps de développement du produit** : de l'évaluation des besoins du marché à la vente du produit.
- **Développement du savoir-faire** : la capacité à répéter le processus pour les futurs produits.

3.2.2 Définir le Besoin et les Objectifs

Selon Mital [34], la méthode de l'arbre d'objectifs est un format utile pour développer et clarifier les objectifs. L'intention est de préparer une séquence d'objectifs et de sous-objectifs en commençant par un énoncé général ou un objectif général.

Parce que le début du problème, et donc la solution de conception, est généralement flou, la première étape consiste à énoncer l'objectif général et à le clarifier progressivement. Il est possible que l'objectif initial change ou soit considérablement modifié au cours du processus. Un tel changement ou modification reflète une meilleure compréhension du problème et, par conséquent, une solution de conception plus appropriée.

Les moyens d'atteindre le résultat peuvent changer à mesure que l'objectif passe d'un objectif général à un objectif spécifique. L'objectif doit être réitéré dans un langage clair et précis à chaque étape du changement. Les critères d'évaluation des solutions de conception émergent au fur et à mesure que l'objectif se précise ou se décompose en sous-objectifs. Ces sous-objectifs sont appelées spécifications de conception.

3.2.3 Synthèse du Système

Une fois que la liste des objectifs a été réexaminée, consolidée et éditée, une analyse fonctionnelle doit être effectuée pour déterminer ce que le produit doit atteindre (et non comment). À cette fin, le produit peut être considéré comme une boîte noire qui convertit des entrées spécifiées en sorties. La fonction globale doit être aussi large que possible, et c'est ce que la conception du produit réalise : la conversion des entrées en sorties [34].

3.2.4 Développement de Conceptions Provisoires

Suite à la définition du besoin et des objectifs d'un produit, l'équipe chargée de la phase de conception peut entamer le développement des premières idées de conception (ex. fonctions, dimensions du produit). Les outils utilisés lors de cette phase peuvent être déterminés selon le type de produit et les disciplines que le produit regroupe.

Lors de la conception d'un produit, la priorité de l'équipe est le design d'un produit attractif. En effet, la qualité du produit n'est pas nécessairement une priorité lors de cette phase ce n'est qu'après le développement de toutes les idées de conception qu'elles seront jugées, ce qui rend cette phase particulièrement longue car elle nécessite parfois la reprise de quelques idées [35].

3.2.5 Prototypage et Validation

La phase de prototypage est principalement menée dans le but de valider les différentes idées de conceptions élaborées. En effet, plusieurs prototypes d'un seul produit peuvent être développés dans cette phase tout en offrant la possibilité de modifier quelques détails de la conception tels que : les dimensions d'un produit et les techniques d'assemblage.

Après plusieurs tests effectués sur les différents prototypes, le produit optimal qui pourra être produit à grande échelle est désigné ainsi que les différents paramètres qui lui correspondent [35].

3.3 Description des Etapes de Conception du Cas d'Etude

A travers les différentes phases de développement d'un produit exprimées ci-dessus, nous avons mis en place un plan nous permettant d'organiser les étapes de conception à suivre afin d'aboutir à une réalisation de l'AGV.

3.3.1 Définition du Problème

Avant d'entamer les différentes étapes de conception du système, il va falloir tout d'abord effectuer une recherche bibliographique qui permet de définir les différentes technologies employées et de collecter les données et informations nécessaires à la conception de l'AGV.

3.3.2 Définition du Besoin et des Objectifs

Après avoir effectué un état de l'art concernant les systèmes de manutention à base d'AGV, nous définissons le système en exprimant le besoin, les interactions avec l'environnement extérieur et les différentes solutions technologiques permettant sa réalisation.

Cette étape du processus concerne d'une part la définition d'un projet qui peut être effectuée en utilisant la méthode QQQQCP (ou **Quoi, Qui, Où, Quand, Comment, Pourquoi**) qui est un outil précieux pour spécifier avec précision toutes les parties d'un projet avant son lancement ceci en répondant à ses questions. D'autre part, l'analyse fonctionnelle d'un système qui peut être réalisée selon différentes méthodes :

- La méthode classique en utilisant des diagrammes tels que le diagramme bête à corne, le diagramme de pieuvre, le diagramme FAST ou encore le diagramme SADT.
- La méthode basée sur le SysML qui a été adopté en tant qu'outil d'analyse fonctionnelle suite au développement des systèmes complexes. En effet, un système complexe aujourd'hui est un ensemble de composants interagissant entre eux. Le SysML est un ensemble d'outils graphiques permettant de spécifier, concevoir, définir et analyser la structure et le fonctionnement d'un système [37][36].

L'avantage que présente le SysML sur les méthodes d'analyse fonctionnelle classiques est le fait qu'il permette une expression plus structurée du besoin notamment à travers le diagramme de cas d'utilisation ainsi qu'une modélisation des différentes interactions entre les composants internes du système à travers le diagramme de définition de blocs et le diagramme de bloc interne. Par conséquent, notre choix va se porter vers le SysML pour l'analyse fonctionnelle du système à concevoir.

La **figure 3-2** illustre les différents diagrammes du langage SysML :

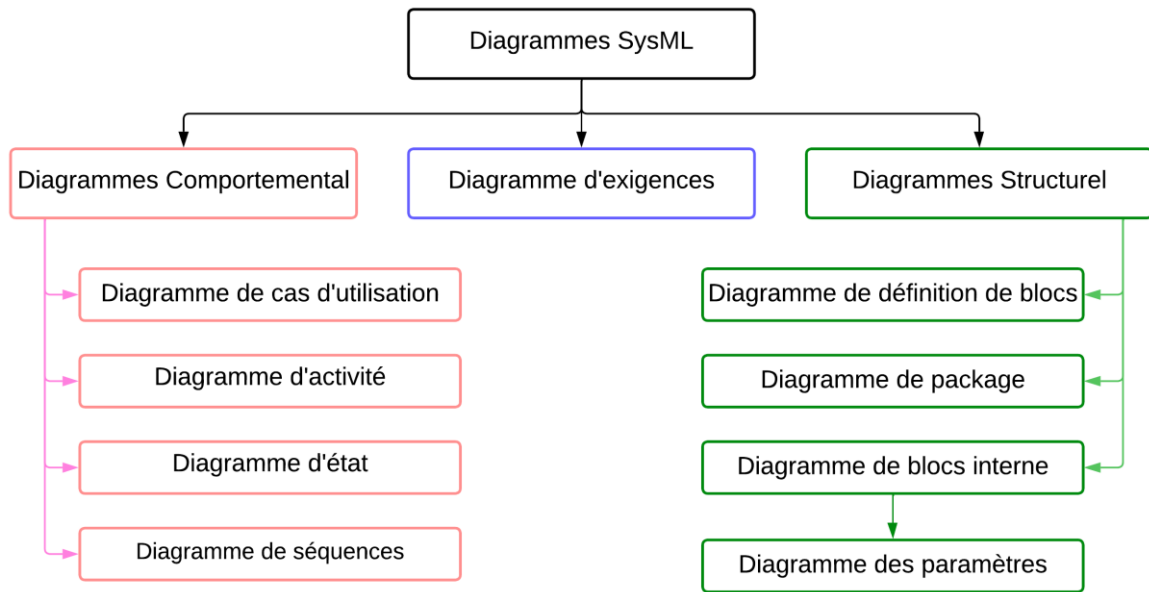


Figure 3- 2: Diagrammes SysML

3.3.3 Conception Détaillée

Lors de l'étape de la conception, le système étant multidisciplinaire, cette étape est divisée en quatre sous-parties principales :

Sous-partie mécanique à travers laquelle nous étudions le choix des caractéristiques du moteur, la conception mécanique du châssis et une étude RDM afin de déterminer la résistance du châssis par rapport aux poids des produits transportés. L'outil utilisé pour la réalisation de cette étape est principalement SolidWorks qui est un outil de conception mécanique permettant la simulation et la mise en place de l'étude RDM.

Sous-partie électronique à travers laquelle nous présentons les différents composants électroniques de l'AGV ainsi que le circuit électrique présenté en utilisant le logiciel Fritzing.

Sous-partie informatique à travers laquelle nous mettons en évidence les différentes installations logicielles afin d'entamer la programmation sous Python de l'AGV sur Raspberry Pi 3.

Sous-partie automatique à travers laquelle nous allons effectuer une modélisation graphique du système AGV en utilisant Bond Graph sous le logiciel SIM20 et une modélisation analytique à travers les systèmes d'équations. Cette représentation nous permet de décrire l'aspect interne du système AGV.

Chapitre 3 : Processus de Conception d'un Produit

Les deux méthodes suivantes ont été choisies grâce aux avantages suivants :

La méthode Bond Graph « BG » est un outil basé sur la notion de transfert d'énergie ou de puissance. Il est en développement rapide et fournit une méthode systématique de conception structurée du modèle. Parmi ses nombreux avantages, citons : il peut être appliqué de manière unifiée pour traiter les formes multi-énergies du système ; la méthode de modélisation modulaire simplifie la modélisation des systèmes complexes ; et il est facile de simplifier le modèle basé sur l'idée de modélisation du transfert d'énergie.

La représentation d'état est un outil important dans la description des systèmes dynamiques. Outre les nombreuses propriétés, la représentation d'état permet des simulations efficaces du système. Enfin, ce formalisme est à l'origine de plusieurs méthodes de commande du système.

3.3.4 Prototypage et Essais

L'étape de prototypages et d'essais est la dernière étape de notre projet. Dans cette partie, nous procédons à la mise en place du circuit de manutention au niveau de la cellule d'assemblage flexible et nous assemblons les composants électronique et mécanique de l'AGV dans le but d'effectuer des tests et de valider le prototype proposé.

Par la **figure 3-3**, nous récapitulons les différentes étapes du développement du système :

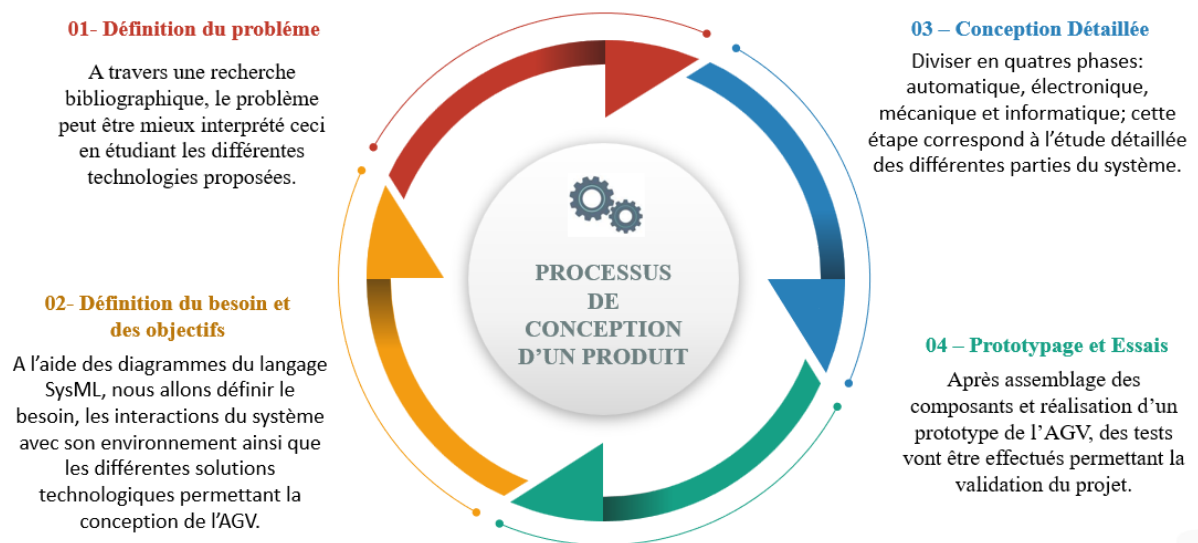


Figure 3- 3: Diagramme du processus de développement du système AGV.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité les différentes étapes de conception d'un produit pour pouvoir par la suite mettre en place un plan à suivre pour la conception de l'AGV.

Dans le chapitre suivant, nous entamons la phase de définition du projet en commençant tout d'abord par la présentation de la cellule d'assemblage puis la définition du projet en question. Ensuite, nous abordons l'analyse fonctionnelle du système pour aboutir à un algorithme de fonctionnement de l'AGV.

Chapitre 4

Etude Générale du Système de Manutention à Base d'AGV

4.1 Introduction

Le système à concevoir est un système de manutention composé d'un AGV et d'un circuit de manutention adapté au mode de navigation de l'AGV. Le but principal à travers cette partie est d'exprimer le besoin de conception et de réalisation ainsi que de définir les composants de ce système en utilisant les quatre diagrammes SysML : le diagramme de cas d'utilisation, le diagramme d'exigences, le diagramme de définition de blocs et le diagramme de blocs interne.

4.2 Présentation de la Cellule d'Assemblage Flexible

4.2.1 Présentation de la Cellule d'Assemblage

Le système de manutention est implémenté au niveau d'une cellule d'assemblage flexible composée de quatre postes de travail, d'un stock de pièces maitresses, d'un stock de produits finis et d'un poste de chargement/déchargement.

La schématisation de la cellule est réalisée sous le logiciel « Anylogic ». Ce logiciel permet d'une part de visualiser la cellule en 2D et en 3D ainsi que la simulation des systèmes.

Les figures 4-1 et 4-2 représentent la cellule en 2D et en 3D respectivement.

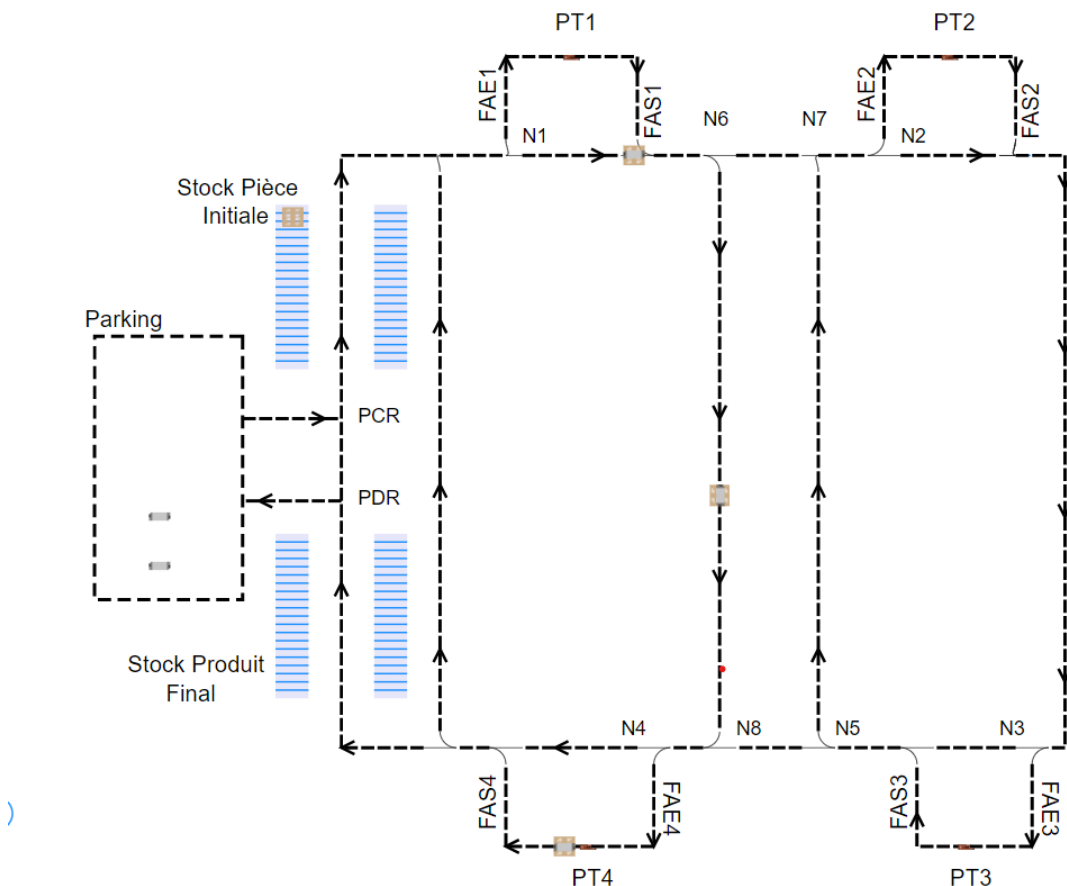


Figure4- 1: Présentation de la cellule en 2D.

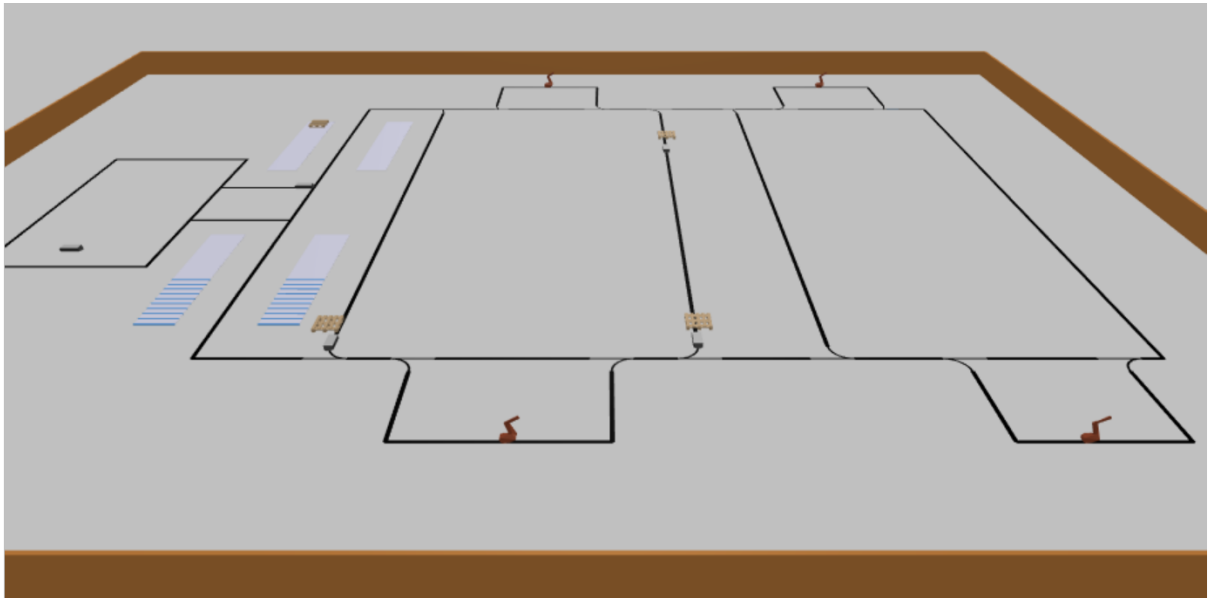


Figure4- 2: Présentation de la cellule en 3D

La cellule d'assemblage flexible est exploitée pour l'assemblage de différents produits. Quatre produits dans notre cas d'étude, au niveau de quatre postes de travail. La pièce maitresse est initialement entreposée au niveau du stock initial, une fois récupérée par le transporteur elle sera acheminée vers les différents postes de travail responsables de l'assemblage du produit final voulu. A la fin des opérations d'assemblage le produit final est transporté vers le stock produit final.

La **figure 4-3** illustre le diagramme d'activité qui représente la succession des activités permettant le bon fonctionnement de la cellule d'assemblage.

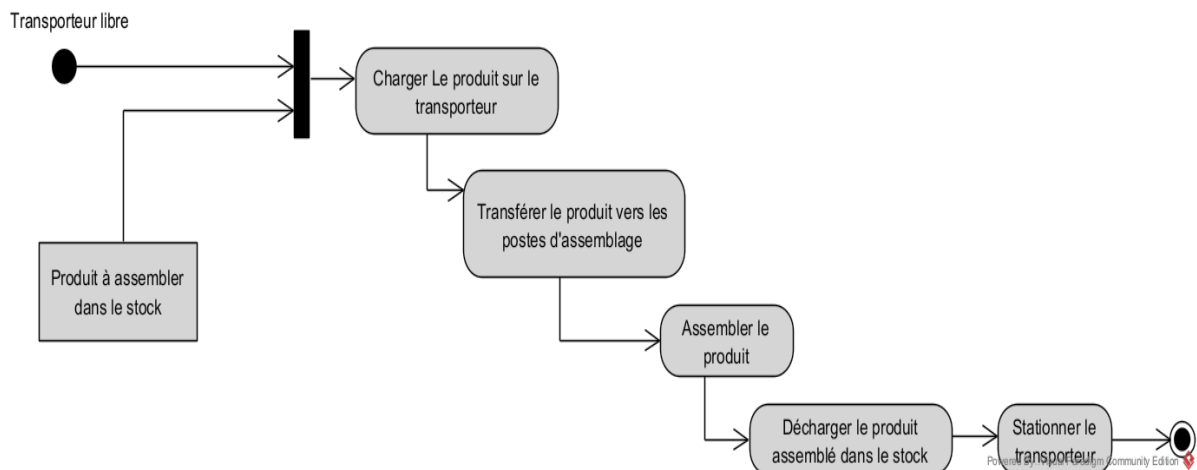


Figure4- 3: Diagramme d'activité du fonctionnement du système global

4.3 Définition du Projet

Avant d'entamer l'analyse fonctionnelle, nous allons d'abord présenter et définir le système que nous allons concevoir. Les réponses aux questions de la technique QQQQCP sont présentées dans le **tableau 4-1**.

Tableau 4- 1: Définition du projet par la méthode de QQQQCP

Quoi ?	Transporter le produit à assembler à travers les postes de travail.
Qui ?	AGV.
Où ?	Cellule d'assemblage flexible.
Quand ?	Lorsqu'il y a une commande d'assemblage.
Comment ?	Adopter un mode de navigation adéquat suivant le chemin optimal.
Pourquoi ?	Assembler le produit en optimisant le temps d'attente et de transport.

4.4 Analyse Fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle est une démarche permettant de caractériser les fonctions d'un système et ses interactions avec son environnement. L'analyse nous aide à déterminer les besoins du système et de pouvoir ainsi définir les solutions technologiques nécessaires à sa conception.

Cette démarche est principalement divisée en deux parties : la première concerne l'analyse fonctionnelle externe servant à définir et à exprimer le besoin du système ; la seconde concerne l'analyse fonctionnelle interne permettant de mettre à l'évidence les solutions technologiques nécessaires à l'exécution de chaque fonction interne du système.

La **figure 4-4** représente les différents diagrammes qui sont utilisés :

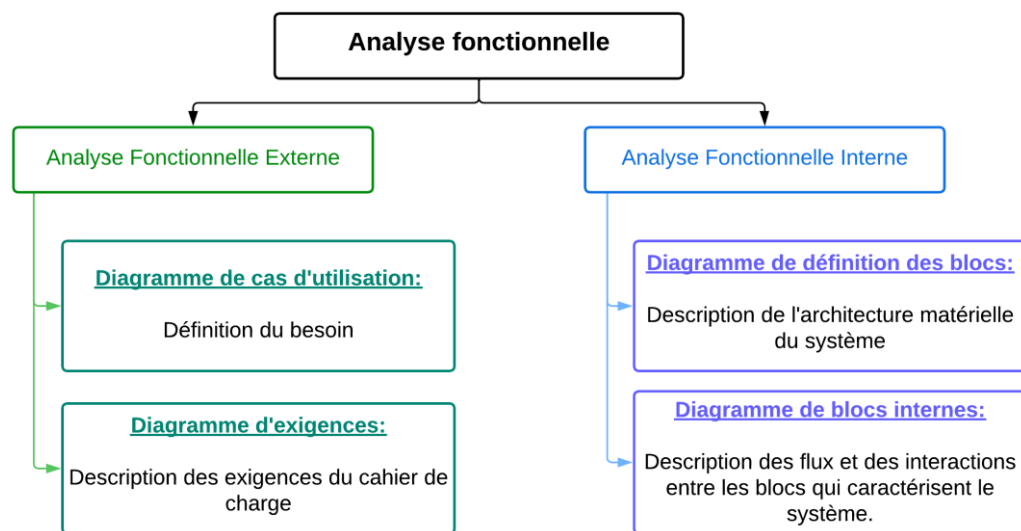


Figure4- 4: Les diagrammes utilisés dans l'analyse fonctionnelle.

4.4.1 Analyse Fonctionnelle Externe

L'analyse fonctionnelle externe d'un projet représente la définition et l'expression du besoin de conception du système. Pour ce faire, nous avons choisi d'utiliser les diagrammes Sysml à savoir le diagramme de cas d'utilisation pour la définition du besoin et le diagramme d'exigences pour exprimer le besoin.

4.4.1.1 Définition du Besoin

- Diagramme de Cas d'Utilisation « DCU »

La première étape de l'analyse fonctionnelle d'un projet consiste en la définition du besoin, d'où la nécessité de mettre en place un diagramme modélisant le système, son utilisateur et sur quoi il va agir. A travers le diagramme de cas d'utilisation, montré par la **figure 4-5**, du système de manutention (circuit de manutention et AGV) nous définissons les différents cas d'utilisation de notre système.

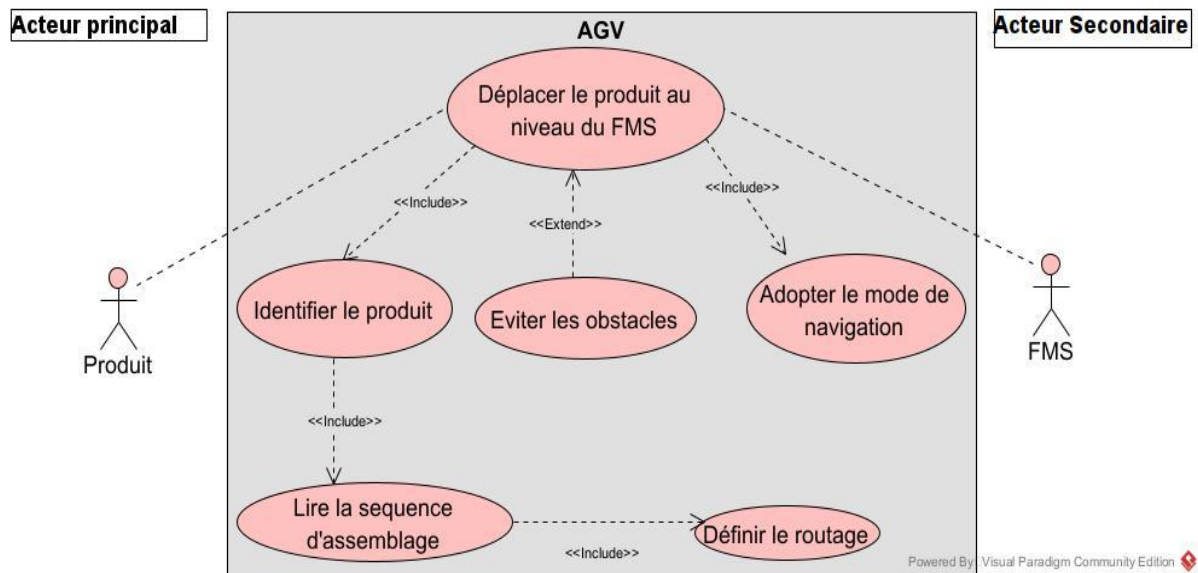


Figure4- 5: Diagramme de cas d'utilisation.

Le système de manutention est utilisé par la cellule d'assemblage flexible représentée par l'acteur externe FMS afin de déplacer les produits à travers ses différents postes de travail. Sa fonction principale étant de déplacer le produit au niveau du FMS, cela engendre différentes fonctions secondaires notamment d'adopter le mode de navigation, d'identifier le produit via la pièce maitresse, de lire la séquence d'assemblage pour suivre le routage via le choix du chemin à prendre tout en évitant les obstacles sur son chemin en cas de leur présence.

4.4.1.2 Expression du Besoin

- Diagramme d'Exigences

Les interactions du système avec son environnement externe lui permettent d'assurer un bon fonctionnement. A travers le diagramme d'exigence illustré par la **figure 4-6**, nous représentons les interactions du système de manutention avec son environnement, permettant ainsi de créer le cahier des charges fonctionnel.

Chapitre 4 : Etude Générale du Système de Manutention à Base d'AGV

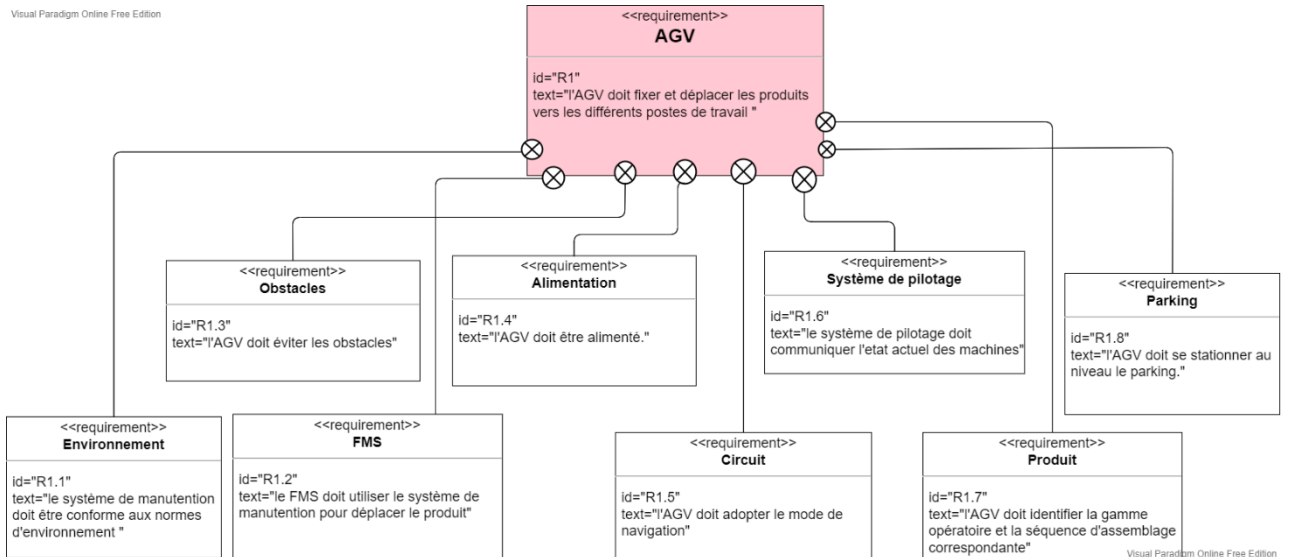


Figure4- 6: Diagramme d'exigences de l'AGV

4.4.1.3 Cahier des Charges Fonctionnel

Après l'expression du besoin et la modélisation des relations de notre système avec son environnement extérieur, nous exprimons les critères et les niveaux d'exigences de chaque fonction, à travers le cahier des charges fonctionnel, en vue d'effectuer une analyse fonctionnelle interne et trouver les solutions technologiques permettant la conception de notre système.

Tableau 4- 2: Cahier des charges fonctionnel.

Fonction	Critères :	Niveau d'exigence :
1	- Masse du produit. - Dimensions du produit. - Alimentation. - Unité d'entraînement.	276 - 540 g 197 X 197 X 10 12V CC - Moteurs DC
1.1	Recyclage	Matériaux recyclable
1.2	Dimensions	3500 X 4500
1.3	- Champ de détection. - Tension.	0.5 m vers l'avant de l'AGV 3.3/5V
1.4	Alimenter les moteurs et les composants électriques.	Tension 12V
1.5	- Portée de détection. - Tension.	- Entre 1 et 5.5 mm 3.3/5V
1.6	Moyen de communication.	WIFI.
1.7	- Identification du produit via sa pièce maitresse - Fixation de la pièce maitresses.	- Un identifiant unique pour chaque gamme opératoire. - Mécanisme adéquat.
1.8	Les dimensions du parking.	Selon les dimensions et le nombre d'AGVs.

4.4.2 Analyse Fonctionnelle Interne

L'analyse fonctionnelle interne d'un système permet de visualiser les différentes fonctions internes ainsi que les solutions technologiques les assurant. Pour notre cas d'étude nous avons choisi d'utiliser le langage graphique de représentation SysML constitué de plusieurs diagrammes. Nous avons choisi le diagramme de définition de Blocs afin de représenter les composants de notre AGV et le diagramme de blocs interne afin de représenter les flux entre ces composants.

4.4.2.1 Diagramme de Définition de Blocs BDD

Le système de manutention est composé d'un circuit de manutention, à travers lequel va se déplacer un AGV transportant la pièce à assembler. L'AGV est composé d'un ensemble de quatre sous-systèmes :

- 1- Un système d'alimentation qui fournit l'énergie électrique via une batterie et des fils conducteurs.
- 2- Un système de contrôle qui assure le pilotage de l'AGV et la communication entre les périphériques d'entrées/sorties.
- 3- Un système mécanique qui représente la forme de l'AGV et les éléments qui assure son déplacement tels que les moteurs et les roues.
- 4- Un système de fixation utilisé principalement pour fixer le produit sur l'AGV.

La **figure 4-7**, illustration du diagramme de définition des blocs représentant les différents composants de l'AGV.

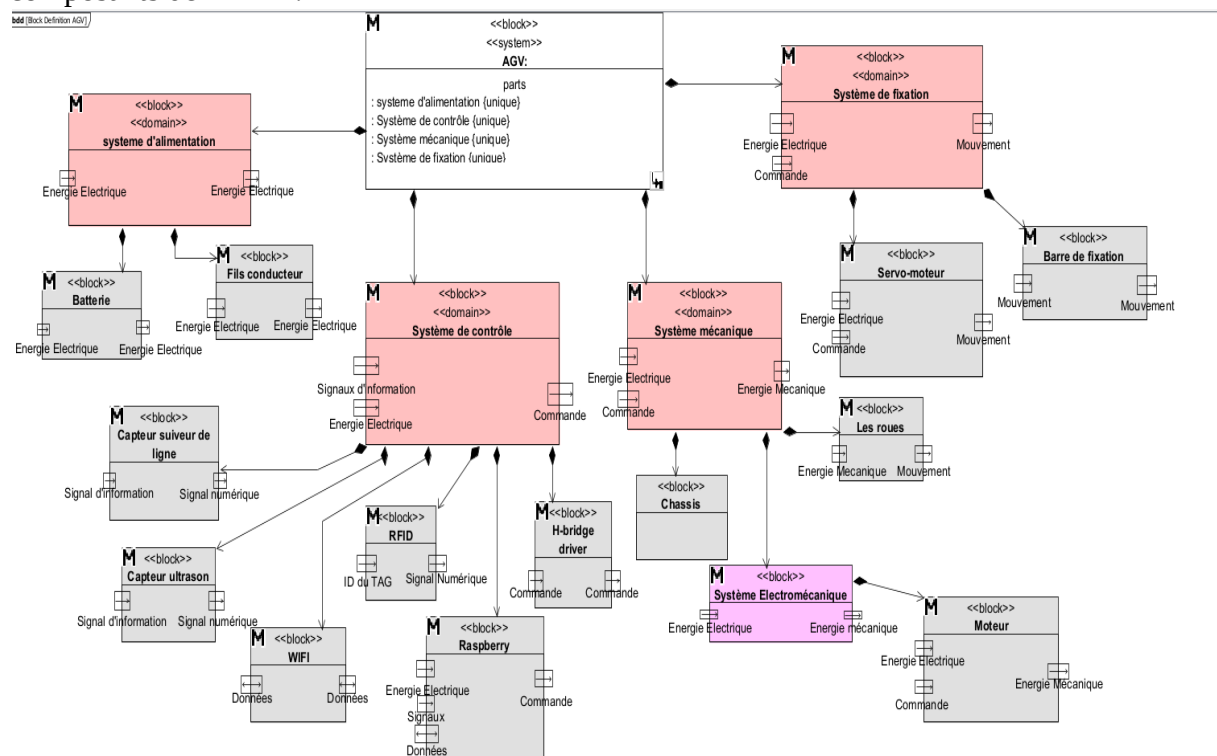


Figure4- 7: Diagramme de Définition de Blocs BDD de l'AGV.

4.4.2.2 Digramme de Blocs Interne IBD

Le diagramme de blocs interne est utilisé afin de représenter Les interactions entre les différents sous-systèmes de l'AGV notamment le système d'alimentation, de contrôle, de fixation et le système mécanique, modélisant ainsi les flux entre tous les composants de l'AGV.

La **figure 4-8** illustre le diagramme de blocs interne IBD de l'AGV.

Chapitre 4 : Etude Générale du Système de Manutention à Base d'AGV

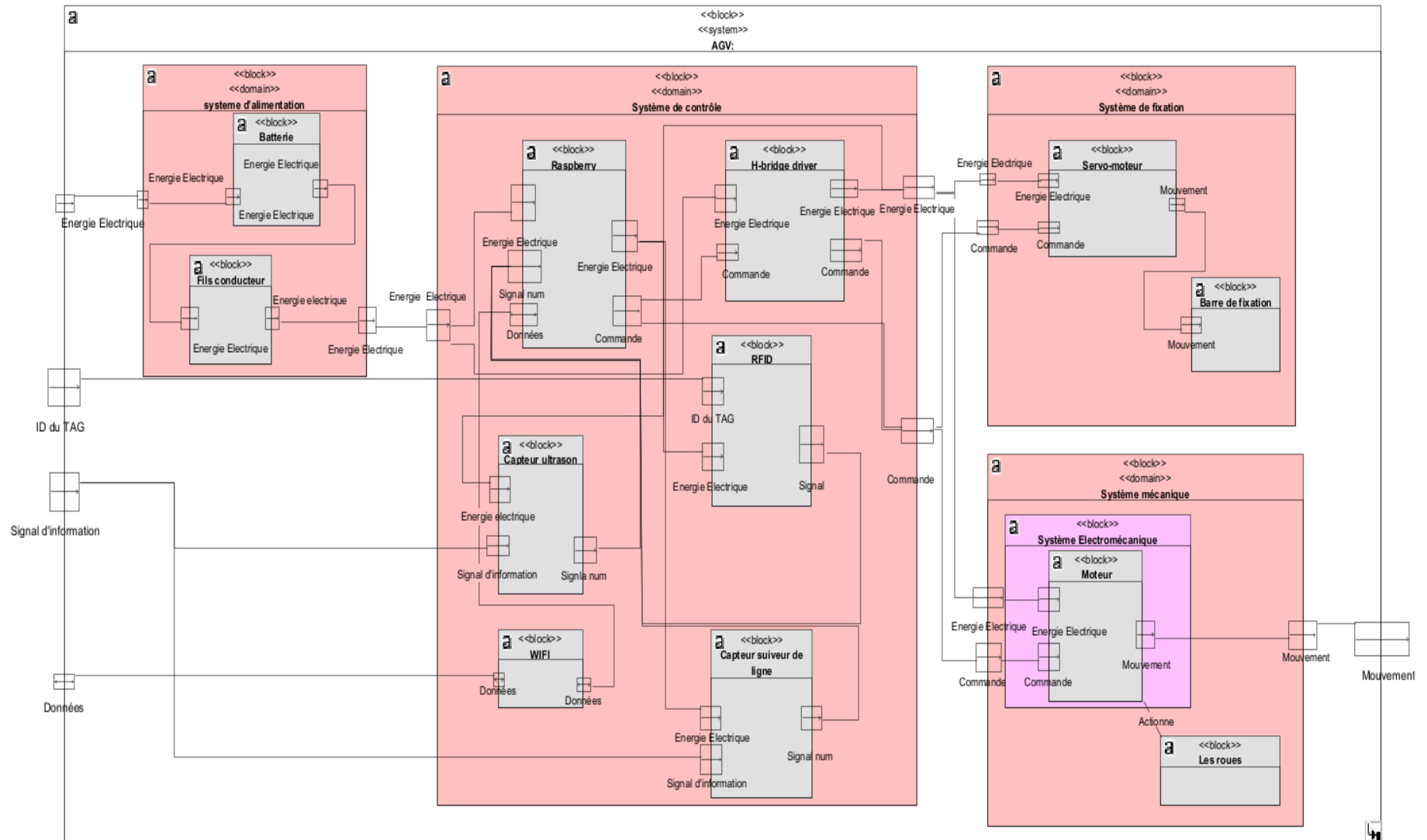


Figure4- 8: Diagramme de Blocs Internes IBD de l'AGV.

4.5 Fonctionnement de l'AGV

Après la définition des fonctions et des principaux composants de notre AGV, nous définissons l'algorithme décrivant son fonctionnement. Afin de mieux définir l'algorithme, nous utilisons le diagramme d'activité pour modéliser dans un premier temps les passages entre les différentes activités de notre système. La **figure 4-9** représente le diagramme d'activité de l'AGV à concevoir :

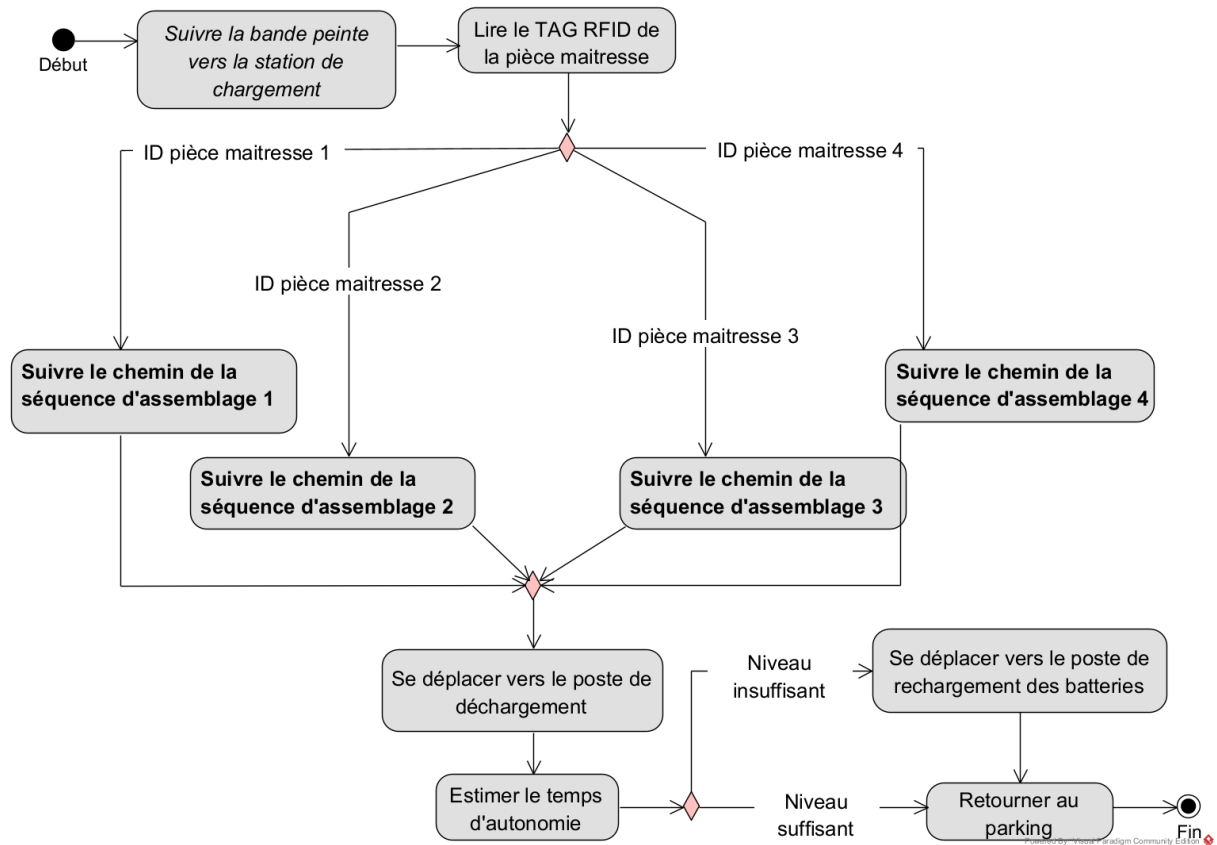


Figure4- 9: Diagramme d'activité du fonctionnement de l'AGV.

Le **tableau 4-3** représente les abréviations désignant les différentes parties du système :

Tableau 4- 3: Tableau des abréviations de l'algorithme

Abréviation	Poste correspondant
N_x	Point d'aiguillage (x)
O_n	Opération (n)
PM_i	Pièce maitresse (i)
PS_{ik}	Pièce secondaire(ik)
PR_i	Produit final (i)
PCR	Poste de chargement
PDR	Poste de déchargement
PT_j	Poste de travail (j)
FAE_j	Fil d'attente d'entrée au poste de travail (j)
FAS_j	Fil d'attente de sortie au poste de travail (j)

4.5.1 Algorithme Principal

A partir du diagramme d'activités présenté précédemment, nous mettons en place l'algorithme de fonctionnement de notre AGV :

- 1- En situation initial du système, les AGVs sont stationnés dans le parking dans l'attente d'un ordre d'assemblage et les pièces maitresses sont dans le stock initial au niveau du poste de chargement.
- 2- Dès la réception de l'ordre d'assemblage, l'AGV libre se déplace vers **PCR** pour récupérer la **PM_i** correspondante, selon le TAG RFID lu par l'antenne du lecteur RFID. L'AGV lit la gamme opératoire du produit.
- 3- Après lecture de la gamme opératoire **GO**, pour assembler **PR_i** :
 - a- Identifier l'opération **O_n**
 - b- Identifier l'ensemble des postes de travail associés à **O_n**
 - c- Lancer l'**algorithme du routage**.
 - d- Suivre la bande peinte jusqu'à détection du TAG RFID **N_x** correspondant au **PT_j** sélectionné.
 - e- Entrer dans la file d'attente d'entrée **FAE_j** du poste et à l'aide des capteurs ultrasons l'AGV détecte la présence des autres AGVs
 - **Si d'autres AGVs sont présents** : il se place derrière le dernier AGV présent sur la file.
 - **Sinon** : il se déplace jusqu'à **PT_j** pour réaliser **O_n**.
 - f- A la fin de l'opération il se dirige vers la sortie du poste **FAS_j** où il va vérifier la présence d'un obstacle :
 - **Si un obstacle est présent** : il attend au niveau de **FAS_j** jusqu'à libération du chemin.
 - **Sinon** : il rejoint le chemin principal.
 - g- Supprimer **O_n** de **GO**.
- 4- Consulter **GO** :
 - Si la **GO** $\neq \emptyset$, reprendre l'algorithme à partir de l'étape **3.a**
 - Sinon L'AGV se déplace vers **PDR** ou le produit assemblé **PR_i** sera stocké.
- 5- L'AGV estime son temps d'autonomie :

Si le niveau est insuffisant pour une prochaine séquence d'assemblage : il se déplace vers le poste de rechargement.

Sinon : il se dirige directement vers le parking.
- 6- Au niveau du poste de rechargement :
 - a- A l'aide du capteur **ULTRASON** il détecte la présence des autres AGVs :

Si d'autres AGVs sont présent : il se place derrière le dernier AGV présent sur la file.

Sinon : il se déplace jusqu'au poste de rechargement.
 - b- A la fin de l'opération il retourne vers le parking.

4.5.2 Algorithme de Routage

Dans cette partie, nous proposons un algorithme de routage permettant à l'AGV de déterminer le poste de travail vers lequel il doit se déplacer pour l'exécution d'une opération donnée selon les conditions temps-réel des postes de travail.

1. Initialisation :

Chapitre 4 : Etude Générale du Système de Manutention à Base d'AGV

- Initialiser la **position actuelle** de l'AGV dans la cellule correspondant au **point de départ**.
- Sélectionner les **postes de travail** correspondants à la **prochaine opération**.
- Initialiser les **distances** entre le point de départ et les différents points d'arrivée.
- Lire les différents **temps d'attente** associés aux différents postes de travail sélectionnés.

2. Détermination du choix optimal :

- Calculer le **temps de transport** entre le point de départ et les différents points d'arrivée.
- Calculer le **temps total** avant exécution de la prochaine opération pour chaque poste de travail.
- Comparer les temps calculés et déterminer le **temps minimal**.
- Déterminer le poste de travail optimal.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par présenter l'environnement de travail qui est la cellule d'assemblage flexible pour pouvoir par la suite définir le besoin de notre projet d'étude à savoir l'AGV, son cahier des charges ainsi que ses composants internes et les relations entre eux. Ensuite, nous avons élaboré un algorithme décrivant le fonctionnement principal et le routage de l'AGV.

Dans le chapitre suivant, nous abordons la partie conception de l'AGV, regroupant les quatre parties : automatique, électronique, mécanique et informatique.

Chapitre 5

Conception Détaillée du Système de Manutention à Base d'AGV

5.1 Introduction

Suite à la mise en place des différents diagrammes définissant le système à concevoir, nous allons aborder la phase de conception de l'AGV à travers ce chapitre. Etant un système pluridisciplinaire, un AGV peut être décomposé en quatre sous-systèmes distincts : automatique, mécanique, électronique et informatique.

Le but à travers cette décomposition est de visualiser la répartition des différents composants de l'AGV et de faire une étude de conception complète.

5.2 Sous-Système Automatique

Le sous-système automatique d'un AGV comprend la modélisation du moteur-roue selon la méthode du Bond Graph et la représentation d'état. Le but à travers cette modélisation est d'obtenir une représentation d'état permettant par la suite d'appliquer un correcteur PID.

Le correcteur PID augmente la performance du moteur et assure un meilleur fonctionnement de l'AGV.

5.2.1 Modélisation du Système AGV

La modélisation d'un système dépend de la complexité de ce dernier. Dans notre cas d'étude, nous avons choisi d'utiliser la modélisation graphique par Bond Graph (BG) et la modélisation mathématique par équation d'état.

5.2.1.1 Modélisation par Bond Graph

La modélisation en utilisant le Bond Graph permet de représenter les échanges de puissances d'un système ainsi que les échanges des flux et des efforts entre les différents composants d'un système [38].

Afin d'aboutir au modèle Bond Graph du système, nous allons d'abord déterminer les différents éléments physiques du système. Ensuite, nous déterminons les efforts appliqués et enfin attribuons une jonction 0 ou une jonction 1 à laquelle seraient associés les éléments physiques correspondants.

Dans notre cas d'étude, nous modélisons le sous-système de l'AGV par moteur DC et une roue. Le moteur étant alimenté par l'énergie électrique fournie par la batterie, il va transformer cette énergie en énergie mécanique permettant de faire tourner la roue et de déplacer l'AGV.

Le circuit électrique illustré par la **figure 5-1** représente le circuit électrique de l'induit d'un moteur DC.

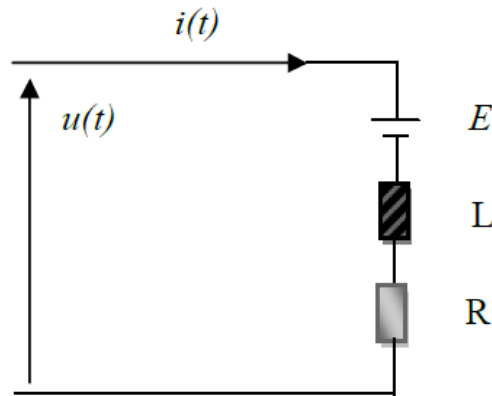


Figure 5- 1: Circuit électrique de l'induit d'un moteur DC

La **figure 5-2** représente le circuit de commande d'un moteur DC.

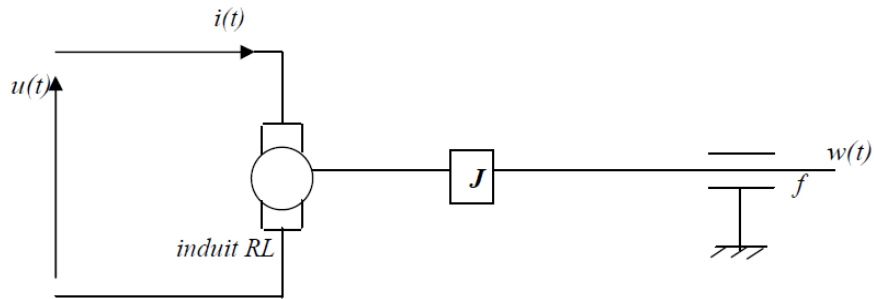


Figure 5- 2: Circuit de commande d'un moteur DC.

A travers ces deux circuits, nous pouvons établir les équations de la tension et du couple du moteur DC, ce qui nous permet de mettre en place le modèle Bond Graph.

$$\begin{cases} U = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} + E & (a) \\ C = J \frac{\partial \Omega}{\partial t} + f\Omega & (b) \end{cases} \quad (5.1)$$

Chapitre 5 : Conception Détaillée du Système de Manutention à Base d'AGV

Tel que :

R :	Résistance
L :	Inductance
U :	Tension
i :	Intensité du courant
Ω :	Vitesse de rotation
J :	Moment d'inertie du rotor
C :	Couple
E :	Force électromotrice
F_r :	Force de la roue
F_{res} :	Force résistante
M_r :	Masse de la roue
v_r :	Vitesse de la roue

La roue étant confrontée aux conditions extérieures, la modélisation des forces appliquées à la roue est représentée par l'équation (5.2) :

$$F_r - F_{res} = M_r \frac{\partial v_r}{\partial t} \quad (5.2)$$

A partir des trois équations ci-dessus (5.1 (a), 5.1 (b) et 5.2), nous établissons le modèle Bond Graph du système Moteur-Roue comme suit :

- Les liens de puissance connectent les multiports et représentent la puissance échangée entre eux, ces liens sont désignés par le symbole d'une demi-flèche.
- La puissance s'exprime comme le produit de deux variables complémentaires :
 1. La variable d'effort e
 2. La variable de flux f
- La causalité permet de faire apparaître graphiquement les relations de cause à effet et l'orientation de calcul des équations caractéristiques. (Voir Annexe C)

Le résultat est montré par la **figure 5-3** comme suit :

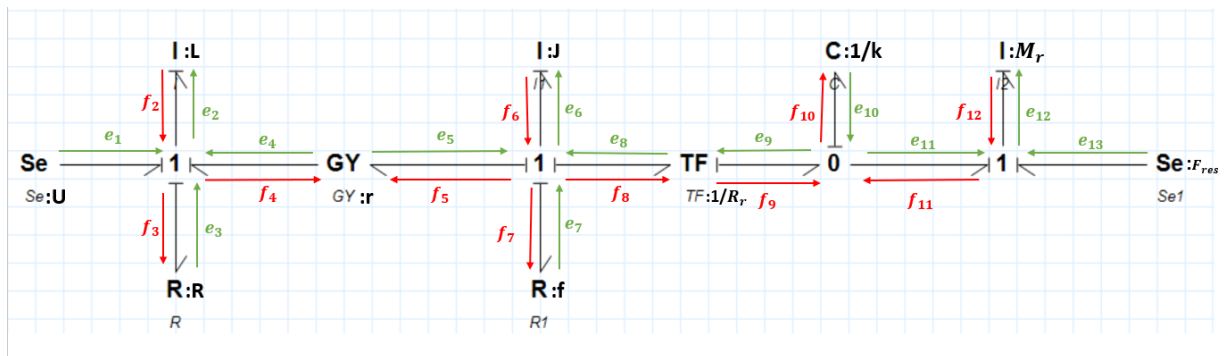


Figure 5- 3 : Modélisation par Bond Graph du système « Moto-réducteur + Roue »

5.2.1.2 Modélisation par Equation d'Etat

A travers une modélisation par équation d'état, nous présentons le système « Moto-réducteur + Roue » par ses variables internes évoluant au cours du temps. La représentation d'état est extraite à partir du Bond Graph défini précédemment, ceci en associant les variables d'états de la représentation aux éléments de stockages d'énergies décrits par le Bond Graph : élément inertiel I et élément capacitif C. A partir d'un Bond Graph, les variables d'état considérées sont le moment généralisé P et le déplacement généralisé Q [38].

- D'abord nous considérons une à une les jonctions « 1 » associées aux éléments inertiels I_1, I_2, I_3 , selon lesquelles les relations (5.3) et (5.4) sont établies :

$$f_i = C^{ste} \quad (5.3)$$

$$\sum e_i = 0 \quad (5.4)$$

- Et pour la jonction « 0 » associée à l'élément capacitif C, nous utilisons les relations suivantes :

$$e_i = C^{ste} \quad (5.5)$$

$$\sum f_i = 0 \quad (5.6)$$

- Ensuite, à partir des équations (5.4) et (5.6), nous extrayons l'équation de l'effort correspondant à l'élément inertiel I_i celle du flux correspondant à l'élément capacitif C respectivement. (Voir Annexe C).
- Puis, en utilisant l'équation du moment généralisé (5.7), nous obtenons l'équation d'état correspondant à chaque jonction.

$$P_j = \int e_i(t) \partial t \quad (5.7)$$

- Avant d'obtenir une représentation d'état, on considère les variables d'états x_i et les sorties y_i exprimées par (5.8) :

$$\begin{cases} x_1 = P_1 \\ x_2 = P_2 \\ x_3 = P_3 \\ x_4 = P_4 \\ y_1 = i \\ y_2 = \omega \\ y_3 = \omega_r \end{cases} \quad (5.8)$$

- Enfin, nous établissons la représentation d'état correspondante au système d'étude de la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = U - \frac{R_1}{L} x_1 - \frac{r}{J} x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{r}{L} x_1 - \frac{f}{J} x_2 - k \times R_r \times x_3 \\ \dot{x}_3 = \frac{R_r}{J} x_2 - \frac{1}{M_r} x_4 \\ \dot{x}_4 = k \times x_3 - F_{res} \\ y_1 = \frac{1}{L} x_1 \\ y_2 = \frac{1}{J} x_2 \\ y_3 = \frac{1}{M_r} x_4 \end{array} \right. \quad (5.9)$$

La représentation d'état (5.9) peut être exprimée sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L} & -\frac{r}{J} & 0 & 0 \\ \frac{r}{L} & -\frac{f}{J} & (-k \times R_r) & 0 \\ 0 & \frac{R_r}{J} & 0 & \frac{1}{M_r} \\ 0 & 0 & k & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ F_{res} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{M_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

5.3 Sous-Système Mécanique

Le sous-système mécanique d'un AGV concerne principalement le choix du matériel adéquat à ses exigences, la conception du châssis ainsi que l'étude RDM qui permet de déterminer ses contraintes pour pouvoir ensuite entamer l'impression 3D de ses composants.

5.3.1 Système électromécanique :

5.3.1.1 Choix du Moteur

Pour faire déplacer notre AGV avec les produits, nous devons utiliser des moteurs à courant continu DC (Direct Current). Dans cette partie, nous faisons les calculs nécessaires pour trouver le couple à générer par les moteurs pour atteindre une vitesse maximale de 0.06m/s ceci afin de choisir les moteurs idéaux.

Chapitre 5 : Conception Détaillée du Système de Manutention à Base d'AGV

- Les données à notre disposition sont :
 - **Gravité** : $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
 - **La masse totale (AGV + produit)** : $m = 2 \text{ kg}$
 - **Vitesse maximale** : $v = 0.06 \text{ m / s}$
 - **Diamètre de la roue** : $D = 10 \text{ cm}$

Ces données sont choisies de façon théorique de sorte que l'AGV puisse se déplacer convenablement sur le circuit de manutention.

- **Calcul de la vitesse de rotation :**

Pour déterminer la vitesse de rotation, nous avons la formule suivante :

$$\omega = \frac{60v}{\pi D} \quad (5.12)$$

$$\text{Donc : } \omega = \frac{60(0.06)}{\pi(0.1)} = 11.45 \text{ rpm}$$

- **Calcul de la puissance du moteur :**

La puissance est déterminée par la formule suivante :

$$P = F.V \quad (5.13)$$

$$\text{Avec : } F = M.g \quad (5.14)$$

$$\text{Ainsi : } P = 2 \times 9.81 \times 0.06 = 1.1772 \text{ w}$$

Par conséquent, la puissance de chaque moteur est : $\frac{P}{4} = \frac{1.1772}{4} = 0.2943 \text{ w}$

- **Calcul du couple du moteur :**

Pour déterminer le couple du moteur, nous disposant de la formule suivante :

$$C = \frac{P}{\omega} \quad (5.15)$$

$$\text{Ainsi : } C = \frac{0.2943}{11.45} = 0.0257 \text{ Nm}$$

En résumé, notre moteur devra avoir les caractéristiques suivantes :

Puissance : **0.2943 w**

Couple : **0.262 Kg.cm**

Vitesse de rotation : **11.45 rpm**

Chapitre 5 : Conception Détaillée du Système de Manutention à Base d'AGV

A partir des résultats obtenus à travers les calculs ci-dessus représentant les caractéristiques minimales du moteur adapté à notre système, notre choix s'est porté sur un moteur plus puissant, représenté dans la **figure 5-4**, pour avoir un bon fonctionnement de l'AGV.

驰海电机 CHIHAI MOTOR			CHR-GM25-370-12K-20 Specification	
Voltage	DC 6.0 V	DC 12.0 V	Product photo Motor weight 90 g 	
No-load speed	300 rpm	600 rpm		
No-load current	0.12 A MAX	0.2 A MAX		
Rated load	1.8 kg.cm	3.5 kg.cm		
Rated speed	160 rpm	350 rpm		
Rated current	0.8 A MAX	1.5 A MAX		
Rated power	2.1 W	6.6 W		
Stall torque	≥ 3.0 Kg.cm	≥ 6 Kg.cm		
Stall current	≤ 2.7 A	≤ 5.5 A		
Output pulse number	Basics 11PPR×i20.4=224.4PPR			
RATIO	1 : 20.4			

Figure 5- 4: Caractéristiques du moteur utilisé pour le projet

A partir des données de ce tableau les paramètres du moteur (Résistance, inductance ...) peuvent être calculés pour appliquer le correcteur PID.

5.3.2 Présentation du Châssis

Afin de mettre en place un système efficace, solide et fiable, plusieurs facteurs externes doivent être pris en compte. Un AGV est destiné à être utilisé dans des milieux dynamiques, par conséquent une étude détaillée doit être effectuée pour assurer son bon fonctionnement, sa sécurité ainsi que la sécurité de son environnement.

Dans ce cas d'étude, l'AGV fait partie d'un système d'assemblage flexible, où il doit transporter un produit selon un plan horizontal en présence d'obstacles fixes (ex. poste de travail) et d'obstacles mobiles (ex. AGV). A travers les exigences de son environnement, l'AGV doit remplir les conditions suivantes :

- Supporter une charge maximale de : $M = 1.5 \text{ Kg}$;
- Assurer transport du produit en toute sécurité le long du trajet ;
- Assurer un déplacement sans percuter des obstacles fixes et mobiles ;
- S'arrêter devant les différents postes de travail en respectant une distance de sécurité.

Dans le but d'assurer les conditions citées ci-dessus, les dimensions du châssis ont été choisies selon la taille du plus grand produit que doit transporter l'AGV, c'est-à-dire la plus grande pièce maitresse correspondant au produit 04 « PR04 » ayant les dimensions suivantes : $197 \times 197 \times 10 \text{ mm}$ et en considérant l'espace nécessaire pour les pièces de fixation du produit les dimensions proposées pour l'AGV sont : $400 \times 300 \times 100 \text{ mm}$.

La **figure 5-5** représente la conception mécanique du châssis sous le logiciel SolidWorks.

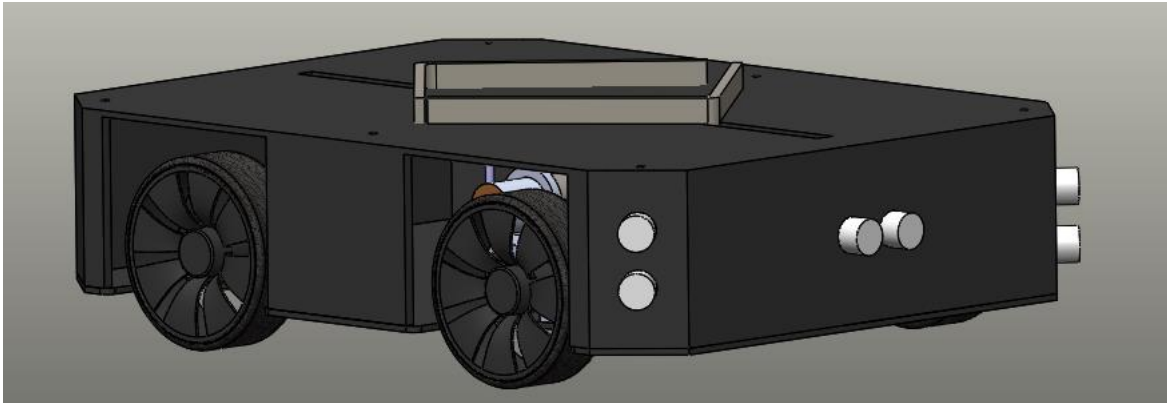


Figure 5- 5: Conception du châssis de l'AGV sous Solidworks

Le rôle principal de l'AGV est de transporter des produits de dimensions différentes, par conséquent un système de fixation adéquat doit être mis en place afin d'assurer le maintien du produit par-dessus l'AGV. Les **figures 5-6** et **5-7** représentent le mécanisme de fixation proposé dans ce système, composé d'une tige filetée, deux écrous et deux pièces de fixation en forme de « L ».

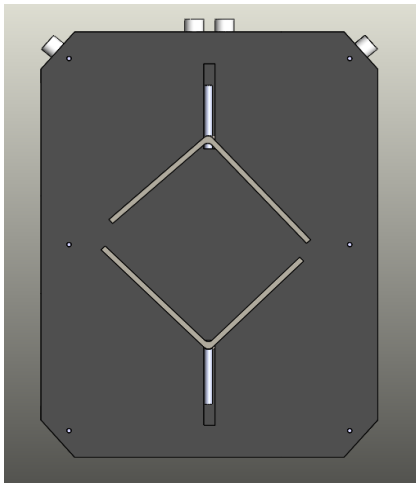


Figure 5- 6: Mécanisme de fixation par-dessus l'AGV.

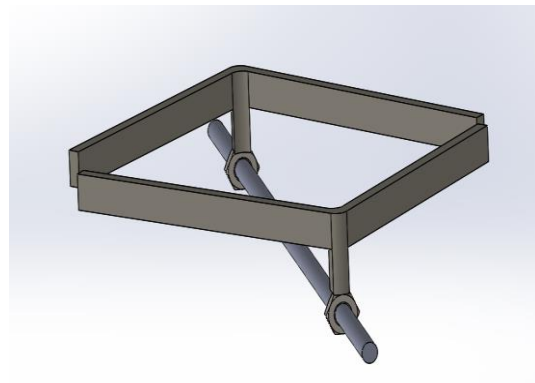


Figure 5- 7: Mécanisme de fixation.

Le mouvement en rotation de la tige filetée est assuré par un servomoteur permettant le déplacement d'un écrou sur lequel est suspendue une des deux pièces de fixation, l'autre écrou est fixe et maintient la seconde pièce de fixation immobile par-dessus l'AGV. C'est ainsi que le maintien du produit est assuré tout au long de la séquence d'assemblage.

Pour s'assurer que l'AGV puisse détecter la présence d'obstacles lors de ses déplacements, trois emplacements de capteurs ULTRASON ont été ajoutés sur la face avant du châssis comme illustré par la **figure 5-8**.

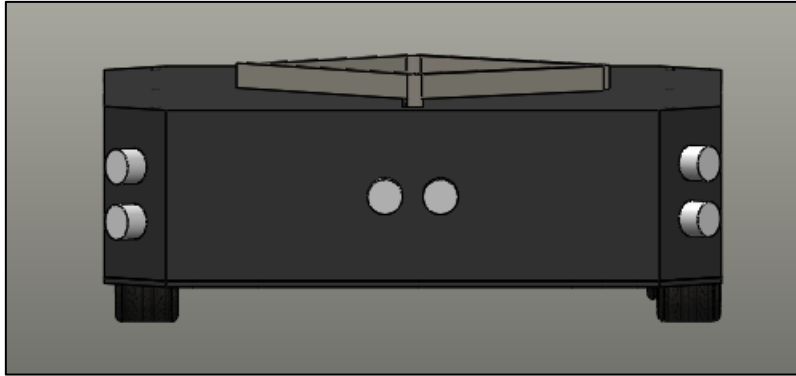


Figure 5- 8: Face avant de l'AGV avec emplacement des capteurs ULTRASON

5.3.3 Etude RDM

L'étude RDM est effectuée dans le but de s'assurer de la résistance du châssis aux différentes charges qui lui sont appliquées à savoir les poids de ses différents composants et le produit transporté. Parmi les différents matériaux qui peuvent être utilisés pour la conception du prototype de l'AGV nous avons choisi le plexiglass car il est solide, résistant à la corrosion et il présente un avantage esthétique sur les autres types de matériaux.

Dans un premier lieu, nous appliquons la charge représentant le poids du produit le plus lourd à savoir le produit « PR04 » avec une marge de tolérance permettant d'assurer la résistance du châssis en cas d'introduction accidentelle d'un produit plus lourd, cette charge est appliquée sur la plateforme haute du châssis sur laquelle le produit sera fixé.

La charge P_1 est calculée en multipliant la masse considérée « $M=1 \text{ Kg}$ » à la gravité « $g=9.81$ ».

$$P_1 = M \times g \quad (5.16)$$

$$P_1 = 1 \times 9.81$$

$$P_1 = 9.81 \text{ N}$$

La **figure 5-9** représente les résultats de la simulation sous SolidWorks de la plateforme haute avec la charge $P_1 = 10\text{ N}$.

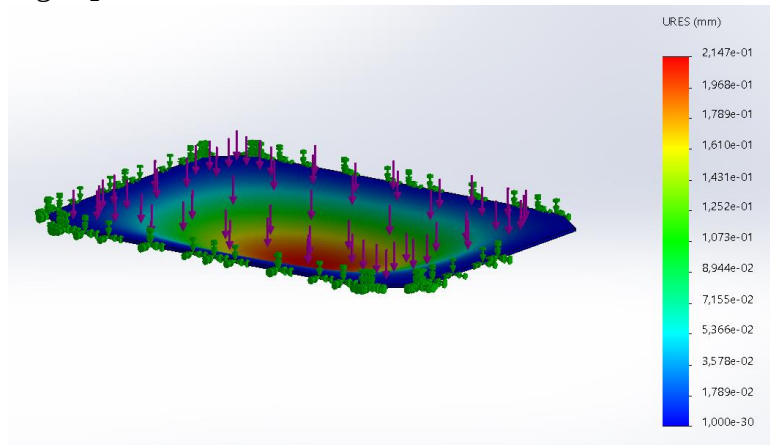


Figure 5- 9: Simulation de la charge P1

A partir des résultats de la simulation, on observe une déformation de la plateforme de $2.147 \times 10^{-1}\text{mm}$ qui peut être négligée. Les poids des autres produits assemblés au niveau de la cellule en cours de développement étant tous inférieurs à celui du produit PR04, on peut déduire que la plateforme haute du châssis peut supporter les quatre produits.

La deuxième charge appliquée au châssis représente la somme des poids des différents composants de l'AGV ainsi que le poids du produit supporté avec une marge de tolérance permettant d'assurer la résistance du châssis en cas d'introduction accidentelle d'un produit plus lourd. Cette charge est appliquée sur la plateforme basse du châssis.

La charge P_2 est calculée en multipliant la somme des masses des différents composants et du produit PR04 « $M=2\text{Kg}$ » à la gravité « $g=9.81$ ».

$$P_2 = M \times g \quad (5.19)$$

$$P_2 = 2 \times 9.81$$

$$P_2 = 19.62\text{N}$$

La **figure 5-10** représente les résultats de la simulation sous SolidWorks de la plateforme haute avec la charge $P_2 = 20\text{N}$.

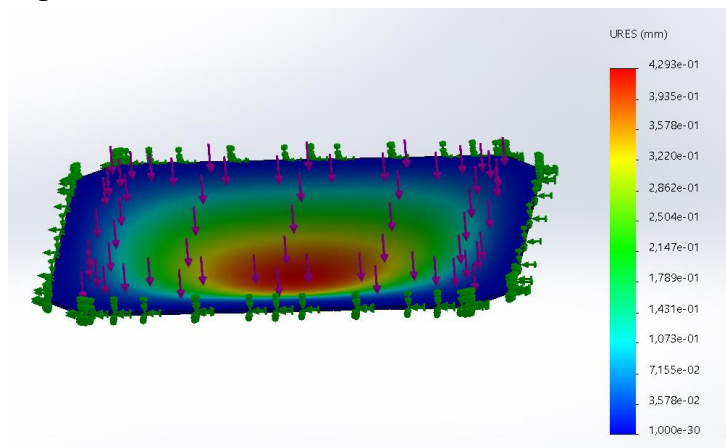


Figure 5- 10: Simulation avec la charge P2

A partir des résultats obtenus après la simulation de la charge P₂, la déformation de la plateforme basse est 4.293×10^{-1} mm et peut encore être tolérée.

5.4 Sous-Système Electronique

L'AGV est un système autonome capable de choisir son chemin et de se déplacer de façon autonome en utilisant un système de contrôle assisté par différents capteurs. Dans le système de manutention à concevoir, nous avons opté pour le mode de navigation par bande peinte, car il est plus adapté à notre cellule d'assemblage, le plus simple à mettre en place, le plus flexible et le coût de sa mise en place n'est pas très important. Par conséquent, notre AGV va être doté d'un système de contrôle, en l'occurrence d'une carte Raspberry pi, d'un capteur suiveur de ligne et d'un capteur ultrason pour éviter les obstacles.

5.4.1 Composants Electroniques de l'AGV

Dans le but de réaliser les tâches requises, l'AGV est doté d'une partie électronique lui permettant une prise de décision locale et une communication avec son environnement.

L'élément principal de ce sous-système est la carte électronique. Nous utilisons la carte Raspberry Pi qui, selon les données reçues à travers les différents capteurs et selon le programme implémenté, elle permettra à l'AGV de prendre les décisions requises.

La fonction principale du système consiste en deux parties : d'une part, suivre une bande peinte vers les différents postes de travail. D'autre part, se positionner au niveau de la cellule. Pour la première partie de la fonction nous utilisons cinq (05) capteurs suiveurs de ligne. Il est doté de deux diodes lui permettant de détecter la couleur de la bande. Pour la seconde partie, nous utilisons un lecteur RFID afin de lire les différents IDs des TAGs qui seront placés sur les points d'intersections de la cellule.

Afin d'éviter les différents obstacles fixes ou mobiles lors des déplacements de l'AGV, nous utilisons trois (03) capteurs ULTRASON avec une étendue de 2cm à 4m dans un angle de 15°. L'environnement au niveau duquel est implémenté l'AGV est totalement automatisé, l'AGV doit détecter dans ce cas les autres AGVs qui se déplacent à travers la cellule. Par conséquent, trois capteurs ULTRASON suffisent pour la détection d'obstacles dans les trois directions : avant, gauche et droite.

La **figure 5-11** représente les différents composants électroniques de l'AGV.

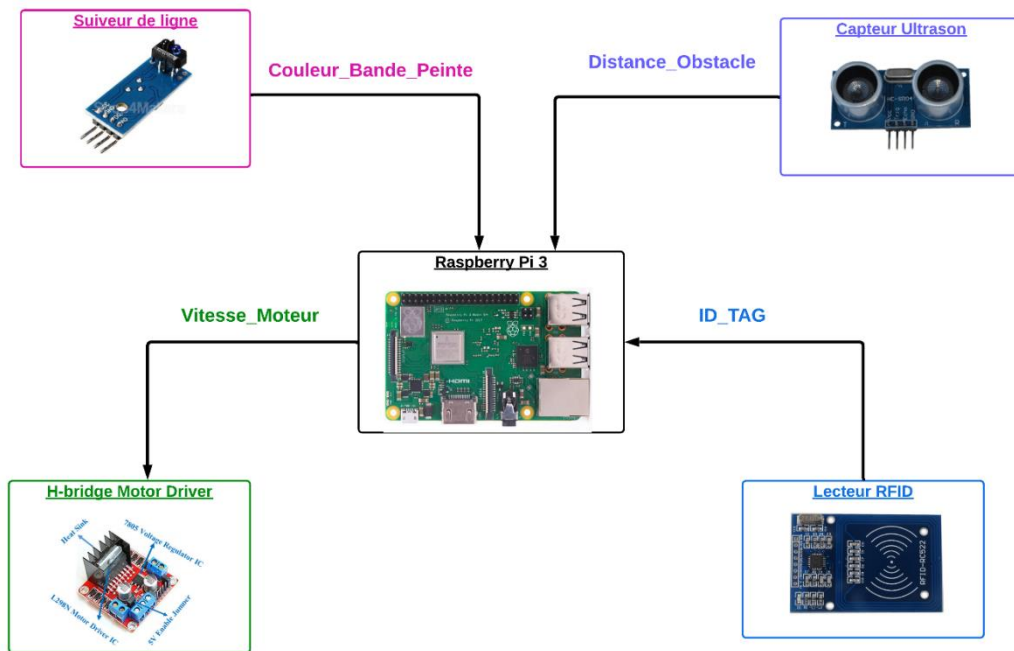


Figure 5- 11: Composants électroniques de l'AGV

5.4.2 Circuit Electrique

Le montage des différents composants électroniques de l'AGV représentant la partie commande du système permettra le contrôle et l'exécution des différentes fonctions de l'AGV au sein de la cellule d'assemblage flexible.

La **figure 5-12** représente le circuit électrique de la partie commande de l'AGV composé principalement d'une carte de contrôle Raspberry Pi, de capteurs, du lecteur RFID, du H-bridge motor driver et de l'Alimentation.

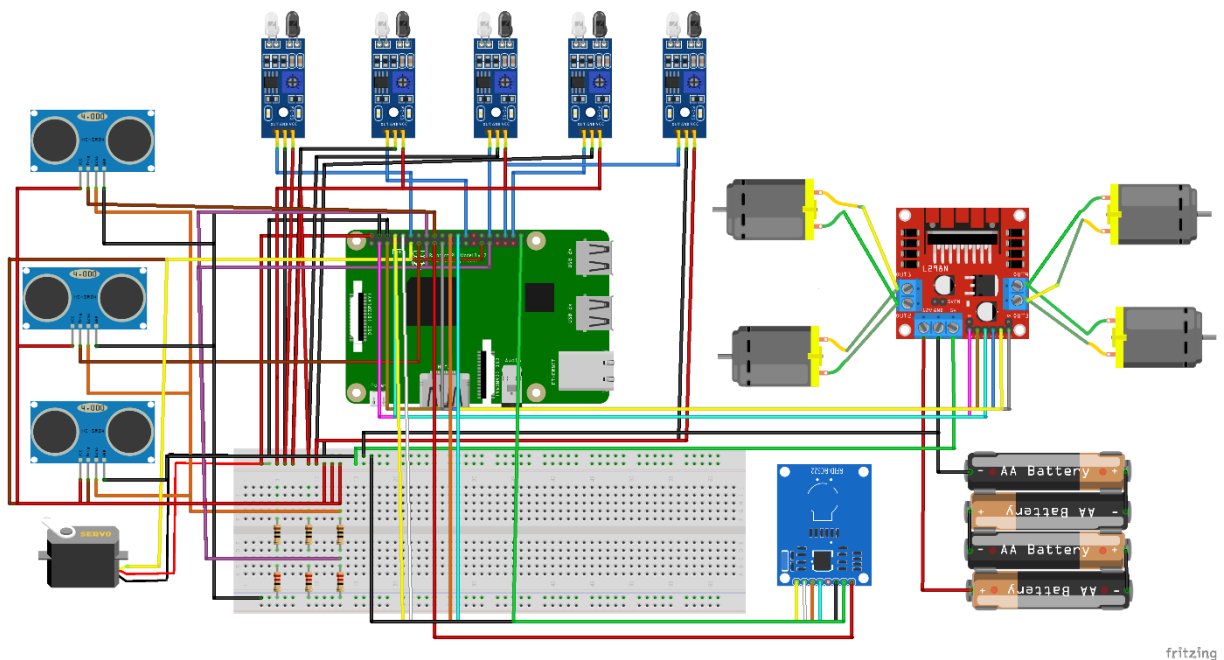


Figure 5- 12: Le schéma électrique de l'AGV.

5.5 Le Circuit de Manutention

L'AGV est conçu pour se déplacer au niveau d'une cellule d'assemblage flexible en suivant une bande peinte noire déterminant son chemin. Le circuit de manutention de la cellule est composé d'une bande peinte reliant les différents postes de travail au parking des AGVs ainsi que de TAGs RFID placés au niveau des différents points d'intersections et devant les différents postes de travail permettant à l'AGV de se positionner sur le circuit lors de ses déplacements.

Le dimensionnement du circuit de manutention est basé principalement sur les critères suivants :

- Les dimensions de l'AGV ;
- Les dimensions des robots assembleurs ;
- Les distances de détection des capteurs ;
- Les dimensions de la cellule ;
- Le nombre d'AGVs.

La **figure 5-13** illustre le schéma du circuit de manutention proposé.

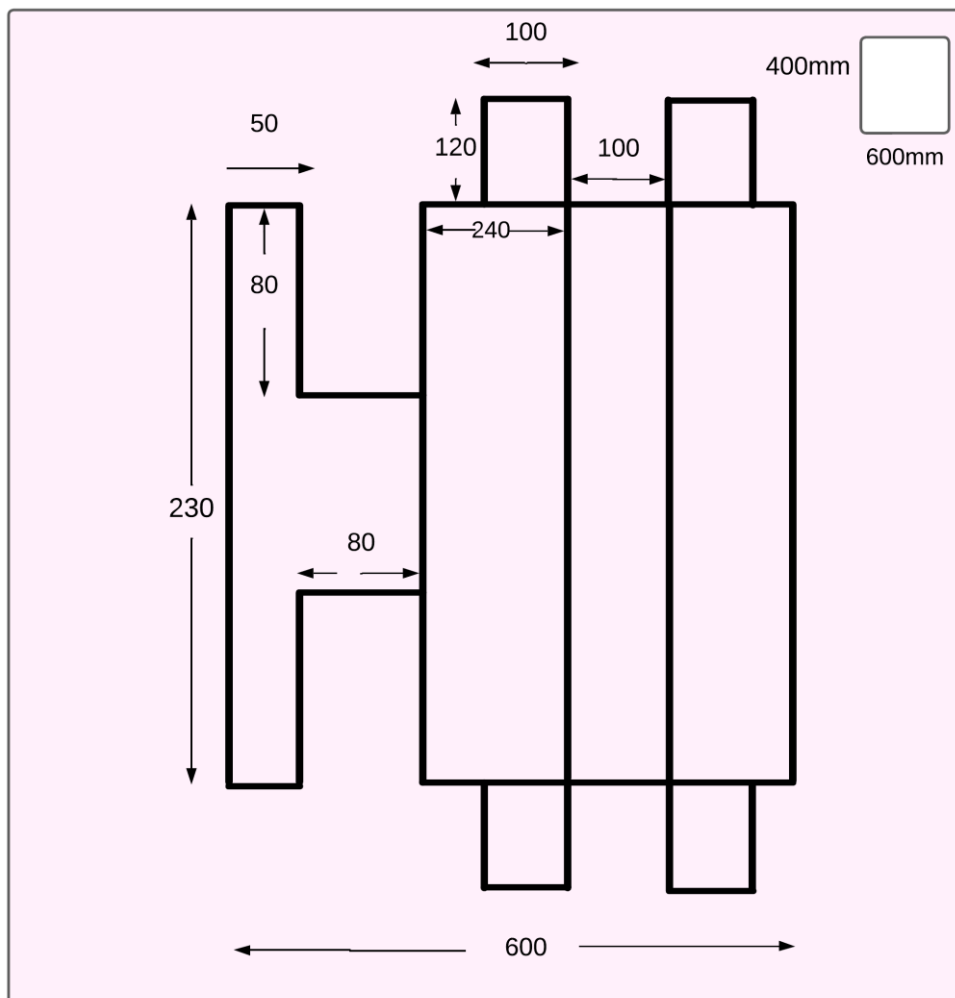


Figure 5- 13: La cellule flexible d'assemblage en millimètre « mm ».

5.6 Sous-Système Informatique

5.6.1 Installation de Raspbian et Préparation de Raspberry pi

Afin de pouvoir programmer un système en utilisant une carte électronique Raspberry pi, un système d'exploitation doit être installé afin de pouvoir utiliser la carte. Parmi les différents systèmes d'exploitation disponibles, Raspbian OS est compatible avec la carte Raspberry pi 3 B+.

5.6.2 Description des Données Nécessaires à la Programmation

Avant d'entamer la programmation de notre AGV, nous allons d'abord déterminer et identifier toutes les données nécessaires à la navigation de l'AGV à travers la cellule d'assemblage flexible. Parmi ces données, on retrouve les identifiants « ID » des TAGs RFID permettant à l'AGV de se positionner et les durées des différentes opérations permettant de connaître la durée d'arrêt au niveau de chaque poste de travail. « Voir Annexe B »

5.6.3 Programmation

L'objectif principal de l'AGV dans ce système est le déplacement autonome des produits au sein de la cellule et la communication avec le système de pilotage qui lui envoie les ordres de commandes et les différents postes de travail qui lui communiquent leurs données lui permettant ainsi de décider des actions adéquates à exécuter.

Dans ce cadre, nous commençons par mettre en place une base de données composée principalement de quatre tables :

- AGV : regroupant les différents AGVs dont dispose le système de manutention ainsi que leurs états de disponibilité et le niveau de leur batterie ;
- Produit : regroupant les différents produits assemblés au niveau de la cellule associée à un identifiant permettant de les reconnaître par l'AGV ;
- GO : regroupant les différentes gammes opératoires associées à l'assemblage de chaque produit. Après identification du produit à assembler, l'AGV va pouvoir lire la gamme opératoire correspondante à l'aide de cette table ;
- TIME : cette table est ajoutée afin de permettre la simulation de l'algorithme de routage de l'AGV. En effet, cette table regroupe les identifiants des opérations associés aux différents postes de travail pouvant exécuter l'opération ainsi que le temps en file d'attente d'entrée à ces postes.

Ensuite, nous allons programmer la carte Raspberry Pi sous python pour pouvoir contrôler le déplacement de l'AGV en suivant la bande peinte noire et en se positionnant à l'aide des TAGs RFID implantés sur le circuit de manutention.

5.7 Conclusion :

L'objectif principal de ce chapitre est d'aborder la conception détaillée du système AGV. Le système AGV est décomposé en quatre sous-systèmes. Nous avons élaboré pour chacun de ces sous-systèmes une étude à l'aide des outils adéquats.

Dans le chapitre suivant, nous procédons à la réalisation et à l'assemblage des composants de l'AGV pour procéder à des tests nous permettant la validation du prototype.

Chapitre 6

Réalisation du Système de Manutention à Base d'AGV

6.1 Introduction

Suite aux résultats des deux précédents chapitres correspondants aux phases d'étude et de conception, nous entamons la phase de réalisation du prototype proposé. D'abord, présentons les étapes d'assemblage de l'AGV et de la mise en place du circuit de manutention. Ensuite, après réalisation de différents tests nous illustrons les résultats.

6.2 Etapes d'Assemblage de l'AGV

L'AGV est constitué principalement de quatre sous-systèmes : mécanique, électronique, informatique et automatique. Suite à la phase de conception et de simulation des sous-systèmes de l'AGV à l'aide des différents outils de conception nous allons entamer la réalisation et l'assemblage de l'AGV.

- 1- **Sous-système mécanique** : les composants mécaniques conçus : d'un châssis, des roues et des supports-moteurs, qui sont imprimés en 3D puis assemblés. La **figure 6-1** représente l'AGV assemblé.
- 2- **Sous-système électronique** : Les différents capteurs et composants électroniques utilisés sont connectés à la carte Raspberry Pi, voir « Annexe B » pour les différents PINs de connexions. Les capteurs sont ensuite ajoutés au sous-système mécanique de l'AGV.

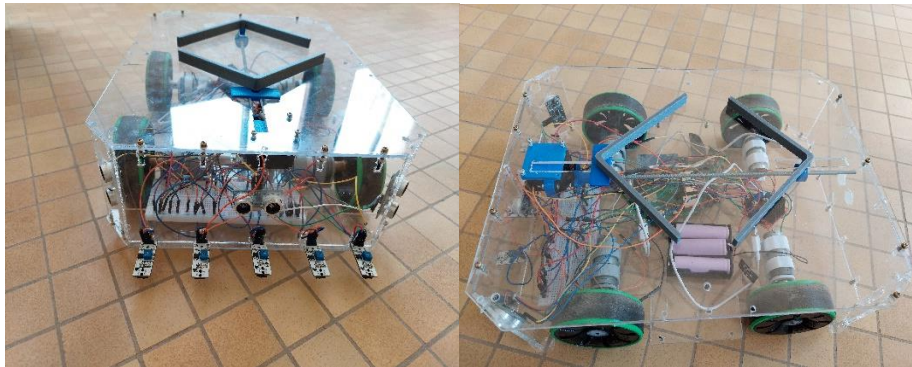


Figure 6- 1: Partie mécanique et électronique de l'AGV assemblées.

- 3- **Sous-système informatique** : cette partie est dédiée à la programmation de la carte Raspberry Pi. Le programme est réparti en plusieurs fonctions, tel qu'il est illustré par la **figure 6-2**, permettant la commande de l'AGV selon les données des différents capteurs utilisés.

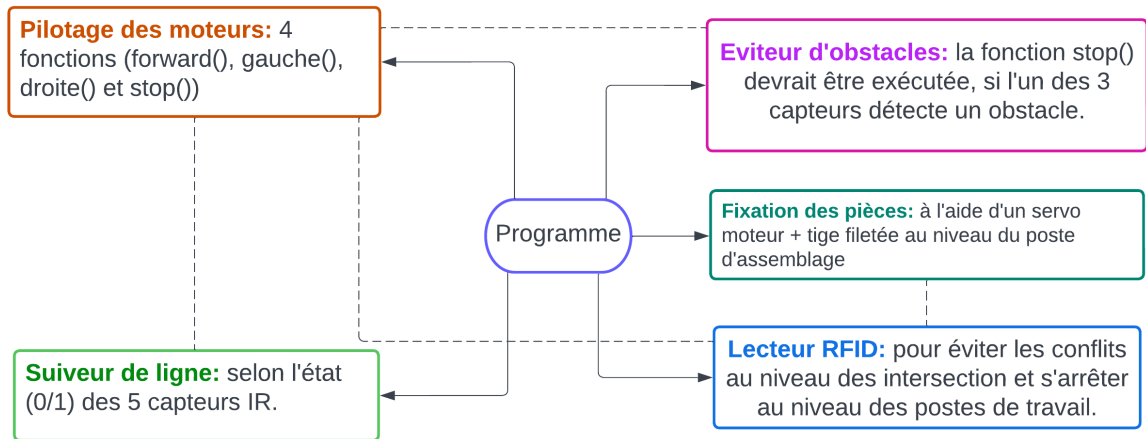


Figure 6- 2: Le diagramme de programmation

- 4- **Sous-système automatique** : cette partie n'est pas traitée dans la phase de réalisation, car les moteurs utilisés n'ont pas d'encodeurs qui sont nécessaires pour l'application du correcteur Proportionnel, Intégral et Dérivé « PID ».

6.3 Mise en Place du Circuit de Manutention

Après la schématisation et le dimensionnement du circuit de manutention pour la phase de réalisation et la mise en place du circuit, nous avons utilisé la salle B24 de dimensions 10.5×7m.

Dans le but de mettre en place un circuit de manutention adapté au mode de navigation de l'AGV, nous avons utilisé le chatterton afin de tracer la bande peinte que devra détecter l'AGV à travers les cinq capteurs infrarouges. Cette bande peinte est placée sur des feuilles blanches disposées de façon à représenter les passages entre le parking, les stocks pièces maitresses et les produits finaux ainsi que les différents postes de travail.

Les **figures 6-3, 6-4, 6-5, 6-6, 6-7 et 6-8** illustrent le circuit de manutention global ainsi que les différentes stations de la cellule d'assemblage flexible.



Figure 6- 3: Circuit de manutention de la cellule d'assemblage flexible.

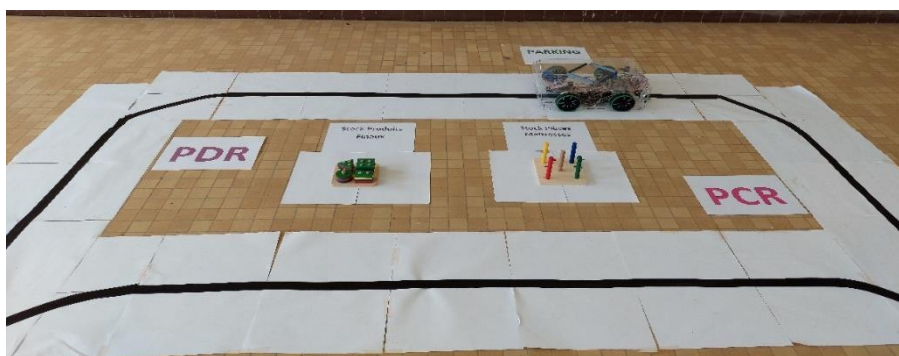


Figure 6- 4: Parking, Poste de chargement/déchargement et stocks pièces maitresses et produits finaux.



Figure 6- 5: Poste de Travail PT1



Figure 6- 6: Poste de Travail PT2

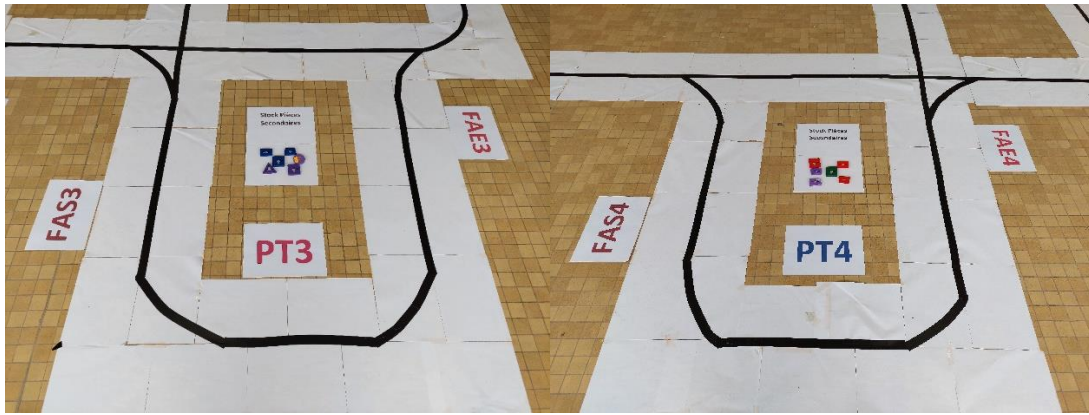


Figure 6- 7: Poste de Travail PT3

Figure 6- 8: Poste de Travail PT4

6.4 Tests et Résultats

Après l'assemblage et la programmation de l'AGV ainsi que la mise en place du circuit de manutention, nous procédons à des tests expérimentaux. Dans un premier lieu, nous testons l'AGV à travers le déplacement du produit PR3 pour l'exécution des deux premières opérations d'assemblages au niveau des deux postes de travail PT4 et PT1 pour la vérification du bon fonctionnement de l'AGV.

La **figure 6-9** illustre la boucle de fonctionnement du test exécuté.

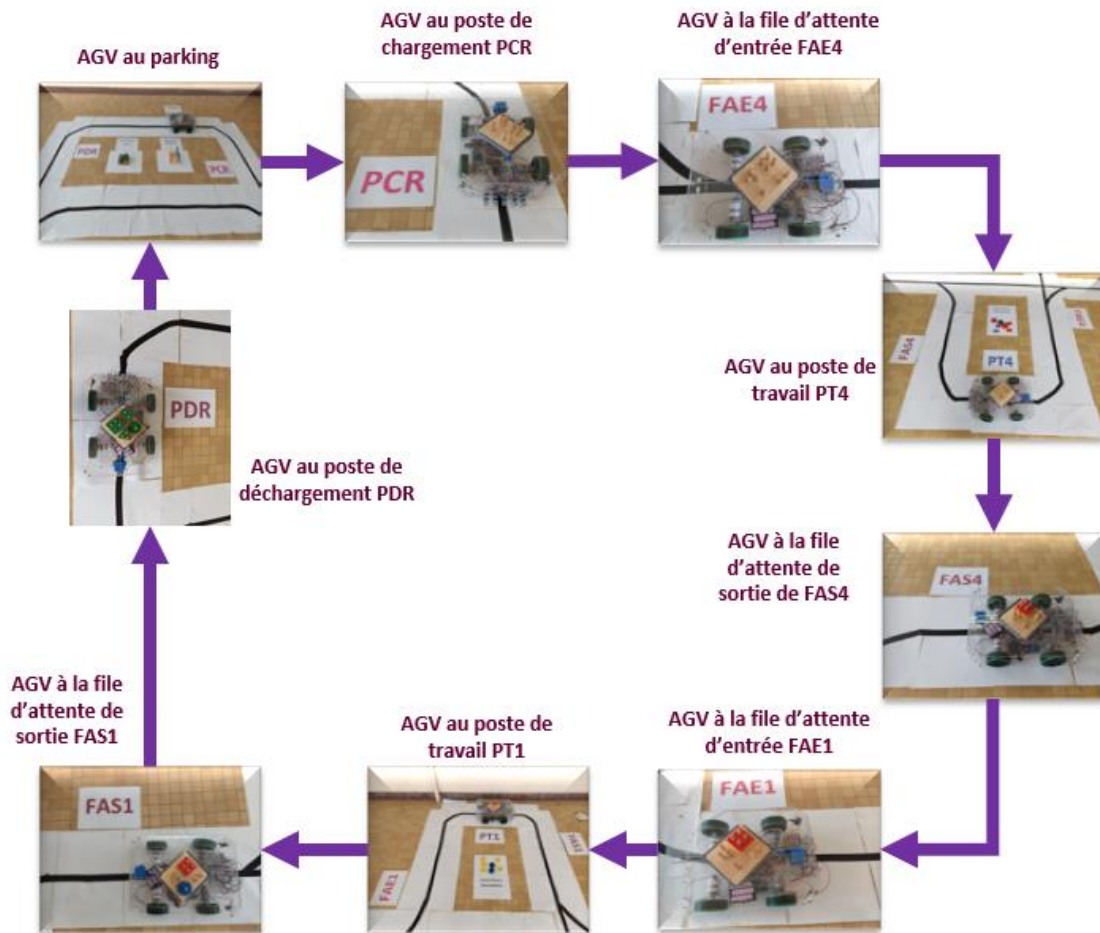


Figure 6- 9: Exemple de fonctionnement de l'AGV pendant le premier test effectué.

Suite au premier test effectué, nous avons constaté quelques problèmes relatifs au déplacement de l'AGV. En effet, au niveau des virages il y a des situations de conflit lorsque les capteurs IRs de gauche ainsi que ceux de droite détectent la ligne noire ce qui engendre un blocage de l'AGV. Ces situations de conflits peuvent être évitées en utilisant les TAGs RFID. Néanmoins lorsque l'AGV s'écarte de quelques millimètres de la bande peinte le lecteur RFID n'arrive pas à lire les TAGs.

Le second problème constaté suite aux essais effectués, c'est que l'autonomie des batteries est faible et donc nécessite tout le temps un rechargement. Faute d'absence d'une technologie de rechargement au niveau de la cellule, on devait à chaque fois arrêter les tests pour les recharger manuellement.

6.5 Conclusion

A travers ce dernier chapitre, nous avons mis en évidence les résultats des essais effectués sur l'AGV après l'assemblage de ses composants et la programmation de la carte de contrôle.

Suite aux résultats obtenus, nous élaborons des perspectives du projet présentées en conclusions à ce projet de fin d'études.

Conclusion Générale et Perspectives

L'objectif principal à travers ce projet de fin d'études est la conception et la réalisation d'un système de manutention à base d'AGVs au sein d'une cellule d'assemblage flexible en cours de développement au niveau du département GIM.

Dans ce contexte, nous avons d'abord présenter les systèmes de production flexible, les systèmes de manutentions à base de véhicules à guidage automatique « AGV » ainsi que les différentes architectures de pilotage parmi lesquelles nous nous sommes focalisées sur l'architecture décentralisée qu'on a jugé la plus adaptée à notre système qui nécessite une certaine indépendance de prise des décisions.

Par la suite, nous avons élaboré un plan de conception d'un produit ceci en présentant les différents outils de conception utilisés pour la mise en place du système.

Selon le plan élaboré nous avons entamé la phase d'étude du système de manutention par une analyse fonctionnelle mettant en évidence le besoin et les solutions technologiques proposés pour le développement du projet.

La phase de conception de l'AGV a été divisée en quatre parties représentées par les disciplines impliquées notamment l'électronique, la mécanique, l'informatique et l'automatique. A la fin de cette phase nous avons pu réaliser et assembler les composants constituant l'AGV et nous avons procédé à des tests à partir desquels nous avons mis en évidence les difficultés rencontrées et nous avons proposé des solutions présentées en perspectives pour de futures modifications du projet.

Malgré le développement des principales fonctionnalités de l'AGV, il reste encore un bon nombre de perspectives d'amélioration pour des futures modifications sur le projet.

Premièrement, en ce qui concerne les conflits qui se présentent au niveau des intersections on propose d'utiliser des TAGs RFID plus grands qui peuvent être détectés facilement même en cas de légère déviation de l'AGV.

Dans le but de minimiser le temps de déplacement de l'AGV, une proposition d'une nouvelle disposition de la cellule pourrait remplacer celle exigée par le cahier des charges ceci dans le cas où on utilise toujours le mode de navigation à base de bande peinte. Dans un autre contexte, on pourrait éliminer le circuit à base de bande peinte et développer un système de navigation libre en utilisant les technologies de l'intelligence artificielle.

Pour une future intégration de nouveaux produits plus lourds que ceux déjà pris en compte lors de l'étude réalisée, une nouvelle étude RDM devrait être effectuée dans le but de déterminer l'épaisseur des deux plaques haute et basse de l'AGV.

Comme mentionné dans l'algorithme principal du fonctionnement de l'AGV, la gestion de l'autonomie des AGVs doit être prise en considération. Nos propositions s'orientent vers la mise en place d'un système de rechargement sans-fil qui est largement déployé dans les différentes usines industrielles utilisant des systèmes de manutention à base d'AGVs.

Conclusion Générale et Perspectives

Enfin, un élément essentiel dans la réalisation d'un système de manutention est la disponibilité des machines et le système de pilotage pour pouvoir communiquer les différents états des machines ainsi que les ordres d'assemblage ce qui assure le bon fonctionnement des AGVs et facilite les tests d'assemblage lors de la réalisation du projet.

Références

Références

1. Yao, F., Alkan, B., Ahmad, B., & Harrison, R. (2020). Improving just-in-time delivery performance of IoT-enabled flexible manufacturing systems with AGV based material transportation. *Sensors (Switzerland)*, 20(21), 1–25.
2. Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing”. Mikell P. Groover. Fourth Edition, Prentice Hall, 2015.
3. Nguyen, D. T., Duong, Q. B., Zamai, E., & Shahzad, M. K. (2016). Fault diagnosis for the complex manufacturing system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 230(2), 178–194. <https://doi.org/10.1177/1748006X15623089>
4. A. Jones and A. Saleh. A multi-level/multi-layer architecture for intelligent shopfloor control, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, volume 3, issue 1, pp. 60–70, 1990.
5. SHIVANAND, H. K., BENAL, M. M., et KOTI, V. *Flexible manufacturing system*. New Age International. 2006.
6. TETZLAFF, Ulrich AW. *Optimal design of flexible manufacturing systems*. Springer Science & Business Media, 2013.
7. KAY, Michael G. *Material handling equipment*. Fitts Dept. of Industrial and Systems Engineering North Carolina State University, 2012, vol. 65.
8. Soufi, Z., David, P., & Yahouni, Z. (2021). A methodology for the selection of Material Handling Equipment in manufacturing systems. *IFAC-PapersOnLine*, 54(1), 122–127.
9. Chang and J. Baca and H.A. Moreno and I.G. Carrera and M.N. Cardona (Editors), "Advances in Automation and Robotics Research in Latin America", 1st ed. Springer, 2017. [Book : Proceedings] ISBN 978-3-319-54377-2
10. Eloundou, J. (n.d.). *Modélisation multi-contraintes d'un système de production flexible*. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01437152>
11. Mehami, J., Nawi, M., & Zhong, R. Y. (2018). Smart automated guided vehicles for manufacturing in the context of Industry 4.0. 26, 1077–1086.
12. Xu, S., Cao, S., Gao, K., & Cao, W. (2020). System and design of a AGV for flexible production line. *Journal of Physics: Conference Series*, 1601(6).
13. Ngandu, E. M., Luwes, N., & Kusakana, K. (2020). Navigation system for an automatic guided vehicle. *Journal of Physics: Conference Series*, 1577(1).
14. Sun, Y., Fang, M., & Su, Y. (2021). AGV Path Planning based on Improved Dijkstra Algorithm. *Journal of Physics: Conference Series*, 1746(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1746/1/012052>

Références

15. Liu, H. (2020). Automatic guided vehicles (AGVs) in the rail transit intelligent manufacturing environment. In *Robot Systems for Rail Transit Applications* (pp. 143–188). Elsevier.
16. CARLBERG, Chad. Smart, compact electromechanical actuators improve AGV productivity and space efficiency: Integration with AGVs on plant floors increases operational intelligence. *Plant Engineering*, 2021, vol. 75, no 1, p. 35-38.
17. Hsu WJ. Scheduling and Routing Algorithms for AGVs: a Survey. *Sch Appl Sci Nanyang Technol Univ*. 2014;(June).
18. ZBIB, Nadine. Allocation et routage dynamique dans un FMS basés sur le concept de champ de potentiel. 2010. Thèse de doctorat. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.
19. Trentesaux, D. (n.d.). Pilotage hétérarchique des systèmes de production. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00536486>
20. GAHAM, Mehdi. Pilotage intelligent et distribué des systèmes manufacturiers. 2018. Thèse de doctorat.
21. de Ryck, M., Versteijhe, M., & Debrouwere, F. (2020). Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques. In *Journal of Manufacturing Systems* (Vol. 54, pp. 152–173). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.12.002>
22. Jimenez, J. F., Bekrar, A., Zambrano-Rey, G., Trentesaux, D., & Leitão, P. (2017). Pollux: a dynamic hybrid control architecture for flexible job shop systems. *International Journal of Production Research*, 55(15), 4229–4247.
23. TRENTESAUX, Damien. Distributed control of production systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2009, vol. 22, no 7, p. 971-978.
24. Pinedo M, 'Scheduling, theory, algorithms, and systems'. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1995.
25. Fattahi, P., Saidi Mehrabad, M., & Jolai, F. (2007). Mathematical modeling and heuristic approaches to flexible job shop scheduling problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 18(3), 331–342. <https://doi.org/10.1007/s10845-007-0026-8>
26. Li, Chao, Chuqing Cao, and Yunfeng Gao. "Path Planning for Multiple AGV Systems Using Genetic Algorithm in Warehouse." 2018 3rd International Conference on Communications, Information Management and Network Security (CIMNS 2018). Atlantis Press, 2018.

Références

27. Ghazi, N., Rey, G. Z., Bekrar, A., Trentesaux, D., & Tadjine, M. (2015). *A preliminary study on integrating operation flexibility within semi-heterarchical FMS control*.
28. Taghaboni, F. and Tanchoco JMA. *Comparison of Dynamic Routing Techniques for Automated Guided Vehicle Systems*. *Int'l J Prod Res.* 1995 ;33(10) :2653–2669.
29. Sahib Hasan, H., Abidin, M. S. Z., Mahmud, M. S. A., & Muhamad Said, M. F. (2019). *Automated guided vehicle routing: Static, dynamic and free range*. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 8(5C), 1–7. <https://doi.org/10.35940/ijeat.E1001.0585C19>
30. DAHARI, Mahidzal et LIU, Yang. *A review of auto-guided-vehicles routing algorithms*. *Advanced Materials Research*, 2012.
31. Xu, X., & Zhoya, M. (2020). *Path Planning in Multi-AGVs Using a Modified A-star Algorithm*. *International Journal for Innovation Education and Research*, 8(5), 273–282. <https://doi.org/10.31686/ijier.vol8.iss5.2342>
32. Heger, J., & Voss, T. (2019). *Reducing mean tardiness in a flexible job shop containing AGVs with optimized combinations of sequencing and routing rules*. *Procedia CIRP*, 81, 1136–1141. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.281>
33. GONG, Mingwei et WILLIAMSON, Carey. *Quantifying the properties of SRPT scheduling*. In: *11th IEEE/ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer Telecommunications Systems*, 2003. *MASCOTS 2003*. IEEE, 2003. p. 126-135.
34. MITAL, Anil, DESAI, Anoop, SUBRAMANIAN, Anand, et al. *Product development: a structured approach to consumer product development, design, and manufacture*. Elsevier, 2014.
35. LI, C. H. et LAU, H. K. *Integration of industry 4.0 and assessment model for product safety*. In : *2018 IEEE Symposium on product compliance engineering (ISPCE)*. IEEE, 2018. p. 1-5.
36. Kerzhner, A. A., Paredis, C. J. J., & Woodruff, G. W. (2011). *Proceedings of the 4th International Workshop on Multi-Paradigm Modeling (MPM 2010) Combining SysML and Model Transformations to Support Systems Engineering Analysis*. *Electronic Communications of the EASST*, 42.
37. Institute of Electrical and Electronics Engineers, & PPG Institute of Technology. (n.d.). *Proceedings of the 5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES 2020) : 10-12, June 2020*.

Références

38. SANCHEZ, Roberto. *Application des Bond graphs à la modélisation et à la commande de réseaux électriques à structure variable*. 2010. Thèse de doctorat. Ecole centrale de Lille.
39. KARNOPP, Dean C., MARGOLIS, Donald L., et ROSENBERG, Ronald C. *System dynamics: modeling, simulation, and control of mechatronic systems*. John Wiley & Sons, 2012.

Annexe A

1.1. Présentation des Produits à Assembler

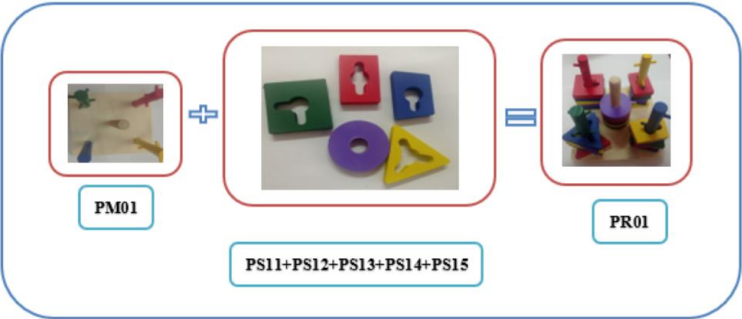
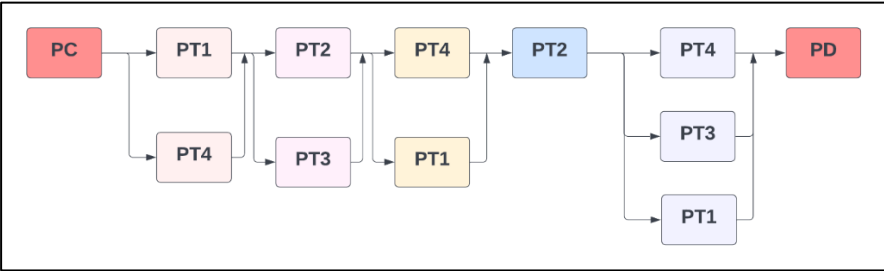
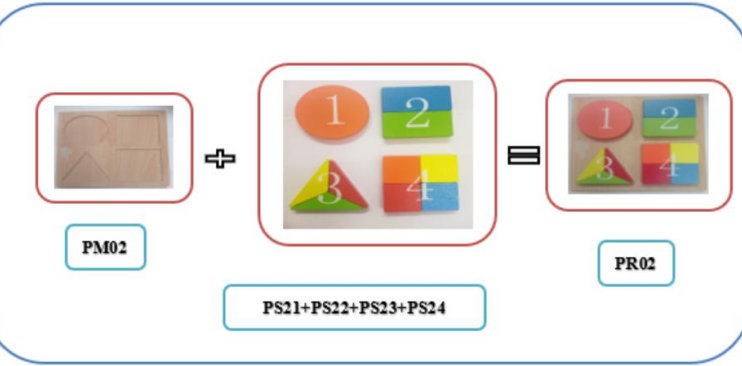
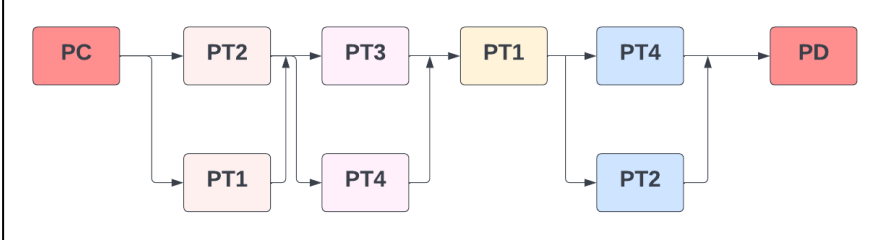
Notre but étant de déplacer notre produit entre les différentes machines afin qu'il soit assemblé. Ci-dessous sont présentées les photos des pièces maitresses et des pièces secondaires ainsi que les séquences d'assemblage pour chacun produit.

Les produits conçus au niveau de la cellule d'assemblage flexible sont au nombre de quatre (4), composés d'une pièce maitresse P_{mi} et de plusieurs pièces secondaires P_{sij} , ils sont transportés à travers les différents postes de travail selon des routages spécifiques à chaque produit.

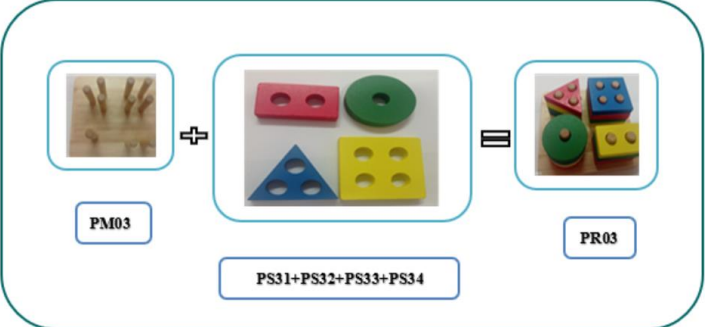
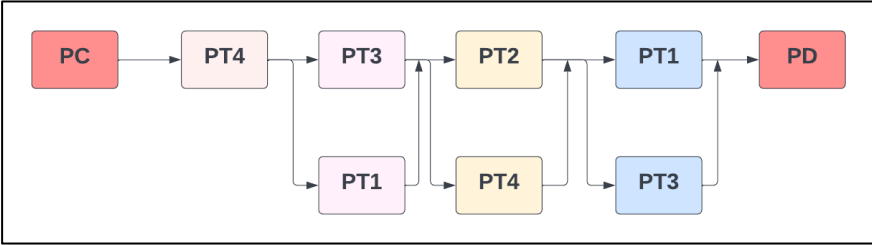
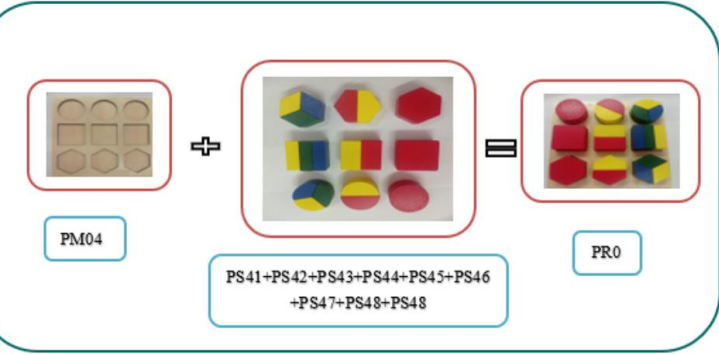
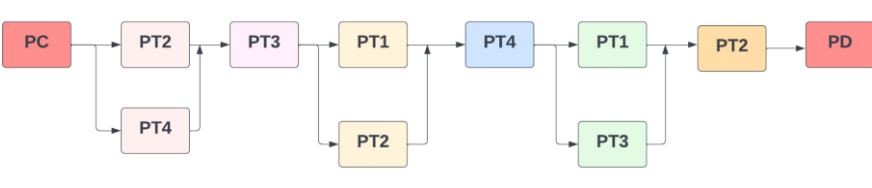
Le **tableau A-1** illustre les produits conçus ainsi que leurs séquences d'assemblage.

Annexe A

Tableau A- 1: Description des séquences d'assemblage des produits.

Identifiant	Produit	Séquence d'assemblage du produit
PR ₁	 PM01 + PS11+PS12+PS13+PS14+PS15 = PR01	 <pre> graph LR PC[PC] --> PT1_1[PT1] PT1_1 --> PT4_1[PT4] PT1_1 --> PT2_1[PT2] PT4_1 --> PT3_1[PT3] PT2_1 --> PT4_2[PT4] PT3_1 --> PT1_2[PT1] PT4_2 --> PT1_2 PT1_2 --> PT2_2[PT2] PT2_2 --> PT4_3[PT4] PT4_3 --> PT3_2[PT3] PT3_2 --> PT1_3[PT1] PT1_3 --> PD[PD] </pre>
PR ₂	 PM02 + PS21+PS22+PS23+PS24 = PR02	 <pre> graph LR PC[PC] --> PT2_1[PT2] PT2_1 --> PT1_1[PT1] PT2_1 --> PT3_1[PT3] PT1_1 --> PT4_1[PT4] PT3_1 --> PT1_2[PT1] PT4_1 --> PT1_2 PT1_2 --> PT4_2[PT4] PT4_2 --> PT2_2[PT2] PT2_2 --> PD[PD] </pre>

Annexe A

PR₃	 PM03 PS31+PS32+PS33+PS34 PR03	 <pre> graph LR PC[PC] --> PT4[PT4] PT4 --> PT3[PT3] PT3 --> PT2[PT2] PT2 --> PT1[PT1] PT1 --> PD[PD] PT3 --> PT1 PT2 --> PT4 PT1 --> PT3 PT4 --> PT2 </pre>
PR₄	 PM04 PS41+PS42+PS43+PS44+PS45+PS46+PS47+PS48+PS48 PR0	 <pre> graph LR PC[PC] --> PT2[PT2] PT2 --> PT3[PT3] PT3 --> PT1[PT1] PT1 --> PT4[PT4] PT4 --> PT1_2[PT1] PT1_2 --> PT2_2[PT2] PT2_2 --> PD[PD] PT3 --> PT2 PT1 --> PT3 PT4 --> PT2 PT2 --> PT1_2 </pre>

Annexe B

2.1. Installation de Raspbian :

En vue d'installer Raspbian OS sur une carte Raspberry PI, nous utilisons le logiciel Raspberry pi Imager. Après avoir téléchargé l'image correspondante au système d'exploitation adéquat, nous insérons la carte mémoire au PC et nous utilisons le logiciel Raspberry PI Imager afin d'installer l'image au niveau de la carte mémoire qu'on va insérer à la carte Raspberry.

La **figure B-1** illustre l'étape d'installation du système d'exploitation sur la carte mémoire utilisée.



Figure B- 1: Installation de Raspbian Os sur la carte mémoire

2.1.1. Connecter la Carte Raspberry PI au PC

Afin de pouvoir contrôler la carte Raspberry PI à partir du PC, nous la connectons au réseau WI-FI. La première étape de cette partie est d'ajouter un fichier texte nommé « SSH » à la carte mémoire avant de l'insérer à la carte Raspberry PI. Ce fichier texte représente le protocole de communication permettant d'établir la connexion entre le PC et la carte. Puis, nous ajoutons un fichier texte pour la configuration du Wifi en précisant les identifiants correspondant au réseau utilisé. Ensuite, nous insérerons la carte mémoire à la carte Raspberry et nous utiliserons le logiciel « Advanced IP Scanner » afin d'obtenir l'adresse IP correspondant à la carte.

2.1.1.1. Configuration du Protocole de Communication SSH

Après obtention de l'adresse IP, nous utilisons le logiciel « PuTTY » à travers lequel nous allons pouvoir configurer le protocole de communication SSH.

Après l'insertion de l'adresse IP de la carte Raspberry PI, nous mettons en place un pseudo et un mot de passe d'accès à la carte. Ensuite, à travers la commande « sudo raspi-config », nous accédons à l'outil de configuration de Raspberry.

Afin de pouvoir visualiser le contenu et contrôler la carte à travers le PC, nous activons les protocoles « SSH » et « VNC ».

La **figure B-2** illustre l'interface de configuration des protocoles SSH et VNC.

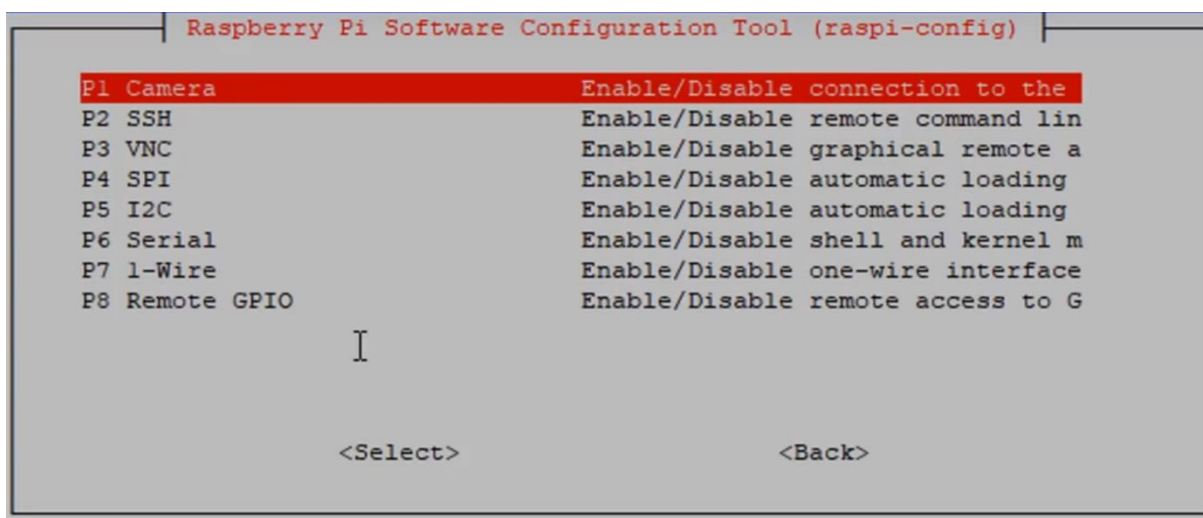


Figure B- 2: Interface de la configuration des protocoles SSH et VNC

2.1.1.2. Afficher le Contenu de la Carte Raspberry

Afin d'afficher le contenu de la carte Raspberry, nous utilisons le logiciel « VNC Viewer » à travers lequel nous nous sommes connectés à l'adresse IP de la carte, nous permettant ainsi de la contrôler.

La **figure B-3** représente l'affichage du contenu de Raspberry Pi à travers VNC Viewer.

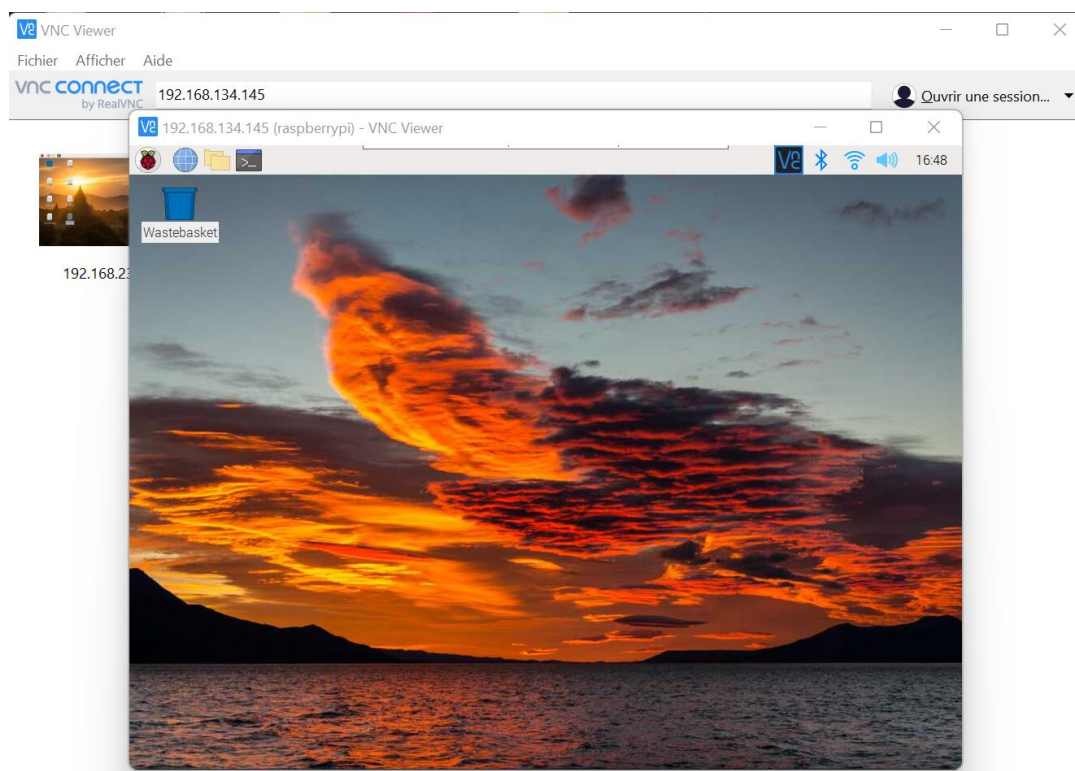


Figure B- 3: Affichage du contenu de Raspberry Pi à travers VNC Viewer

2.2. Connecter les composants Electroniques aux Pins de la Carte Raspberry Pi

2.2.1. H-bridge motor driver

Afin de connecter le L298N motor driver avec la carte Raspberry Pi, nous utilisons les PINs de la carte selon le **tableau B-1** :

Tableau B- 1: Les PINs connectés au L298N motor driver

PIN du L298N :	PIN de Raspberry pi :
5V	5V
GND	GND
ENA	3
ENB	5
IN1	7
IN2	8
IN3	11
IN4	10

2.2.2. Capteurs Ultrasons

Les connexions entre les 3 ULTRASON et la carte Raspberry se font selon les indications du **tableau B-2**.

Tableau B- 2: Les Pins des Ultrasons

PIN ultrason :	PIN Raspberry pi :
5V	5V
GND	GND
Trig_1	29
Echo_1	31
Trig_2	33
Echo_2	35
Trig_3	37
Echo_3	38

2.2.3. Capteurs Infrarouge IR

Les connexions entre les 5 suiveurs de ligne et la carte Raspberry se font selon les indications du **tableau B-3**.

Tableau B- 3: Les PINs des capteurs d'IRs.

PIN Suiveur de ligne	PIN Raspberry pi
5V	5V
GND	GND
S_1	15 DD
S_2	16 D
S_3	13 C
S_4	32 G
S_5	34 GG

2.2.4. RFID

Le **tableau B-4** représente les différents PINs de connexions du lecteur RFID sur la carte Raspberry Pi.

Tableau B- 4: Liste des PINs de connexions du lecteur RFID

PIN RFID	PIN Raspberry pi
SDA	24
SCK	23
MOSI	19
MISO	21
IRQ	Pas de connexion
GND	GND
RST	22
3.3V	3V3

2.3. Identification des Paramètres Relatifs à la Partie Informatique de l'AGV

2.3.1. Identification des IDs des TAGs RFID

La navigation de l'AGV à concevoir dans notre projet est guidée principalement par une bande peinte et est assistée par des TAGs RFID permettant à l'AGV de se positionner au niveau de la cellule d'assemblage flexible.

Afin de pouvoir utiliser les différents TAGs RFID, nous avons tout d'abord identifier l'ID de chaque TAG. Après exécution du programme, nous avons regroupés les TAGs dans le **tableau B-5**.

Annexe B

Tableau B- 5: Les identifiants IDs des TAGs RFID

N° du TAG	ID du TAG
1	585508525513
2	585516871980
3	585518441760
4	585521102876
5	585517977628
6	585509004720
7	585514247648
8	585517969789
9	585512666329
10	585517961565
11	585517449493
12	585521111100
13	585522176108
14	585518497796
15	585517457717
16	585521103896
17	585513268448

2.3.2. Description des Opérations

A travers le **tableau B-6**, nous déterminons les durées de chaque opération des 4 différents produits sur chaque poste de travail, ce qui nous permet la programmation des arrêts de notre AGV au niveau de ces postes.

Tableau B- 6: Les durées des opérations par machine

Poste de travail :		PCR	PT1	PT2	PT3	PT4	PDR
Produit/opération :							
PR1	O11	10s					
	O12		10s			10s	
	O13			15s	15s		
	O14		15s			15s	
	O15			25s			
	O16		20s		20s	20s	
	O17						10s
PR2	O21	10s					
	O22		10s	10s			
	O23				15s	15s	
	O24		20s				
	O25			25s		25s	
	O26						10s
PR3	O31	10s					
	O32					20s	
	O33		25s		25s		
	O34			10s		10s	
	O35		15s		15s		
	O36						10s
PR4	O41	10s					
	O42			25s		25s	
	O43				25s		
	O44		25s	25s			
	O45					25s	
	O46		25s		25s		
	O47			25s			
	O48						

Annexe C

3.1. Introduction

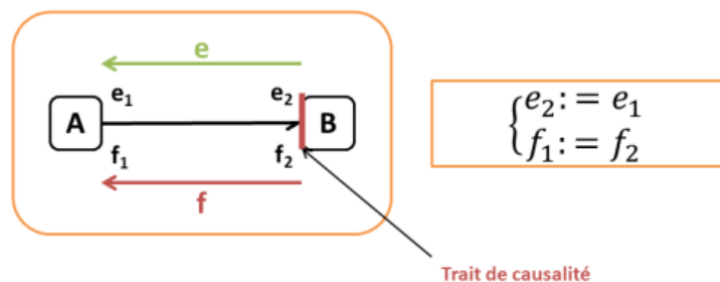
À la fin des années 1950, l'universitaire américain H. M. Paynter a proposé l'approche du Bond Graph (BG), un modèle graphique de modélisation des systèmes. D'un point de vue énergétique, la technique BG peut être utilisée pour aborder le problème de modélisation d'un système impliqué dans le domaine des multi-énergies [39].

Un modèle mathématique en ingénierie de contrôle est la représentation d'état. C'est une représentation d'espace d'état d'un système physique constitué d'une collection d'entrées et de sorties ainsi que d'un ensemble de variables d'état reliées par des équations différentielles du premier ordre. Dans ce modèle, les variables d'état sont une sorte de variable dont la valeur varie dans le temps et dépend des valeurs des variables d'entrée. La valeur des variables de sortie est déterminée par les valeurs des variables d'état et les variables d'entrée. La mise en place d'un modèle dans la représentation d'états est la base de nombreuses approches de contrôle et de dynamique.

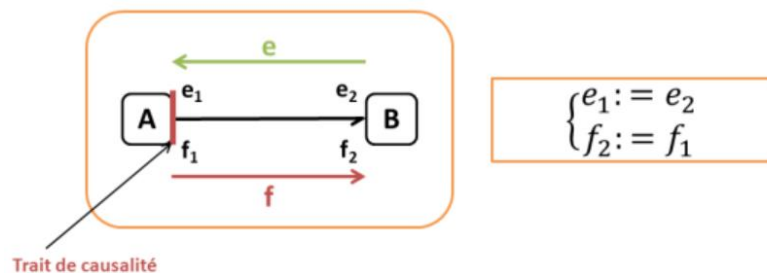
3.2. Principe de Causalité du Bond Graph

Il existe deux conventions possibles pour faire apparaître la causalité :

1. Si A envoie un effort à B, B réagit en envoyant un flux à A



2. Si A applique un flux à B, B réagit en renvoyant un effort à A



3.3. Représentation d'Etat

Des équations dynamiques équivalentes peuvent être facilement déduites à l'aide d'un modèle BG causale. Les étapes ci-dessous doivent être suivies afin de construire la représentation d'état de notre système « Moto-réducteur + Roue » :

Annexe C

Le passage du BG à la représentation d'état s'effectue de façon systématique. Le vecteur d'état est composé des **variables d'énergie** p_i et q_c associées aux éléments inertiels et capacitifs I et C.

$$x = \begin{bmatrix} p_i \\ q_c \end{bmatrix} \quad (\text{C.1}) \quad \text{Donc} \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} e_i \\ f_c \end{bmatrix} \quad (\text{C.2})$$

Si tous les éléments sont en causalité intégrale, la dimension du vecteur d'état est égale au nombre d'éléments I et C.

Si parmi les « n » éléments I et C il en existe « nd » en causalité dérivée, alors la dimension du vecteur d'état est « n – nd ».

La représentation d'état des systèmes ayant les entrées regroupées dans le vecteur « u » et les sorties regroupées dans le vecteur « y » est une équation différentielle du premier ordre où la dérivée du vecteur d'état « x » s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = g(x, u) \end{cases} \quad (\text{C.3})$$

Notons que pour obtenir la représentation d'état, il faut dériver le vecteur d'état et écrire les équations correspondantes.

- La première équation d'état du système est extraite à partir de la jonction « 1 » correspondante à l'élément inertiel $\mathbf{I}_1=\mathbf{L}$ comme suit :

$$\sum e_i = 0 \quad (\text{C.4})$$

$$e_1 + e_2 + e_3 + e_4 = 0 \quad (\text{C.5})$$

$$e_2 = e_1 - e_4 - e_3 \quad (\text{C.6})$$

$$f_2 = \frac{1}{L} \int e_2(t) \quad (\text{C.7}); \quad P_1 = \int e_2(t) dt \quad (\text{C.8})$$

$$\dot{P}_1 = u - \frac{R_1}{L} P_1 - e_4 \quad (\text{C.9})$$

La valeur de e_4 est obtenue à travers les équations caractéristiques du gyrateur :

$$\begin{cases} e_4 = r \times f_5 \\ e_5 = r \times f_4 \end{cases} \quad (\text{C.10})$$

$$e_4 = \frac{r}{J} P_2 \quad (\text{C.11})$$

$$\dot{P}_1 = u - \frac{R_1}{L} P_1 - \frac{r}{J} P_2 \quad (\text{C.12})$$

- La deuxième équation est extraite à partir de la jonction « 1 » correspondant à l'élément inertiel $\mathbf{I}_2=\mathbf{J}$ comme suit :

Annexe C

$$\sum e_i = 0 \quad (C.13)$$

$$e_5 + e_6 + e_7 + e_8 = 0 \quad (C.14)$$

$$e_6 = e_5 - e_7 - e_8 \quad (C.15)$$

$$f_6 = \frac{1}{I_2} \int e_6(t) \quad (C.16) ; P_2 = \int e_6(t) \partial t \quad (C.17)$$

$$\dot{P}_2 = \frac{r}{L} P_1 - \frac{f}{J} P_2 - e_8 \quad (C.18) ; \quad e_5 = \frac{r}{L} P_1 \quad (C.19)$$

La valeur de e_8 est obtenue à travers les équations caractéristiques du transformateur :

$$\begin{cases} e_9 = \frac{1}{R_r} \times e_8 \\ f_8 = \frac{1}{R_r} \times f_9 \end{cases} \quad (C.20)$$

$$e_8 = k \times R_r \times P_3 \quad (C.21)$$

$$\dot{P}_2 = \frac{r}{L} P_1 - \frac{f}{J} P_2 - k \times R_r \times P_3 \quad (C.22)$$

La troisième équation est extraite à partir de la jonction « 0 » correspondant à l'élément capacitif $C = \frac{1}{k}$:

$$\sum f_i = 0 \quad (C.23)$$

$$f_9 + f_{10} + f_{11} = 0 \quad (C.24)$$

$$e_{10} = \frac{1}{C} \int f_{10}(t) \partial t \quad (C.25) ; P_3 = \int f_{10}(t) \partial t \quad (C.26)$$

$$\dot{P}_3 = f_9 - f_{10} \quad (C.27) ; f_9 = \frac{R_r}{J} P_2 \quad (C.28) ; f_{10} = \frac{1}{M_r} P_4 \quad (C.29)$$

$$\dot{P}_3 = \frac{R_r}{J} P_2 - \frac{1}{M_r} P_4 \quad (C.30)$$

La quatrième équation est extraite à partir de la jonction « 1 » correspondant à l'élément inertiel $I_3 = M_r$:

$$\sum e_i = 0 \quad (C.31)$$

$$e_{11} + e_{12} + e_{13} = 0 \quad (C.32)$$

$$e_{12} = e_{11} - e_{13} \quad (C.33)$$

$$f_{12} = \frac{1}{I_3} \int e_{12}(t) \partial t \quad (C.34) ; P_4 = \int e_{12}(t) \partial t \quad (C.35)$$

$$\dot{P}_4 = e_{11} - e_{13} \quad (C.36) ; \quad e_{11} = k \times p_3 \quad (C.37) ; \quad e_{13} = F_{res} \quad (C.38)$$

Annexe C

$$\dot{P}_4 = k \times p_3 - F_{res} \quad (\text{C. 39})$$

A partir des quatre équations précédemment définies (C.12, C.22, C.30 et C.39), on considère les variables d'états et les sorties comme suit :

$$\begin{cases} x_1 = P_1 \\ x_2 = P_2 \\ x_3 = P_3 \\ x_4 = P_4 \\ y_1 = i \\ y_2 = \omega \\ y_3 = \omega_r \end{cases} \quad (\text{C. 40})$$

Annexe D

4.1. Types d'AGVs Selon l'Utilisation

- **Véhicule à guidage automatique AGV pour le chargement/déchargement** : utilisé principalement pour le transport de cargo ou palettes de produits dans les usines.
- **Véhicule à guidage automatique AGV de traction** : utilisé pour les opérations de traction de véhicules.
- **Véhicule à guidage automatique AGV-élévateurs** : Afin de permettre le transport en longueur de produits, les AGVs sont combinés avec les systèmes chariots élévateurs afin de permettre l'exécution d'une telle tâche.
- **Véhicule à guidage automatique AGV à palettes** : des palettes sont placés sur l'AGV permettant le transport du produit à travers les lignes de production.
- **Véhicule à guidage automatique AGV spécial** : cette catégorie regroupe les AGV utilisés pour : l'assemblage, les produits extra-lourds, les produits extra-longs ou pour la manutention d'éléments radioactif.

4.2. Types de Navigation des AGVs

- **Navigation Electromagnétique**

La méthode électromagnétique est une méthode traditionnelle, elle consiste en l'implémentation d'un circuit magnétique sur le chemin défini que doit suivre l'AGV qui sera alimenté par des courants électriques de basse intensité.

- **Navigation à Base de LASER**

La navigation à base de LASER permet une très grande précision de positionnement et ne nécessite donc aucune implémentation de circuit sur le sol ce qui rend la navigation de l'AGV flexible. Cette méthode consiste en la mise en place d'un minimum de trois réflecteurs de LASER autour de la trajectoire de l'AGV, ce dernier va émettre des faisceaux laser réfléchis par les réflecteurs qui lui permettront de se positionner et de se déplacer.

- **Navigation Visuelle**

Cette méthode de navigation est basée sur la collecte des différentes images de l'environnement de l'AGV à travers la caméra implémentée sur l'AGV et leur comparaison avec les images introduites dans la base de données afin de calculer les paramètres géométriques de l'espace et permettre de détecter la trajectoire adaptée à l'AGV.

- **Simultaneous Localization And Mapping SLAM**

Le développement des technologies est orienté vers l'adaptation de l'AGV afin qu'il puisse être capable non seulement de détecter les positions mais aussi la distribution des objets dans un environnement non-familier sans aucun apprentissage. SLAM est l'acronyme correspondant à « Simultaneous Localization And Mapping », c'est un système à base de capteurs capables de percevoir l'environnement extérieur et collecter les données nécessaires. La méthode SLAM se divise en deux méthodes distinctes : méthode basée sur la vision et méthode basée sur la télédétection par laser, (en anglais Laser Imaging Detection and Ranging LiDAR).

- **Navigation Optique**

C'est une méthode de navigation très répandue dans le monde pour sa flexibilité et sa simplicité de mise en place du circuit de manutention. En effet, la trajectoire de l'AGV est définie par la mise en place d'un ruban ou d'une bande peinte qu'il va pouvoir détecter à travers les différents capteurs ou caméras implémentés dessus.

4.3. Les Fonctions de Pilotage d'un Système de Production

Dans un système de production, le pilotage est concerné par plusieurs fonctions, illustrées à travers la **figure D-1**, tout au long de la chaîne de production, selon Zbib [18], les fonctions principales d'un système de pilotage d'un système de production sont réparties en quatre parties distinctes :

4.3.1. La Planification

Il s'agit là du plus haut niveau d'un système de pilotage, cette fonction correspond au niveau de prévision qui s'occupe de la mise en place des plans de production selon les objectifs, les besoins et les données généralement dépendant de l'environnement extérieur du système.

4.3.2. L'Ordonnancement

Cette fonction représente l'allocation des différentes ressources, humaines ou techniques, aux tâches sur une durée spécifique avec le but d'atteindre un ou plusieurs objectifs [24]. Il s'agit de la fonction la plus complexe mais aussi la plus importante dans un système de pilotage.

4.3.3. La Conduite

Cette fonction correspond au niveau décisionnel du pilotage dont le but est de mettre en œuvre les tâches ordonnancées selon les commandes planifiées. Cette fonction permet la flexibilité afin de faire face aux perturbations du système. Elle se décompose en deux parties :

- **Le contrôle** : assurer la coordination globale du système de pilotage et l'interaction entre les différentes entités décisionnelles.
- **La définition et la gestion de l'environnement** : gérer la logistique technique et les configurations.

4.3.4. La Commande

Cette fonction assure le décodage des tâches à exécuter et l'envoi des ordres et commandes vers les systèmes exécutant à savoir les équipements du système de production.

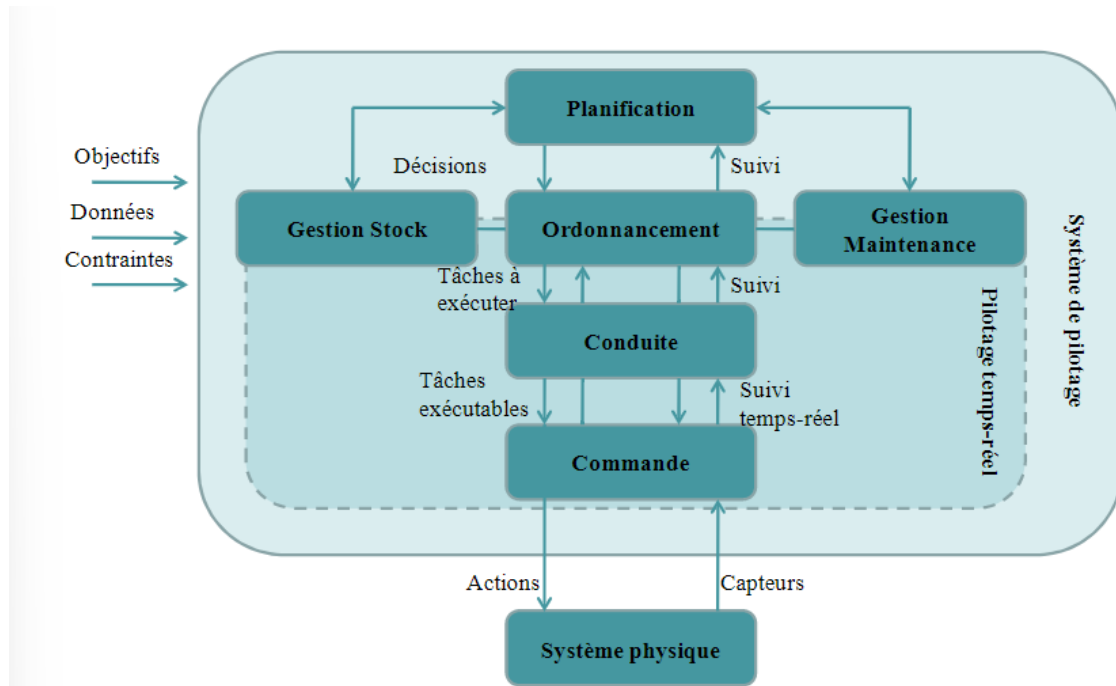


Figure D- 1: Les fonctions principales d'un système de pilotage [18].

Résumé

Résumé

Un système de fabrication flexible (FMS) se compose généralement de plusieurs postes de travail, d'un système de manutention, d'une cellule d'inspection et d'un système de stockage automatique. Dans les FMS, dû à leur flexibilité, les véhicules à guidage automatique (AGV), jouent un rôle essentiel dans les opérations de manutention et améliorent les performances du FMS en réduisant les temps de transport entre les différentes entités.

Dans ce mémoire de fin d'études, nous avons réalisé un système de manutention à base d'AGV dans une cellule d'assemblage flexible en cours de développement au niveau du département GIM. Le système de manutention utilise efficacement les flexibilités machine et de routage. A travers une architecture de pilotage dynamique semi-hiérarchique le système de manutention vise à atteindre une productivité maximale et à suivre les évolutions du marché.

Mots clés : Système de Production Flexible FMS, Système de Manutention, Véhicule à Guidage Automatique AGV, Pilotage Semi-Hiérarchique.

Abstract

A flexible manufacturing system (FMS) usually consists of several workstations, a handling system, an inspection cell and an automatic storage system. In FMS, Automatic Guided Vehicles (AGV) play a vital role in material handling operations and achieve the performance of FMS since they speed up the time it takes to move materials between various entities.

In this dissertation, we realized an AGV-based Material Handling System in a Flexible Assembly Cell under development at the GIM department. The handling System makes efficient use of the machine's flexibility and routing. Through a semi-hierarchical dynamic control architecture, the handling system aims to achieve maximum productivity and to follow market developments.

Keywords: Flexible Manufacturing System FMS, Material Handling System, Automatic Guided Vehicle AGV, Semi-Hierarchical Scheduling.

ملخص:

يتكون نظام التصنيع المرن عادةً من عدة محطات عمل ونظام مناولة وخلية فحص ونظام تخزين آلي. في نظام تصنيع مرن، تلعب المركبات الموجهة الآلية دورًا حيويًا في عمليات مناولة المواد وتحسين أداء نظام التصنيع المرن من خلال تقليل أوقات النقل بين الآلات المختلفة.

في هذه المذكرة، قمنا بصنع نظام مناولة قائم على مركبة موجهة آليا في خلية تجميع مرنة قيد التطوير في قسم الهندسة الصناعية. يستفيد نظام المناولة بكفاءة من مرونة الآلة وتوجيهها. من خلال بنية تحكم ديناميكية شبه هرمية، يهدف نظام المناولة الى تحقيق أقصى قدر من الإنتاجية ومتابعة تطورات السوق.

الكلمات المفتاحية: نظام الإنتاج المرن، نظام مناولة، مركبة موجهة أوتوماتيكيا، التحكم الشبه هرمي.