

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الآلية والالكتروتقني
Département d'Automatique et Electrotechnique



Mémoire de Master

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique Industriel
&
Automatique et Système

Présenté par

GUELLOUMA Marwa
&
HADJADJA Asmaa

Conception d'un robot mobile avec remorque pour des applications en agriculture.

Proposé par : Mr. KAZED Boualem

Année Universitaire 2022-2023

Remerciements

Nous remercions sincèrement Mr. Boualem KAZED pour ses conseils, son assistance et ses orientations tout au long de ce projet.

Nous souhaitons également remercier les membres de notre famille et nos amis pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de ce travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Nous adressons nos remerciements aux membres de juré qui ont consacré leur temps et leur expertise pour évaluer notre travail.

Ce mémoire est dédié à

Mes chers parents

Je vous remercie pour votre amour inconditionnel et votre soutien sans faille. Vous avez toujours été là pour moi, pour me guider, me conseiller et m'encourager, et je suis si reconnaissante de vous avoir comme parents.

Ma sœur et mon petit frère

Merci pour votre présence constante à mes côtés, ainsi que pour vos encouragements et votre soutien.

Ma binôme

Je suis fière de t'avoir comme binôme et amie. Merci pour tes efforts, ta présence, ta patience et ton optimisme.

Mes amis et camarades

Merci pour vos encouragements et votre soutien tout au long de mon parcours.

Et enfin, à mes professeurs

Que ce soit du primaire, du collège, du lycée ou de l'enseignement supérieur, je vous remercie pour votre enseignement, votre patience et votre dévouement envers votre métier.

HADJADJA Asmaa

Je rends grâce à DIEU qui m'a donné le courage et la volonté pour mener à bien ce projet.

Ce travail modeste est dédié :

À mes chers parents et mes sœurs que je leur souhaite bonne santé et longue vie. À tous mes proches amies Ferial, Imène, Samy et spécialement mon amie Asmaa. À mes collègues de l'université de Saad Dahleb. Et tous ceux qui m'ont enseigné au long de ma vie universitaire et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible.

GUELLOUMA Marwa

ملخص:

هذا العمل يتضمن تصميم روبوت متحرك على عجلة واحدة مع مقطورة للاستخدامات الزراعية. سيتطلب المشروع إنشاء نظام تحكم فعال يتيح للروبوت التنقل بشكل مستقل في بيئة زراعية. التحدي الرئيسي هو العثور على متحكم يتيح توجيه الروبوت على المسار المطلوب. ستقوم النمذجة الحركية بتحديد سرعة واتجاه الروبوت بناءً على سرعات العجلات والخصائص الهندسية للروبوت، في حين سيتم استخدام برنامج المحاكاة سيمولينك لاختبار النتائج.

الكلمات المفتاحية:

الروبوت المتحرك، الروبوت المتحرك على عجلة واحدة، المقطورة، النمذجة الحركية، برنامج المحاكاة سيمولينك.

Résumé :

Ce travail consiste à concevoir un robot mobile unicycle avec une remorque pour les applications agricoles. Le projet nécessitera la création d'un système de contrôle efficace qui permettra au robot de naviguer de manière autonome dans un environnement agricole. Le défi principal est de trouver un contrôleur pour guider le robot le long de la trajectoire souhaitée. La modélisation cinématique a permis de déterminer la vitesse et l'orientation du robot en fonction des vitesses des roues et des caractéristiques géométriques du robot, tandis que la simulation sur le logiciel Simulink a validé les performances du système.

Mots clés :

Robot mobile, unicycle, remorque, modélisation cinématique, logiciel Simulink.

Abstract:

This work aims to develop an autonomous robot dedicated for the agricoles applications. By developing a controller to adjust the movement of the unicycle robot, and establishing the relation between the trailer and the studied unicycle, we can formulate at the end the algorithm that represents the functionality of the robot, which we are going to test its efficiency and the precision of its results using SIMULINK. Lastly, we will create the actual robot presenting the materiel used and the features to improve its performance.

Keywords:

Mobile robot, unicycle, trailer, kinematic modelling, Simulink software.

Listes des acronymes et abréviations

GNSS Global Navigation Satellite System

SRTK – GNSS Real-Time Kinematic Global Navigation Satellite System

SIG Geographic information system

q Vecteur de coordonnées généralisées

v_g Vitesse linéaire de la roue gauche

v_d Vitesse linéaire de la roue droite

r Rayon de la roue du robot mobile

CC Courant Continu

CIMAT Center research Mathematics At Technology

w_g Vitesse angulaire de la roue gauche

w_d Vitesse angulaire de la roue droite

Table des matières

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre 1 Évolution des technologies agricoles

1.1	Introduction	3
1.2	Présentation du secteur de l'agriculture	3
1.3	Les applications des robots dans l'agriculture	4
1.3.1	Robots de labourage.....	4
1.3.2	Robots d'analyse du sol.....	5
1.3.3	Robots de semis et de repiquage.....	6
1.3.4	Robots de surveillance des cultures	7
1.3.5	Robots pour la récolte	8
1.4	Avantage des robots agricoles.....	8
1.4.1	Précision et qualité accrue	8
1.4.2	Flexibilité et facilité d'utilisation	9
1.4.3	Réduction de l'utilisation de pesticides.....	9
1.4.4	Sécurité et création d'emplois	9
1.5	Les défis des robots agricoles	9
1.5.1	Le défi de la perception	9
1.5.2	Le défi de la localisation.....	10
1.5.3	Le défi du guidage et du contrôle	10
1.6	Conclusion.....	10

Chapitre 2 Généralités sur les robots mobiles

2.1	Introduction	11
2.2	Robot mobile.....	11
2.3	L'holonomie et la non holonomie	11
2.3.1	Degré de liberté.....	11
2.3.2	L'holonomie.....	12
2.3.3	La non holonomie	12
2.4	Types des robot mobiles à roues	13
2.4.1	Robot de type différentiel	13
2.4.2	Robot de type tricycle	14
2.4.3	Robot de type voiture.....	14
2.4.4	Robot omnidirectionnel	14

2.5	Modélisation du robot unicycle.....	15
2.6.1	Modélisation géométrique	15
2.6.2	Modélisation cinématique.....	16
2.6	Contrôlabilité d'un robot unicycle	18
2.7	Problèmes de commande.....	19
2.7.1	Suivi de chemin	19
2.7.2	Stabilisation de trajectoires	19
2.7.3	Stabilisation de configurations fixes.....	19
2.8	Conclusion.....	19
Chapitre 3 Navigation du robot mobile		
3.1	Introduction	20
3.2	Robot « bicyclette »	20
3.3	La navigation.....	21
3.3.1	La localisation.....	21
3.3.2	Le suivi de trajectoire	22
3.4	L'algorithme de commande du robot utilisé	22
3.4.1	Le contrôleur de suivi de trajectoire	22
3.4.2	Le calcul de la nouvelle position	30
3.5	La relation entre le robot et l'accessoire d'agriculture.....	31
3.6	Fonctionnement du robot	33
3.7	Conclusion.....	34
Chapitre 4 Simulation et interprétation		
4.1	Introduction	35
4.2	La simulation.....	35
4.3	Logiciel utilisé.....	35
4.4	Les étapes d'élaboration de la simulation	36
4.4.1	Modélisation du Moteur à Courant Continu (CC).....	36
4.4.2	Commande du moteur CC	38
4.4.3	La génération de trajectoire	40
4.4.4	Le contrôleur du suivi de trajectoire	40
4.5	Le programme global	41
4.6	Tests et résultats	43
4.5.1	Trajectoire droite.....	43

4.5.2	Trajectoire en huit	46
4.5.3	Trajet en parallèle	48
4.7	Discussion des résultats.....	50
4.8	Conclusion.....	50
Chapitre 5 Réalisation du robot		
5.1	Introduction	51
5.2	Le moteur à CC utilisé (EMG30).....	51
5.3	Les encodeurs.....	52
5.3.1	Les encodeurs et le sens de mouvement	53
5.3.2	Les encodeurs et le calcul de nombre de tours	53
5.4	Le circuit intégré L298.....	54
5.5	Arduino MEGA 2560.....	56
5.6	Carte de puissance.....	57
5.7	Conception mécanique du robot.....	58
5.8	Conclusion.....	59
Conclusion générale.....		60
Bibliographiques		62

Liste des figures

FIGURE 1. 1 : L'IMPACT DE L'AGRICULTURE SUR LA SOCIETE [2]	3
FIGURE 1. 2 : UNE EXPLOITATION AGRICOLE INTELLIGENTE ET UNE PETITE EXPLOITATION AGRICOLE [5] ...	4
FIGURE 1. 3 : ROBOTS DE LABOURAGE [6]	5
FIGURE 1. 4 : ROBOT D'ANALYSE DE SOL [6]	6
FIGURE 1. 5 : ROBOTS DE SEMIS ET DE REPIQUAGE [6]	7
FIGURE 1. 6 : ROBOTS DE SURVEILLANCE DES CULTURES [6]	7
FIGURE 1. 7 : ROBOTS POUR LA RECOLTE [6]	8
FIGURE 2. 1 : LES DEGRES DE LIBERTE	11
FIGURE 2. 2 : LES MOUVEMENTS DANS UN PLAN DE DEUX DIMENSIONS. [9]	12
FIGURE 2. 3 : EXEMPLE D'UNE CONTRAINTTE NON HOLONOME.	12
FIGURE 2. 4 : ROBOT MOBILE DIFFERENTIEL [13]	13
FIGURE 2. 5 : TYPE DE MOUVEMENT D'UN ROBOT DIFFERENTIEL [14].....	13
FIGURE 2. 6 : ROBOT MOBILE DE TYPE TRICYCLE [12]	14
FIGURE 2. 7 : ROBOT MOBILE DE TYPE VOITURE [12]	14
FIGURE 2. 8 : ROBOT MOBILE OMNIDIRECTIONNEL [12]	14
FIGURE 2. 9 : MODELISATION GEOMETRIQUE DE ROBOT MOBILE UNICYCLE [15].....	15
FIGURE 2. 10 : CENTRE INSTANTANE DE ROTATION D'UN ROBOT DE TYPE UNICYCLE [15].....	16
FIGURE 2. 11 : VUE LATERALE DU ROBOT MOBILE. [15]	17
FIGURE 3. 1 : EXEMPLE D'UN ROBOT SOUS LA FORME D'UNE BICYCLETTE « CIMAT_ROBOT »	20
FIGURE 3. 2 : LE POINT DESIRE	23
FIGURE 3. 3 : LE MOUVEMENT EN ROTATION	23
FIGURE 3. 4 : MOUVEMENT RECTILIGNE	24
FIGURE 3. 5 : MOUVEMENT DU ROBOT	24
FIGURE 3. 6 : LE MODELE REPRESENTE PAR SES COORDONNEES POLAIRES	25
FIGURE 3. 7 : LA VARIATION δ	26
FIGURE 3. 8 : LA VARIATION β	27
FIGURE 3. 9 : ROBOT UNICYCLE + REMORQUE.....	31
FIGURE 3. 10 : MODELE CINEMATIQUE DE ROBOT « BICYCLETTE »	32
FIGURE 4. 1 : SCHEMA D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU [22]	36
FIGURE 4. 2 : LE SCHEMA BLOC FONCTIONNEL DE MOTEUR COURANT CONTINUE.....	38
FIGURE 4. 3 : LA REPONSE DU MOTEUR	39
FIGURE 4. 4 : LE SCHEMA FONCTIONNEL SIMULINK DU MODELE CINEMATIQUE	39
FIGURE 4. 5 : SCHEMA SIMULINK DU MODELE CINEMATIQUE AVEC MOTEUR COURANT CONTINUE	40
FIGURE 4. 6 : CONTROLEUR DES MOUVEMENTS	40

FIGURE 4. 7 : FONCTIONNEMENT DE ROBOT	41
FIGURE 4. 8 : ERREUR ENTRE LE CHEMIN DU ROBOT PAR RAPPORT AU TRAJET DROIT DESIRE	43
FIGURE 4. 9 : VARIATION DE LA VITESSE LINEAIRES V (M/s) POUR UNE TRAJECTOIRE DROITE	44
FIGURE 4. 10 : VARIATION DE LA VITESSE ANGULAIRE Ω (RAD/s) POUR UNE TRAJECTOIRE DROITE.....	44
FIGURE 4. 11 : VARIATION DE LA VITESSE DE LA ROUE ωg ET DE LA ROUE ωd EN UN TRAJET DROIT	45
FIGURE 4. 12 CHEMIN DU ROBOT DANS LA TRAJECTOIRE EN HUIT	46
FIGURE 4. 13 : VARIATION DE LA VITESSE LINEAIRES V (M/s) POUR UNE TRAJECTOIRE EN HUIT	46
FIGURE 4. 14 : VARIATION DE LA VITESSE ANGULAIRE Ω (RAD/s) POUR UNE TRAJECTOIRE HUIT	47
FIGURE 4. 15 : VARIATION DE LA VITESSE DE LA ROUE ωg ET DE LA ROUE ωd EN TRAJECTOIRE HUIT	47
FIGURE 4. 16 : CHEMIN DU ROBOT ET LA REMORQUE DANS LA TRAJECTOIRE PARALLELE	48
FIGURE 4. 17 : : VARIATION DE LA VITESSE LINEAIRES V (M/s) POUR UNE TRAJECTOIRE PARALLELE.....	49
FIGURE 4. 18 : ORIENTATION DU ROBOT (θ) ET DE LA REMORQUE (ψ) EN TRAJET PARALLELE	49
FIGURE 5. 1 : MOTEUR EMG30	51
FIGURE 5. 2: LA ROTATION DANS LE SENS POSITIF (B EST RETARDE)	53
FIGURE 5. 3: LA ROTATION DANS LE SENS NEGATIF (A EST RETARDE)	53
FIGURE 5. 4: SIGNAUX DES VOIES A ET B	53
FIGURE 5. 5: SCHEMA INTERNE D'UN L298.....	55
FIGURE 5. 6 : DIRECTION DU MOTEUR [28].....	55
FIGURE 5. 7 : SIGNAL PWM ET LA VARIATION DE LA TENSION MOYENNE [30]	56
FIGURE 5. 8 : : ARDUINO MEGA 2560	56
FIGURE 5. 9 : LA CARTE DE PUISSANCE DU ROBOT	57
FIGURE 5. 10 : PROTOTYPE DU ROBOT AGRICOLE	58
FIGURE 5. 11 : LA CONFIGURATION ELECTRONIQUE DU ROBOT	59

Liste des tableaux

TABLEAU 1. 1 : DIVERS TRAVAUX SUR DES ROBOTS AGRICOLES POUR LES OPERATIONS D'ENSEMENCEMENT ET DE TRANSPLANTATION [6].....	6
TABLEAU 5. 1 : LES CARACTERISTIQUES DE MOTEUR EMG 30.....	52
TABLEAU 5. 2: LE COMPTAGE DES IMPULSIONS A PARTIR DE A ET B.....	54

Introduction générale

Les premiers robots ont été créés pour remplacer les travailleurs humains dans les tâches répétitives et monotones. Ils ont été développés avec une structure sérielle similaire à celle du corps humain. De là, les recherches sur les robots ont été axées sur le développement de technologies qui peuvent aider à résoudre des problèmes complexes et améliorer la qualité de vie des êtres humains en leur offrant des solutions pour effectuer des tâches difficiles, dangereuses ou répétitives.

En effet, ces recherches ont connu de grands avancements, notamment dans le domaine du guidage automatique des robots. Au cours des 15 dernières années, un grand nombre de véhicules autonomes ont été développés pour de nombreuses applications telles que la surveillance et exploration partielle, et ils sont devenus présents dans de nombreux domaines tels que l'industrie, la logistique et l'agriculture.

Nous nous intéressons dans ce travail au domaine agricole. Les robots agricoles ont le potentiel d'améliorer l'efficacité et la productivité de l'agriculture et de répondre aux besoins de la population mondiale en matière de nourriture.

Bien que leur potentiel soit important pour améliorer la productivité dans le domaine agricole, ils sont encore limités par leurs capacités à s'adapter à une grande variété de tâches telles que la plantation, la récolte et le désherbage, dans différents types de terrains. D'un autre côté, leur complexité et leur maintenance peuvent rendre leur adoption difficile et compliquée aux agriculteurs.

Il convient également de noter que les coûts de développement des robots agricoles peuvent être élevés. Ils nécessitent des investissements importants en recherche et en développement, ainsi que des coûts élevés pour leur fabrication.

Pour résoudre ces défis, nous proposons de réaliser un modèle d'un robot agricole constitué d'un unicycle qui représente un tracteur auquel est attachée une plateforme polyvalente sous forme de remorque dédiée pour les différentes applications agricoles telles que la plantation, l'arrosage, la récolte et d'autres tâches. Cette plateforme peut être facilement attachée et détachée selon les besoins de l'agriculteur.

Ce robot pourrait offrir aux agriculteurs une solution rentable pour améliorer l'efficacité et la productivité de leur travail. De plus, un tel robot pourrait être programmé 24 heures sur 24, ce qui leur permettrait d'augmenter leurs rendements, de gagner du temps et de réduire les coûts de main-d'œuvre.

Donc, l'objectif de ce mémoire est de concevoir un robot agricole autonome qui offre une solution économique pour améliorer l'efficacité et la productivité du travail agricole. Pour atteindre cet objectif, nous avons structuré notre travail en cinq chapitres :

Dans le premier chapitre, nous examinerons les applications de la robotique dans le domaine agricole en présentant quelques exemples de robots agricoles existants.

Le deuxième chapitre portera sur les généralités des robots mobiles, en présentant les différents types de robots mobiles et en abordant quelques notions importantes pour notre étude.

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude de la navigation de notre robot, en examinant le contrôle de ses mouvements, la manière dont il se déplace le long d'un chemin choisi, et l'étude de la relation entre le robot unicycle et la remorque.

Dans le quatrième chapitre, nous utiliserons l'interface de programmation Simulink pour visualiser le comportement du robot étudié et tester la robustesse et la précision du contrôleur sur différentes trajectoires.

Dans le dernier chapitre, nous aborderons la réalisation de robot, nous discuterons le choix des matériaux utilisés et l'architecture électronique du robot.

Chapitre 1

Évolution des technologies agricoles

1.1 Introduction

L'objectif principal de ce premier chapitre est d'introduire l'une des notions fondamentales de cette recherche. Nous ferons un tour d'horizon sur le secteur agricole en général. Nous illustrerons non seulement sa définition mais aussi son importance et les défis de secteur ainsi les tendances et les perspectives de ce domaine. De plus, nous examinerons l'utilisation des robots dans l'agriculture et les différents défis auxquels ces robots sont confrontés dans ce secteur.

1.2 Présentation du secteur de l'agriculture

Le secteur agricole regroupe toutes les activités liées à la production, la transformation et la commercialisation des produits agricoles. C'est un secteur essentiel de l'économie mondiale, il fournit de la nourriture à la population mondiale et contribue à la croissance économique et au développement rural dans de nombreux pays. ^[1]

Ce secteur joue un rôle clé dans la satisfaction de la demande des consommateurs. Il fournit des matières premières essentielles à de nombreuses industries. De plus, il peut contribuer au développement économique en créant des emplois, en stimulant la croissance économique et en assurant la sécurité alimentaire. ^[2]

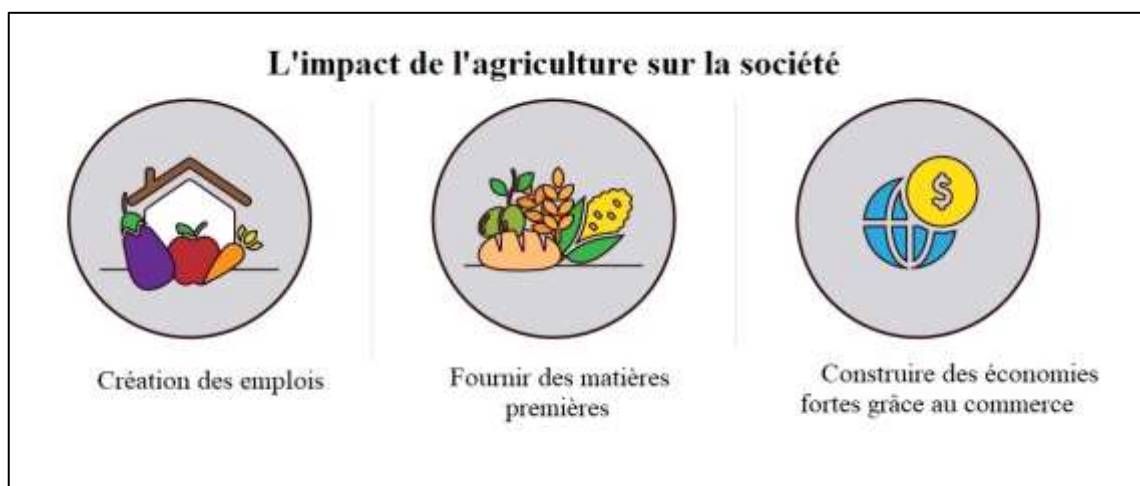


Figure 1. 1 : L'impact de l'agriculture sur la société [2]

Cependant, Le secteur agricole est confronté à plusieurs défis, tels que la sécurité alimentaire, la durabilité environnementale et la viabilité économique. Pour assurer la sécurité alimentaire dans le monde, l'agriculture doit être capable de répondre à la demande croissante de nourriture tout en garantissant la sécurité alimentaire pour tous. ^[3]

Aujourd'hui, l'agriculture doit accroître ses niveaux de production. L'utilisation de la robotique agricole et de la télédétection peut aider à améliorer la précision et l'efficacité des tâches agricoles, réduire les coûts de main-d'œuvre et améliorer la prise de décision. Ces avancées technologiques sont de plus en plus courantes dans le monde entier en raison de leurs avantages pour les agriculteurs et l'environnement. [4]



Figure 1. 2 : Une exploitation agricole intelligente et une petite exploitation agricole [5]

1.3 Les applications des robots dans l'agriculture

L'automatisation et les robots sont particulièrement importants dans les grandes opérations industrielles, où de grandes quantités de terres doivent être surveillées et traitées, et où de grandes quantités de cultures ou de produits doivent être traitées. Les robots ont un large éventail d'utilisations dans l'agriculture, allant de tâches complexes comme la surveillance des cultures et la mesure du pH du sol à des tâches plus simples comme la récolte et le labour, l'emballage des fruits et légumes et la plantation de graines.

1.3.1 Robots de labourage

Le labourage est la première étape du processus agricole et consiste en un labourage primaire qui agite profondément le sol pour produire une surface rugueuse, suivi d'un labourage secondaire qui produit une surface lisse. Le labourage est un processus fastidieux et à labour intensif, ce qui en fait une cible pour l'automatisation. Les tracteurs traditionnels ont tendance à être lourds et à endommager le sol par le compactage du sol. [6]

Une étude récente a révélé que le compactage du sol causé par l'équipement lourd réduit les rendements jusqu'à 50% dans certains champs. Si les tendances actuelles se poursuivent, la combinaison du compactage et de l'érosion pourrait réduire les rendements agricoles jusqu'à 20% à l'échelle mondiale. Des recherches suggèrent que l'utilisation de robots de petite taille réduirait la fréquence de labourage nécessaire et pourrait percer et placer les graines ou les semis sans avoir à labourer le sol. Il est également possible pour les robots d'optimiser le processus de labourage en effectuant des micro-labourages autour de l'endroit du semis, qui a le plus d'influence sur la croissance de la plante. [7]



Figure 1. 3 : Robots de labourage [6]

1.3.2 Robots d'analyse du sol

Le labourage est suivi de l'analyse du sol, ce dernier fournit des nutriments nécessaires à leur développement. Pour évaluer la fertilité et l'état physique du sol, des tests sont généralement effectués en prélevant des échantillons sur le terrain et en les soumettant à une analyse en laboratoire. En agriculture, cela implique souvent de suivre le labour avec une analyse du sol pour déterminer les propriétés physico-chimiques du sol, mais cette opération peut être longue et coûteuse. Des méthodes plus efficaces et plus précises sont donc nécessaires pour évaluer rapidement et précisément les propriétés du sol, sans avoir à prélever de nombreux échantillons ou à passer par un laboratoire spécialisé. Plusieurs recherches ont été faites sur des robots pouvant prendre des échantillons et les analyser sur le sol. [6]



Figure 1. 4 : Robot d'analyse de sol [6]

1.3.3 Robots de semis et de repiquage

Le semis consiste à planter les graines dans le sol pour qu'elles puissent germer avec succès, tandis que le repiquage implique la transplantation de jeunes plants à un emplacement précis en fonction des besoins de chaque culture. Les chercheurs ont développé des robots pour améliorer la précision et l'efficacité du semis et du repiquage et les résultats montrent une précision élevée dans la plantation des cultures dans le champ. [6]

Référence	La description
Développement de robots de plantation de semences pour la création d'images de fleurs en croissance à grande échelle	67% des graines éjectées se trouvaient dans un rayon de 1 cm et 85% dans un rayon de 1,5 cm
Robot automatique d'ensemencement du riz à trois roues opérant dans des rizières sèches	Le positionnement basé sur le GNSS a été utilisé avec la localisation étendue basée sur le filtre de Kalman, la précision moyenne d'ensemencement étant de 91%.
Rover autoguidé pour creuser et semer des graines se basant sur le commandement	Les commandes étaient données manuellement par un téléphone portable pour la navigation et l'ensemencement
Thorvald, une plate-forme robotique polyvalente pour les applications agricoles, initialement testée sur le terrain	RTK-GNSS utilisé pour la navigation. Des expériences d'ensemencement ont été menées en utilisant différents schémas d'ensemencement et ont été analysées pour la suppression des mauvaises herbes.

Tableau 1. 1 : Divers travaux sur des robots agricoles pour les opérations d'ensemencement et de transplantation [6]



Figure 1. 5 : Robots de semis et de repiquage [6]

1.3.4 Robots de surveillance des cultures

Les robots de surveillance des cultures sont utilisés pour aider les agriculteurs à surveiller et à gérer leurs cultures de manière plus efficace. Ces robots peuvent être équipés de capteurs pour recueillir des données sur le sol, l'eau, les plantes et l'environnement, ce qui peut aider à détecter les problèmes de croissance des plantes et à identifier les zones qui nécessitent une attention particulière et par conséquent ils peuvent aider les agriculteurs à améliorer leur productivité, à réduire les coûts et à prendre des décisions plus éclairées en matière de gestion des cultures. [6]

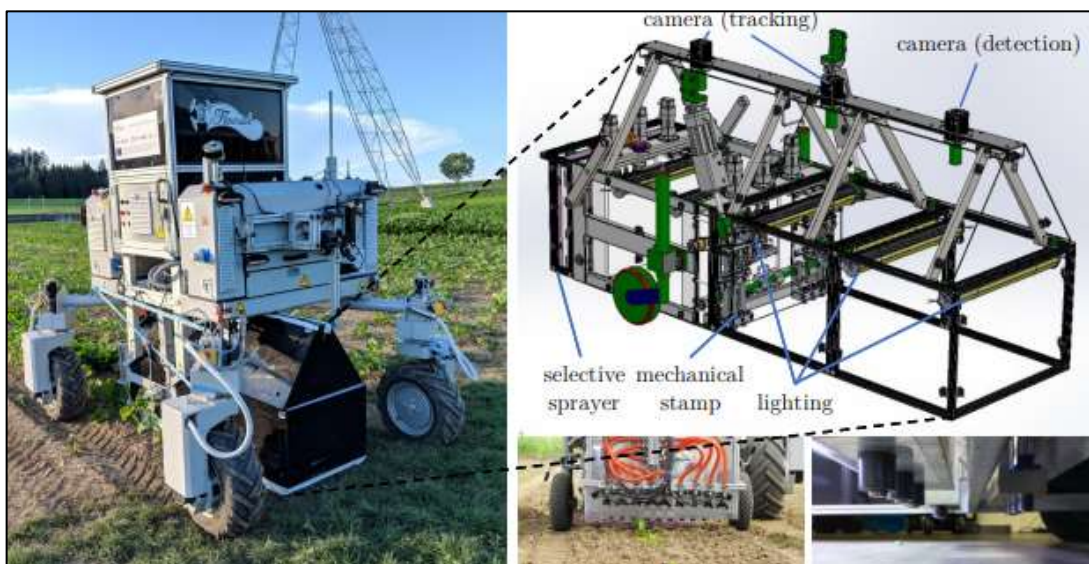


Figure 1. 6 : Robots de surveillance des cultures [6]

1.3.5 Robots pour la récolte

La récolte est le processus de récolte de la culture mature et varie selon le type de culture. La récolte du riz et du blé est différente de l'horticulture et nécessite également beaucoup de travail. Pour la récolte des fruits et des fleurs en horticulture, les produits doivent être récoltés plusieurs fois au cours de leur maturation, ce qui nécessite une détection précise des propriétés du produit par une récolteuse robotisée. Le robot doit être mobile pour se positionner correctement et nécessite un mécanisme de cueillette ou de récolte pour effectuer le processus de manière efficace. [6]



Figure 1. 7 : Robots pour la récolte [6]

1.4 Avantage des robots agricoles

Le développement des robots agricoles et leur intégration à l'intelligence artificielle garantissent des produits de meilleure qualité, des coûts de production réduits et moins de main-d'œuvre dans les champs. Cela peut aider les agriculteurs à améliorer leur rentabilité tout en offrant aux consommateurs des produits de meilleure qualité. L'utilisation réduite de pesticides, l'augmentation de la sécurité des travailleurs et la création d'emplois, ainsi que l'amélioration de la qualité des produits et la baisse des coûts de production sont les principaux avantages des robots agricoles pour l'industrie agricole.

1.4.1 Précision et qualité accrue

Les robots agricoles offrent une grande précision et qualité dans les tâches qu'ils effectuent, sans commettre d'erreurs à haut débit, améliorant ainsi l'efficacité et la productivité de l'agriculture. [8]

1.4.2 Flexibilité et facilité d'utilisation

Les robots agricoles offrent une flexibilité et facilité d'utilisation. Ils peuvent être utilisés dans divers domaines de l'agriculture, ce qui permet d'augmenter leur efficacité et leur polyvalence. De plus, ils peuvent facilement contourner les obstacles tels que les arbres et les rochers, ce qui permet une couverture complète des terres cultivées tout en minimisant les pertes. ^[8]

1.4.3 Réduction de l'utilisation de pesticides

Les robots agricoles peuvent également contribuer à la réduction de l'utilisation de pesticides, offrant ainsi des avantages environnementaux et économiques. Ils peuvent réduire jusqu'à 80% l'utilisation de pesticides grâce à leur capacité à pulvériser avec précision et à détecter les zones nécessitant une protection supplémentaire. ^[8]

1.4.4 Sécurité et création d'emplois

Les robots agricoles offrent une sécurité pour les travailleurs, car ils peuvent effectuer des tâches dangereuses ou répétitives sans risque pour leur santé. Ils peuvent également créer des emplois pour la conception et la maintenance des robots, ce qui peut aider à stimuler l'innovation et la croissance économique. L'utilisation de robots agricoles dans l'agriculture présente de nombreux avantages, notamment l'augmentation des rendements, le gain de temps, la facilité d'utilisation et le retour sur investissement. ^[8]

1.5 Les défis des robots agricoles

Les robots agricoles sont une nouvelle technologie qui peut aider les agriculteurs pour des tâches considérées comme répétitives et pénibles. Cependant, leur utilisation dans le domaine de l'agriculture est confrontée à des défis importants, telle que :

1.5.1 Le défi de la perception

Pour une bonne navigation dans environnements complexes tels que des champs de cultures, Les robots agricoles doivent être équipés de capteurs de haute précision pour percevoir leur environnement de manière fiable et précise. Cette tâche est particulièrement difficile dans un les conditions environnementales en constante évolution dans les champs de cultures, ainsi que les variations météorologiques imprévisibles. ^[8]

1.5.2 Le défi de la localisation

Pour pouvoir effectuer des tâches avec efficacité et précision, les robots agricoles doivent pouvoir se localiser. Cependant, cela peut être difficile en raison du manque de structures de référence dans les champs agricoles et de la difficulté à détecter les changements de topographie. ^[8]

1.5.3 Le défi du guidage et du contrôle

Basés sur des informations de perception et de localisation, les robots agricoles doivent pouvoir se déplacer de manière précise et contrôlée dans des environnements imprévisibles. Cela peut être difficile en raison de l'environnement complexe des terres agricoles et de la nécessité de minimiser les dommages aux plantes et aux cultures pendant les opérations agricoles. ^[8]

1.6 Conclusion

L'utilisation de robots dans l'agriculture présente de nombreux avantages potentiels. Cependant, il existe également des défis techniques à surmonter, notamment en ce qui concerne la perception, la localisation et le guidage du robot. Malgré ces défis, les tendances actuelles indiquent une utilisation croissante des robots dans l'agriculture, ce qui pourrait améliorer considérablement l'efficacité et la durabilité du secteur. Il est donc important de poursuivre la recherche et le développement de cette technologie pour répondre aux besoins futurs de l'agriculture.

Chapitre 2

Généralités sur les robots mobiles

2.1 Introduction

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons définir le concept du robot mobile. Nous présenterons les notions telles que l'holonomie et la non-holonomie et les différents types des robots mobiles à roues. En deuxième partie, les équations cinématiques du robot mobile de type unicycle seront présentées, ainsi que la contrôlabilité et les problèmes de commande des robots mobiles.

2.2 Robot mobile

Un robot est un appareil mécanique, électronique et informatique qui effectue automatiquement des tâches généralement dangereuses, fastidieuses, répétitives ou impossibles pour l'homme. Ces machines sont équipées de capteurs qui lui permettent de percevoir leur environnement, de moteurs qui leur permettent de se déplacer et d'interagir avec cet environnement, et d'un système électronique ou informatique qui contrôle le robot. ^[9]

2.3 L'holonomie et la non holonomie

Il existe deux catégories de robot mobile. Avant de les présenter nous allons définir les degrés de libertés.

2.3.1 Degré de liberté

Le nombre de degré de liberté d'un corps est défini comme le nombre de mouvements indépendants que ce corps peut faire par rapport à un système de coordonnées déterminés dans un espace. ^[10]

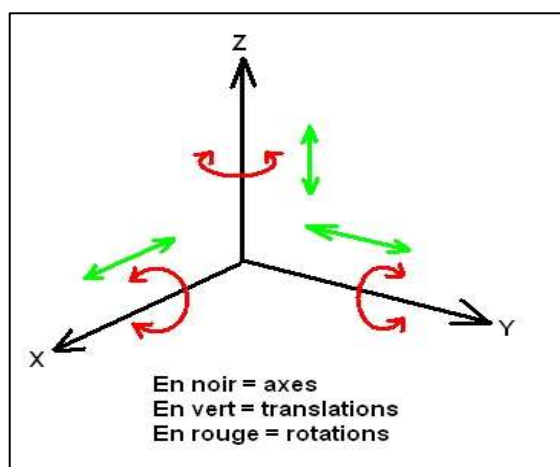


Figure 2. 1 : Les degrés de liberté

2.3.2 L'holonomie

Robot holonome est un type de robot capable de se déplacer dans tous les directions sans aucune contrainte. [9]

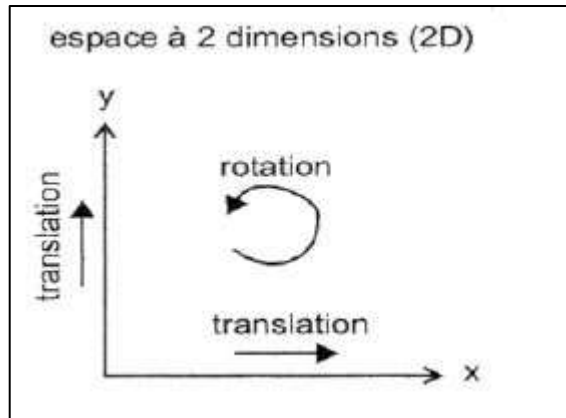


Figure 2. 2 : Les mouvements dans un plan de deux dimensions. [9]

2.3.3 La non holonomie

La structure d'un robot non holonome ne permet qu'une translation sur plan X, Y pour obtenteur une rotation sur l'axe perpendiculaire Z nous pouvons faire varie les vitesses gauche et droite selon la vitesse angulaire désirée. La figure suivante montre un exemple de ce type de robots. [11]

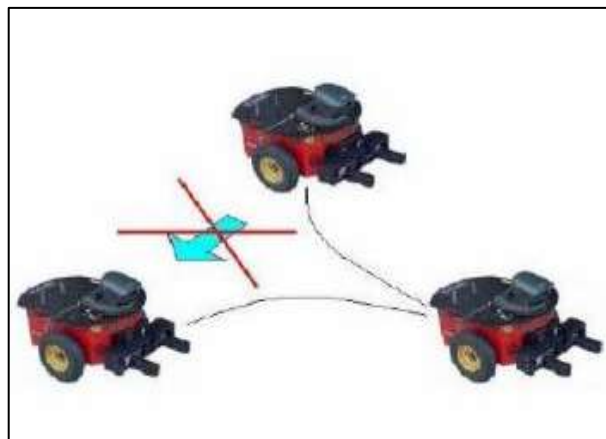


Figure 2. 3 : Exemple d'une contrainte non holonome.

2.4 Types des robot mobiles à roues

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéresserons aux robots mobiles à roues. Ces derniers sont classés selon le nombre et la position des roues utilisées. Il existe quatre types principaux de robots à roues, qui sont fréquemment rencontrés.

2.4.1 Robot de type différentiel

Ce type de robot (Fig.2.4) est composé de deux moteurs couplés à deux roues motrices disposées sur un axe au centre de la plateforme mobile. La différence de rotation des deux roues permet à la plateforme de tourner dans un sens ou dans l'autre, d'où son appellation à « vitesse différentielle ». [12]

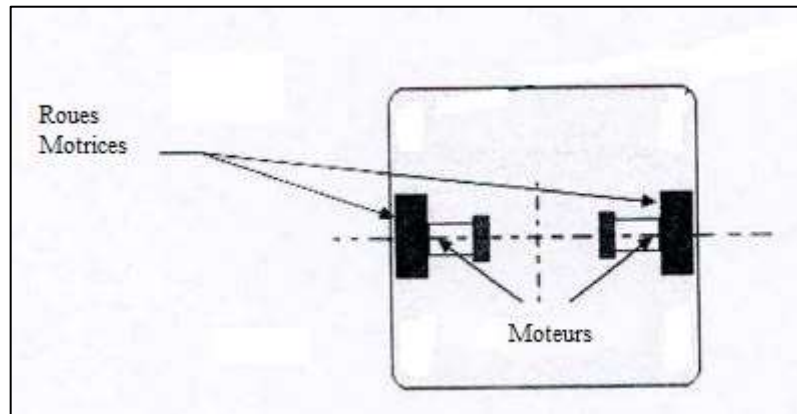


Figure 2. 4 : Robot mobile différentiel [13]

En faisant varier la puissance appliquée aux moteurs qui contrôlent les roues du robot mobile à roues différentielles, on peut contrôler la direction et la trajectoire du robot, lui permettant ainsi de se déplacer en ligne droite ou de suivre des trajectoires plus complexes.

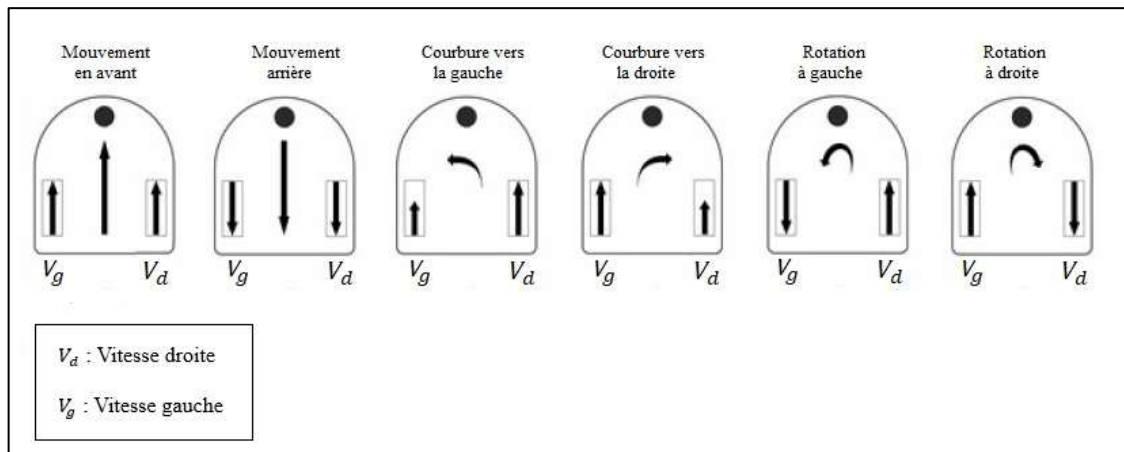


Figure 2. 5 : Type de mouvement d'un robot différentiel [14]

2.4.2 Robot de type tricycle

La structure du robot mobile tricycle est constituée de deux roues fixes coaxiales et d'une roue centrale orientable placée sur l'axe longitudinal du robot. ^[11]

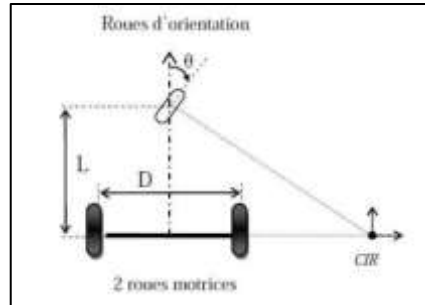


Figure 2. 6 : Robot mobile de type tricycle [12]

2.4.3 Robot de type voiture

Ce type est similaire à type tricycle. La différence se situe au niveau du train avant, qui comporte deux roues au lieu d'une seule roue au milieu. ^[11]

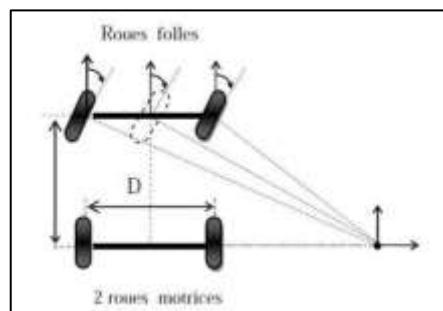


Figure 2. 7 : Robot mobile de type voiture [12]

2.4.4 Robot omnidirectionnel

Il est conçu avec trois roues décentrées orientables placées en triangle équilatéral. Cette conception offre une grande manœuvrabilité et une grande flexibilité dans les mouvements. ^[11]

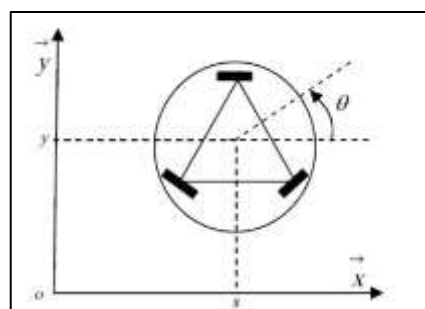


Figure 2. 8 : Robot mobile omnidirectionnel [12]

2.5 Modélisation du robot unicycle

Toute étude dans le domaine de la robotique passe par une étape fondamentale, à savoir la modélisation. Elle consiste à représenter le système à l'aide d'un modèle mathématique qui explique au mieux ses caractéristiques. Il existe deux niveaux de modélisation en robotique : géométrique et cinématique.

2.6.1 Modélisation géométrique

La modélisation géométrique consiste à déterminer la position et l'orientation relatives des différentes parties mobiles d'un robot. [15]

En supposant que le robot étudié est équipé par des roues non déformable et navigue dans un plan horizontal défini par un repère absolu fixe (O, X, Y) , et un repère relatif (R, X_r, Y_r) lié au robot (Fig.2.9).

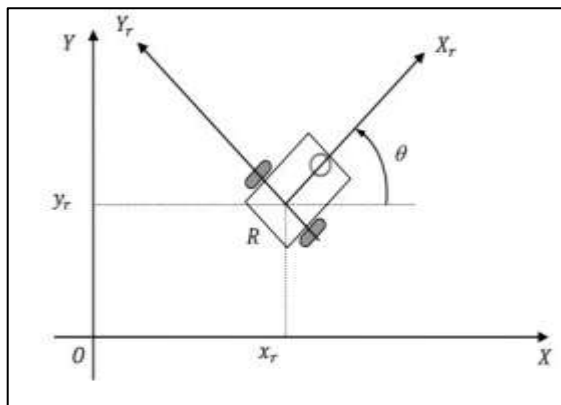


Figure 2. 9 : Modélisation géométrique de robot mobile unicycle [15]

La position et l'orientation du robot dans les repères sont définis comme suit [15] :

$$\begin{cases} q = [x \ y \ \theta]^T \\ q_r = [x_r \ y_r \ \theta_r]^T \end{cases} \quad (2.1)$$

La relation entre ces deux repères est exprimée à travers la matrice de rotation suivante :

$$q = R(\theta)q_r, \text{ avec } R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

2.6.2 Modélisation cinématique

La modélisation cinématique d'un robot mobile à roues vise à trouver la vitesse et l'orientation du robot dans le repère fixe en fonction des vitesses des roues et des caractéristiques géométriques du robot. [15].

Le modèle cinématique de type l'unicycle est utilisé comme une référence de base pour de nombreux types des robots mobiles à roues non holonomes (Fig.2.10).

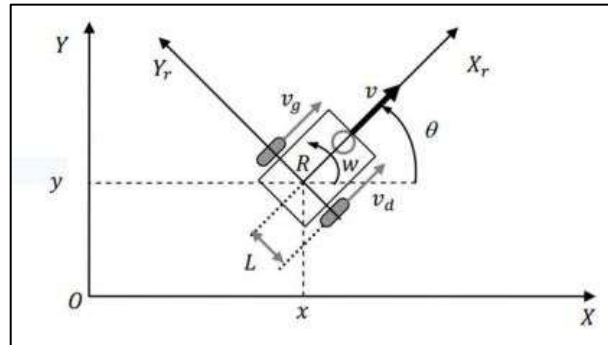


Figure 2. 10 : Centre instantané de rotation d'un robot de type unicycle [15]

Sa configuration est décrite par un vecteur de coordonnées généralisées :

$$q = [x \ y \ \theta]^T \quad (2.3)$$

Avec

x, y : Coordonnées du point R

θ : L'orientation du robot.

v_d : vitesse linéaire de roue droite.

v_g : vitesse linéaire de la roue gauche.

v : vitesse linéaire du robot.

ω : vitesse angulaire du robot.

L : La distance entre la roue et le centre du robot.

Ce modèle cinématique peut être décrit par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos(\theta) \\ \dot{y} = v \sin(\theta) \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (2.4)$$

Donc le modèle cinématique du robot unicycle est :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Ces équations relient la dérivée de la position (x, y, θ) du robot à la commande $u = (v, \omega)$ avec θ rotation instantanée du robot par rapport au repère (O, X, Y) . De ce fait la position du robot est donnée par :

$$\begin{cases} x(t) = \int_0^t v(t) \cos \theta dt \\ y(t) = \int_0^t v(t) \sin \theta dt \\ \theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt \end{cases} \quad (2.6)$$

Pour décrire le mouvement d'un robot mobile, les vitesses angulaires des roues droite et gauche, notées ω_D et ω_G , respectivement, ainsi que la vitesse angulaire du centre de gravité du robot ω , sont nécessaires. Ces informations permettent de calculer la longueur de parcouru par le robot. (Fig.2.11).

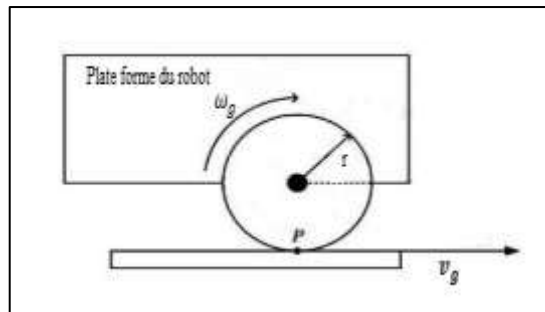


Figure 2.11 : Vue latérale du robot mobile. [15]

Calculer la longueur de parcouru :

$$v_D = r \cdot \omega_D \quad , \quad v_G = r \cdot \omega_g \quad (2.7)$$

La vitesse linéaire v et la vitesse angulaire ω sont exprimés comme

$$v = \frac{v_D + v_G}{2} \quad , \quad \omega = \frac{v_D - v_G}{2L} \quad (2.8)$$

En combinant (2.7) avec (2.8), nous obtenons :

$$v = \frac{r}{2} (\omega_D + \omega_G) \quad , \quad \omega = \frac{r}{2L} (\omega_D - \omega_G) \quad (2.9)$$

Nous pouvons exprimer le modèle cinématique du robot unicycle comme :

$$\begin{cases} x(t) = \int_0^t \frac{r}{2} (\omega_D + \omega_G) \cos \theta dt \\ y(t) = \int_0^t \frac{r}{2} (\omega_D + \omega_G) \sin \theta dt \\ \theta(t) = \int_0^t \frac{r}{2L} (\omega_D - \omega_G) dt \end{cases} \quad (2.10)$$

2.6 Contrôlabilité d'un robot unicycle

Il convient de souligner que le modèle du robot unicycle est en effet considéré comme contrôlable. Soit le modèle cinématique d'un robot unicycle :

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = [g_1 \ g_2] \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Sachant que $[g_1, g_2]$ représente le crochet LIE :

$$[g_1, g_2] = \frac{\partial g_2}{\partial X} g_1 - \frac{\partial g_1}{\partial X} g_2 \quad (2.12)$$

$$[g_1, g_2] = - \begin{bmatrix} \frac{\partial g_2}{\partial x} & \frac{\partial g_2}{\partial y} & \frac{\partial g_2}{\partial \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x} & \frac{\partial g_1}{\partial y} & \frac{\partial g_1}{\partial \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$[g_1, g_2] = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\det[g_1 \ g_2 \ [g_1, g_2]] = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = 1 \neq 0 \quad (2.15)$$

$$\text{rang}[g_1 \ g_2 \ [g_1, g_2]] = 3 \quad (2.16)$$

D'après le théorème de CHOW, le robot mobile unicycle est contrôlable ^[16], ce qui permet d'affirmer que le système donné peut être contrôlé pour atteindre tout état souhaité.

2.7 Problèmes de commande

Les problèmes de commande d'un système non-holonome, tel que le robot mobile unicycle, ne dépend pas seulement de sa nature non-holonome, mais également de l'objectif de la commande :

2.7.1 Suivi de chemin

Les véhicules autonomes doivent être capables de suivre une trajectoire précise pour naviguer sur la route de manière sûre et efficace. Le suivi de chemin est un problème de commande important dans la robotique mobile, qui consiste à contrôler le mouvement d'un robot pour qu'il suive une trajectoire prédéfinie. ^[17]

2.7.2 Stabilisation de trajectoires

La stabilisation de la trajectoire est un autre problème de contrôle pour les robots mobiles. Il s'agit de contrôler le mouvement du robot pour qu'il suive une trajectoire prédéfinie tout en conservant sa stabilité. Ce problème est difficile car le robot doit être contrôlé avec précision pour suivre une trajectoire souhaitée tout en faisant face à des perturbations extérieures pouvant affecter sa stabilité. ^[17]

2.7.3 Stabilisation de configurations fixes

La stabilisation de configurations fixes est un problème de commande important dans la robotique. Il consiste à contrôler les mouvements d'un robot pour qu'il atteigne une configuration fixe désirée et maintienne cette configuration sous l'influence de perturbations extérieures. ^[17]

2.8 Conclusion

Ce chapitre fournit une présentation générale sur les robots mobiles. Nous avons résumé une partie des notions de base nécessaires à la compréhension du domaine de la robotique mobile. Après avoir fait une approche avec le monde de la robotique mobile, nous allons nous intéresser à l'aspect de la commande dans les chapitres suivants.

Chapitre 3

Navigation de robot mobile

3.1 Introduction

La navigation est une étape très essentielle pour réaliser un robot fonctionnel, qui peut aller d'un point vers un autre sans aucune intervention humaine.

Dans ce chapitre, nous allons étudier quelques algorithmes de contrôle de robot mobile, et puis établir un algorithme de commande pour notre application : le contrôle d'un robot bicyclette (robot unicycle et une remorque).

3.2 Robot « bicyclette »

C'est un robot qui est constitué d'un robot mobile autonome unicycle actionné par deux roues, et d'une remorque, similaire à une bicyclette, en ajoutant des capteurs comme les encodeurs, les gyroscopes, pour la mesure de la vitesse et l'orientation, tout ça est piloté par un système de contrôle pour ajuster le mouvement et la stabilité d'unicycle, ce qui permet de contrôler le robot dans son ensemble.



Figure 3. 1 : Exemple d'un robot sous la forme d'une bicyclette « CIMAT_robot »

- ⇒ Le robot bicyclette peut effectuer des opérations complexes comme le mouvement avant et arrière, des cercles, des huit...
- ⇒ Le robot à bicyclette peut être équipé avec d'autres applications comme la vision par ordinateur, l'apprentissage automatique
- ⇒ On peut l'associer aussi d'autres types des capteurs comme les caméras, LIDAR, les capteurs ultrasons... pour l'aider à détecter les obstacles et naviguer dans des environnements plus complexes.

- ⇒ Son système de contrôle consiste à ajuster la vitesse et l'orientation de l'unicycle pour établir un mouvement désiré, on peut trouver plusieurs algorithmes de contrôle, comme : l'algorithme de rétroaction, MPC...
- ⇒ L'algorithme de contrôle souvent utilisé avec ce type de robot est le CIR (Contrôle Indépendant des Roues).
- ⇒ En conclusion, le robot à bicyclette est un robot mobile très performant utilisé dans plusieurs applications, car il peut s'adapter et offrir une performance stable dans des situations complexes.

3.3 La navigation

D'après Levitt et Lawton (1990), la navigation est définie comme le procédé permettant de répondre aux trois questions suivantes :

- "Où suis-je ?".
- "Où sont les autres lieux par rapport à moi ?".
- "Comment puis-je atteindre ces autres lieux depuis l'endroit où je me trouve ?"

Donc, la navigation est un ensemble de techniques qui permettent de :

- ⇒ Connaître la position (coordonnées) d'un mobile par rapport à un système de référence, ou par rapport à un point fixe déterminé.
- ⇒ Calculer ou mesurer la route à suivre pour rejoindre un autre point de coordonnées connues en respectant un certain nombre de contraintes et de critères qui découlent de plusieurs facteurs, qui dépendent généralement des caractéristiques du robot, de l'environnement, et du type de tâche à exécuter.
- ⇒ Calculer toute autre information relative au déplacement de ce mobile (distance et durée, vitesse de déplacement, heure estimée d'arrivée, etc.) ^[18]

Elle est composée de deux facteurs :

3.3.1 La localisation

La méthode de localisation relative, également appelée "localisation à l'estime". Elle est utilisée pour déterminer la position actuelle d'un robot mobile en fonction des positions précédentes et pour mesurer ses mouvements. Les informations utilisées sont fournies par des capteurs proprioceptifs. Une méthode très reconnue : c'est l'odométrie.

L'odométrie

C'est une technique de localisation très utilisée pour estimer la position et l'orientation d'un robot mobile à roues en utilisant ses capteurs de mouvements comme les encodeurs des roues.

L'odométrie repose sur la mesure individuelle des déplacements de chaque roue pour reconstruire le mouvement global du robot. En partant d'une position initiale connue et en intégrant les déplacements mesurés, on peut ainsi calculer à chaque instant la position courante du véhicule. ^[19]

3.3.2 Le suivi de trajectoire

Pour améliorer les performances d'un robot mobile, il est très important de lui faire connaître sa trajectoire, pour assurer qu'il maintient sa performance constante et soit prêt à faire ses tâches sans erreurs, en assurant sa sécurité et son autonomie.

Pour cela, les automaticiens utilisent plusieurs méthodes d'apprentissage comme MPC, la guidance manuelle, ou bien les algorithmes d'apprentissage, le plus connu est l'algorithme de PURE POURSUITE.

Pure Poursuite

Pour le suivi de trajectoire en robotique, l'algorithme de pure poursuite est une méthode simple qui donne des résultats très intéressants dans le guidage du robot le long d'une trajectoire désirée.

La poursuite pure est un algorithme de suivi de chemin, qui fonctionne en ajustant l'orientation et la vitesse pour arriver à des points placés dans une trajectoire désirée.

3.4 L'algorithme de commande du robot utilisé

La commande d'un robot consiste à trouver des contrôleurs qui assurent que la rotation et la vitesse longitudinale actuelles établissent un mouvement sur le chemin désiré en maintenant la stabilité de système.

3.4.1 Le contrôleur de suivi de trajectoire

Le contrôleur développé se base sur la théorie de suivi des trajectoires, il se décompose en 4 étapes distinctes :

a. La localisation de point désiré pour l'instant $t+1$

Le point désiré est le point le plus proche de la position actuelle sur la trajectoire désirée.

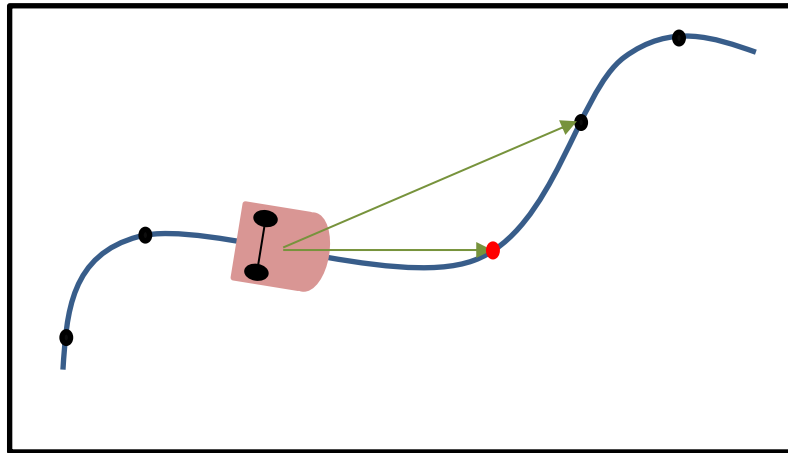


Figure 3. 2 : Le point désiré

b. La prédiction de mouvement de l'instant t à $t+1$

Le mouvement de robot s'effectue de la manière suivante : le mouvement en rotation puis la translation rectiligne.

Une rotation est un mouvement circulaire d'un objet autour d'un centre (ou point) de rotation. ^[20]

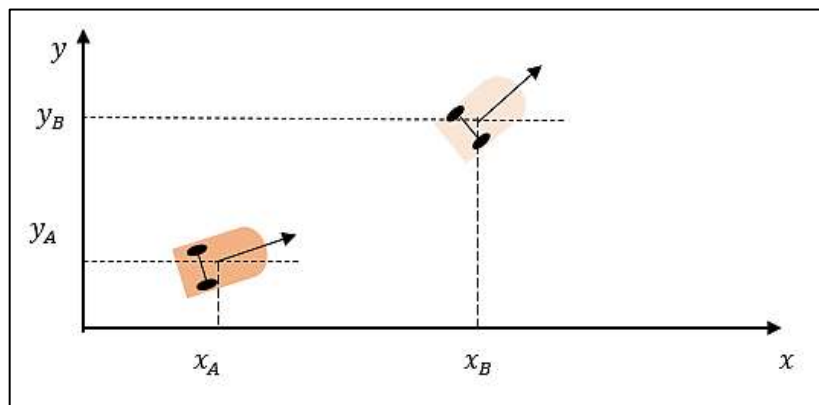


Figure 3. 3 : Le mouvement en rotation

Un **mouvement rectiligne** est le mouvement d'un objet qui se déplace le long d'une ligne droite. ^[21]

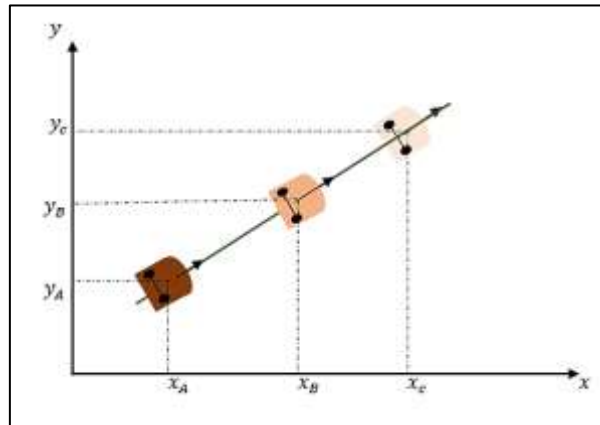


Figure 3. 4 : Mouvement rectiligne

⇒ Le mouvement d'un robot :

Le mouvement d'un robot non holonome est considéré comme étant une transformation entre 2 repères, c'est la combinaison entre une translation et une rotation.

Le passage d'un point P^A vers un point P^B veut dire que le robot change son repère (repère A en repère B) et effectue une translation d'une distance $[AB]$.

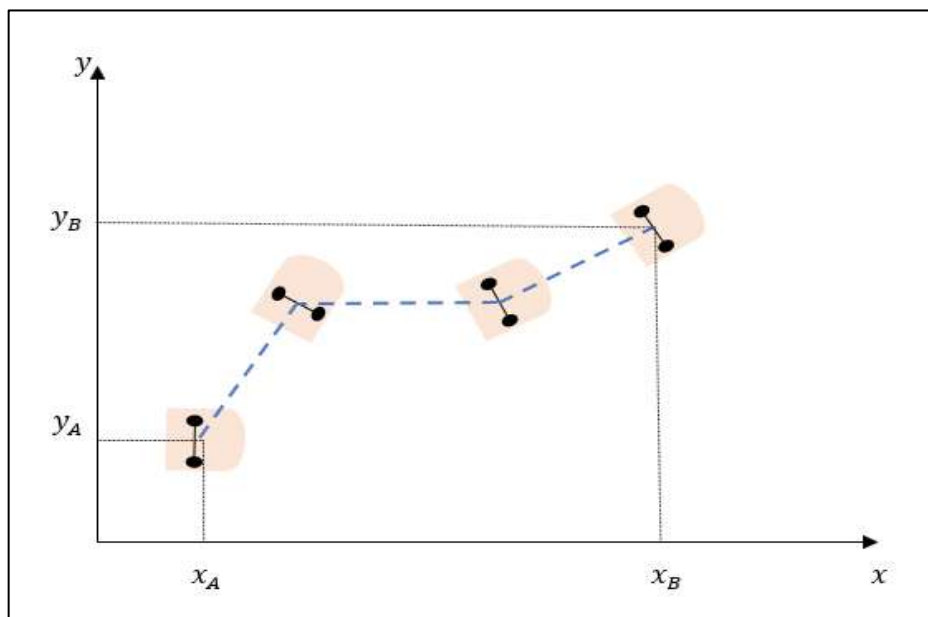


Figure 3. 5 : Mouvement du robot

c. Control des mouvements

Nous voulons étudier le mouvement d'un robot mobile de type unicycle lors de son passage d'un point à un autre, en calculant les vitesses linéaire et angulaire du robot.

Pour cela, la solution proposée est de minimiser l'erreur entre la position actuelle du véhicule et le point P sur la trajectoire en jouant sur la vitesse et l'angle de rotation selon une loi de commande.

La figure suivante décrit le passage d'une configuration initiale $[x_i, y_i, \theta]$ vers une nouvelle configuration $[x_d, y_d, \beta]$:

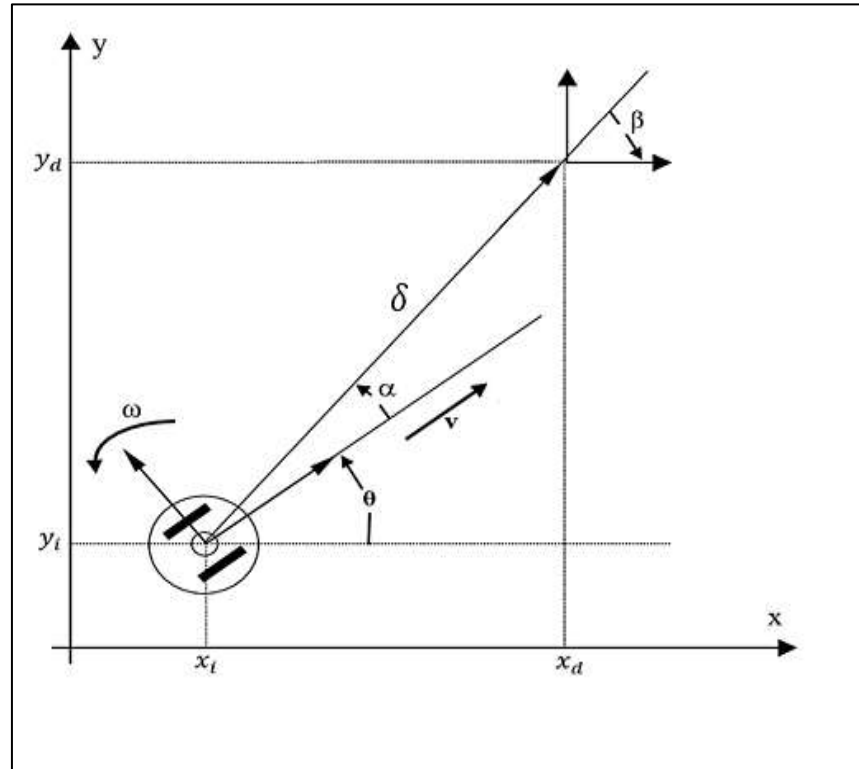


Figure 3. 6: Le modèle représenté par ses coordonnées polaires

Avec :

- θ : l'orientation de robot à la position initiale.
- β : l'orientation de robot à la position finale, elle est donnée par la formule suivante :

$$\beta = \arctan\left(\frac{y_d}{x_d}\right) \quad (3.1)$$

- α : l'orientation à régler pour arriver à l'orientation finale, elle est donnée par la formule suivante :

$$\alpha = -\beta - \theta \quad (3.2)$$

- δ : la distance entre la position initiale de robot et sa position finale, le but c'est de minimiser cette distance, elle est donnée par la formule suivante :

$$\delta = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.3)$$

- Afin d'atteindre l'orientation finale, nous proposons une loi de commande qui puisse ajuster l'angle alpha tout en tenant en compte de l'orientation finale beta, pour cela

On définit la loi suivante :

$$\Omega = k_\alpha * \alpha + k_\beta * \beta \quad (3.4)$$

- Concernant le déplacement linéaire du robot, nous proposons une loi de commande sous la forme suivante. Cette dernière est proportionnelle à la distance :

$$v = k_\delta * \delta \quad (3.5)$$

Avec : k_α , k_δ et k_β sont des gains de réglage.

Conditions sur les paramètres de réglage

- En veut varier les fonctions δ , α , β pour faire en sorte que le robot puisse faire des mouvements avec l'orientation désirée :

⇒ La variation de δ :

Dans la figure suivante, on peut observer comment on peut obtenir la variation $\dot{\delta}$:

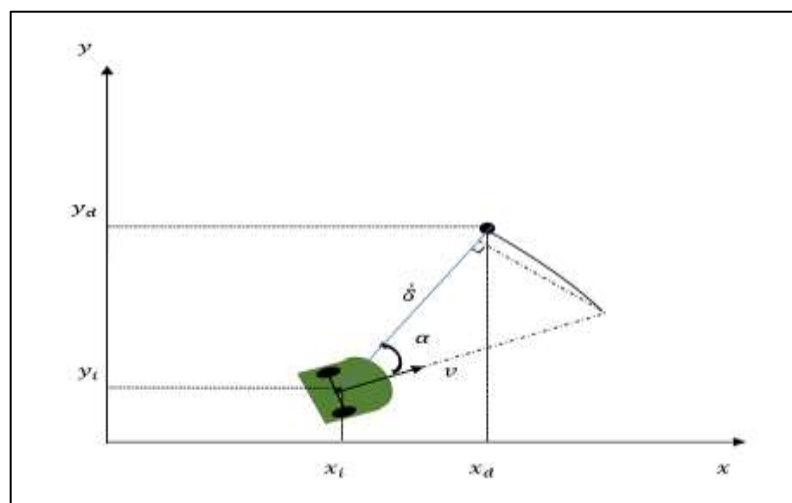


Figure 3.7 : La variation $\dot{\delta}$

De là, $\dot{\delta}$ est donnée par la formule suivante :

$$\dot{\delta} = -v \cdot \cos \alpha \quad (3.6)$$

Le signe (-) est pour représenter la diminution de cette variation qui est nécessaire pour se rapprocher au point désiré.

⇒ La variation de β :

Dans la figure suivante, on peut observer comment on peut obtenir la variation $\dot{\beta}$:

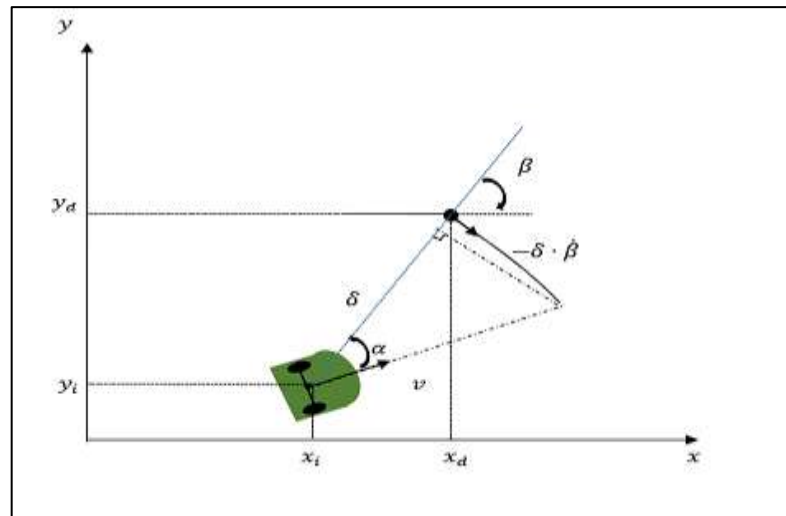


Figure 3. 8 : La variation $\dot{\beta}$

On a :

$$-\delta \cdot \dot{\beta} = v \cdot \sin \alpha \quad (3.7)$$

$$\dot{\beta} = -\frac{v}{\delta} \cdot \sin \alpha$$

⇒ La variation de α :

On peut calculer la variation $\dot{\alpha}$ à partir de l'équation (3.13) :

$$\alpha = -\beta - \theta \quad (3.8)$$

$$\dot{\alpha} = -\dot{\beta} - \dot{\theta} \quad (3.9)$$

On sait que :

$\dot{\theta}$: Représente la vitesse angulaire Ω

$\dot{\alpha}$ est donnée par la formule suivante :

$$\dot{\alpha} = +\frac{v}{\delta} \cdot \sin \alpha - \Omega$$

En regroupant les équations obtenues :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\delta} = -v \cdot \cos \alpha \\ \dot{\beta} = \frac{-v}{\delta} \cdot \sin \alpha \\ \dot{\alpha} = -\dot{\beta} - \Omega = \frac{+v}{\delta} \cdot \sin \alpha - \Omega \end{array} \right\} \quad (3.10)$$

- En développant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\delta} = -k_{\delta} \delta \cos \alpha \\ \dot{\beta} = -k_{\delta} \sin \alpha \\ \dot{\alpha} = +k_{\delta} \sin \alpha - k_{\alpha} \alpha - k_{\beta} \beta \end{array} \right\} \quad (3.11)$$

- En posant : $\cos \alpha \approx 1$ et $\sin \alpha \approx \alpha$
- On peut obtenir le modèle d'état du système :

$$\begin{pmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -k_{\delta} & 0 & 0 \\ 0 & (+k_{\delta} - k_{\alpha}) & -k_{\beta} \\ 0 & -k_{\delta} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta \\ \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

- Pour trouver les gains appropriés pour notre étude, on veut s'assurer qu'il est stable, pour cela il faut que les valeurs propres < 0

- Calculons les valeurs propres :

$$(\lambda I - A) = \begin{pmatrix} \lambda + k_{\delta} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda - (+k_{\delta} - k_{\alpha}) & k_{\beta} \\ 0 & +k_{\delta} & \lambda \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

$$\det(\lambda I - A) = (\lambda + k_{\delta}) * \begin{pmatrix} \lambda - (+k_{\delta} - k_{\alpha}) & k_{\beta} \\ +k_{\delta} & \lambda \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

$$\det(\lambda I - A) = (\lambda + k_{\delta}) * (\lambda^2 - \lambda * (+k_{\delta} - k_{\alpha}) - k_{\beta} * k_{\delta}) \quad (3.15)$$

En résout l'équation, on trouve :

$$\begin{aligned} \text{➤ } \lambda_1 &= -k_{\delta} \\ \text{➤ } \lambda_2 &= -\frac{(+k_{\delta} - k_{\alpha})}{2} - \frac{\sqrt{(+k_{\delta} - k_{\alpha})^2 + 4 * k_{\beta} * k_{\delta}}}{2} \\ \text{➤ } \lambda_3 &= -\frac{(+k_{\delta} - k_{\alpha})}{2} + \frac{\sqrt{(+k_{\delta} - k_{\alpha})^2 + 4 * k_{\beta} * k_{\delta}}}{2} \end{aligned}$$

Pour que le système soit stable, il faut que :

- $\lambda_1 < 0 \rightarrow k_{\delta} > 0$

- $\lambda_2 < 0 \rightarrow k_\alpha < k_\delta \text{ car } -\frac{\sqrt{(+k_\delta - k_\alpha)^2 + 4 * k_\beta * k_\delta}}{2} < 0$
- $\lambda_3 < 0 \rightarrow -\frac{(+k_\delta - k_\alpha)}{2} > \frac{\sqrt{(+k_\delta - k_\alpha)^2 + 4 * k_\beta * k_\delta}}{2} \rightarrow 4 * k_\beta * k_\delta < 0 \quad k_\beta < 0$

⇒ Finalement, on constate que les paramètres de réglage sont soumis aux conditions suivantes :

- $k_\delta > 0$
- $k_\alpha < k_\delta$
- $k_\beta < 0$

La relation entre la vitesse des roues et la vitesse longitudinale/ de rotation

En sait que :

$$v = \frac{v_g + v_d}{2} \Rightarrow 2 * v = v_g + v_d \quad (3.16)$$

$$\Omega = \frac{v_g - v_d}{L} \Rightarrow \Omega * L = v_d - v_g \quad (3.17)$$

(3.12) +(3.13)

$$\Omega * L + 2 * V = 2 * v_d \quad (3.18)$$

Nous trouvons que :

$$v_g = \frac{2 * v - \Omega * L}{2} \quad (3.19)$$

$$v_d = \frac{2 * v + \Omega * L}{2} \quad (3.20)$$

⇒ Les vitesses des roues sont des vitesses de rotation :

⇒ On veut transformer les vitesses linéaires en vitesses de rotation :

⇒ On sait que :

$$\Omega * L + 2 * V = 2 * v_d \quad (3.21)$$

$$\Omega * L + 2 * V = 2 * v_d \quad (3.22)$$

$$\omega * r = v \rightarrow \omega = \frac{v}{r} \frac{[rad]}{[s]}$$

On obtient les vitesses des roues :

$$\omega_g = \frac{2 * v - \Omega * L}{2 * r}$$

$$\omega_d = \frac{2 * v + \Omega * L}{2 * r}$$

Avec :

L: Est la distance entre les deux roues.

v: Est la vitesse longitudinale.

Ω : Est la vitesse angulaire

r : Est le rayon de roue.

3.4.2 Le calcul de la nouvelle position

Après le passage, il est nécessaire de calculer la nouvelle position de robot. En comptant le nombre d'impulsions par unité de temps générées par le codeur, on peut mesurer la vitesse angulaire.

A- le calcul de la vitesse angulaire pour chaque roue

Vu que tous les points de la roue tournent avec la même vitesse, on choisit un point quelconque :

En posant que la roue tourne N révolutions /s.

Rappelons que :

La vitesse angulaire est définie comme étant un déplacement angulaire divisé par l'unité de temps, alors :

$$\Omega = \frac{\partial \theta}{\partial t} \text{ (rad /s)}$$

On sait qu'une révolution signifie le périmètre de la roue donc c'est $2 \times \pi$ (rad)

On peut trouver la vitesse angulaire pour chaque roue :

$$\omega'_g = N_g * 2 * \pi \text{ (rad /s)}$$

$$\omega'_d = N_d * 2 * \pi \text{ (rad /s)}$$

B- la nouvelle position :

Vu que le robot est un robot unicycle, nous utilisons la modélisation cinématique d'unicycle (chapitre 2) pour trouver la nouvelle configuration du robot.

3.5 La relation entre le robot et l'accessoire d'agriculture

Dans le domaine de robotique, il est très courant d'attacher divers accessoires ou outils à un robot pour effectuer plusieurs tâches comme les drones qui sont souvent équipés avec des caméras pour capturer les images, ou les bras robotiques équipés de divers effecteurs finaux tels que les pinces, des ventouses ... pour effectuer des tâches comme le soudage, l'assemblage....

Pour notre application on veut équiper le robot étudié précédemment avec un outil agricole, pour lui permettre d'exécuter des tâches comme la plantation, arrosage

- ⇒ Dans cette partie de chapitre, on va étudier l'influence de la rotation et la vitesse du robot sur la position de l'accessoire qui lui est attaché.
- En supposant que le robot se déplace avec une vitesse longitudinale variable $v(t)$ et une vitesse angulaire $\omega(t)$, et le robot est attaché avec un accessoire à une distance fixe D du centre de robot.

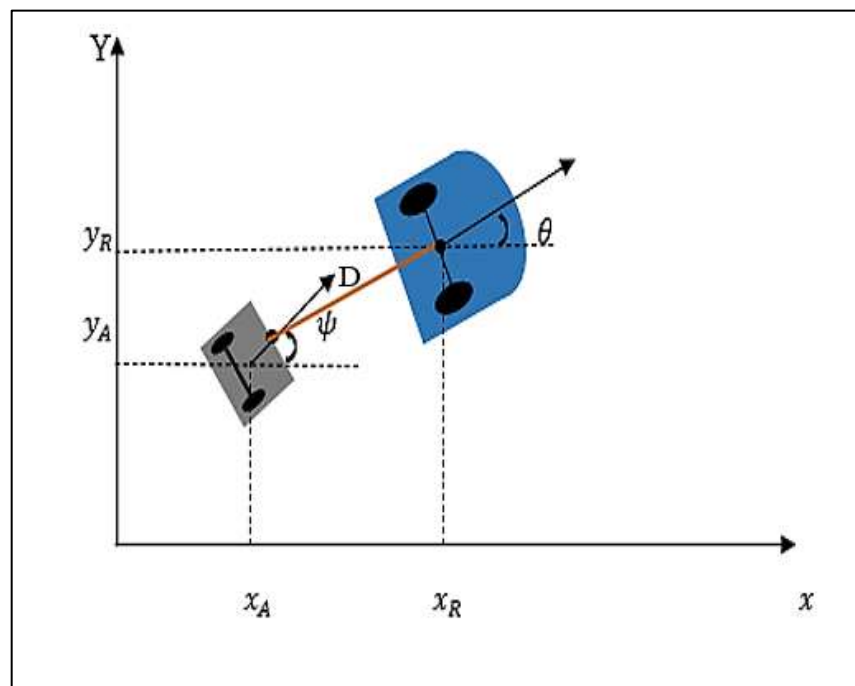


Figure 3. 9 : Robot unicycle + remorque

On constate que si le robot est sur la position $[x_r, y_r]$ avec une orientation θ alors la position et l'orientation de l'accessoire seront calculées en utilisant les équations suivantes :

⇒ L'orientation de l'accessoire (ψ) :

L'orientation de l'accessoire au moment t est égale à l'orientation du robot en retranchant l'angle ϕ entre le vecteur G et le centre de masse de robot.

⇒ On peut calculer l'angle ψ en utilisant la relation trigonométrique suivante :

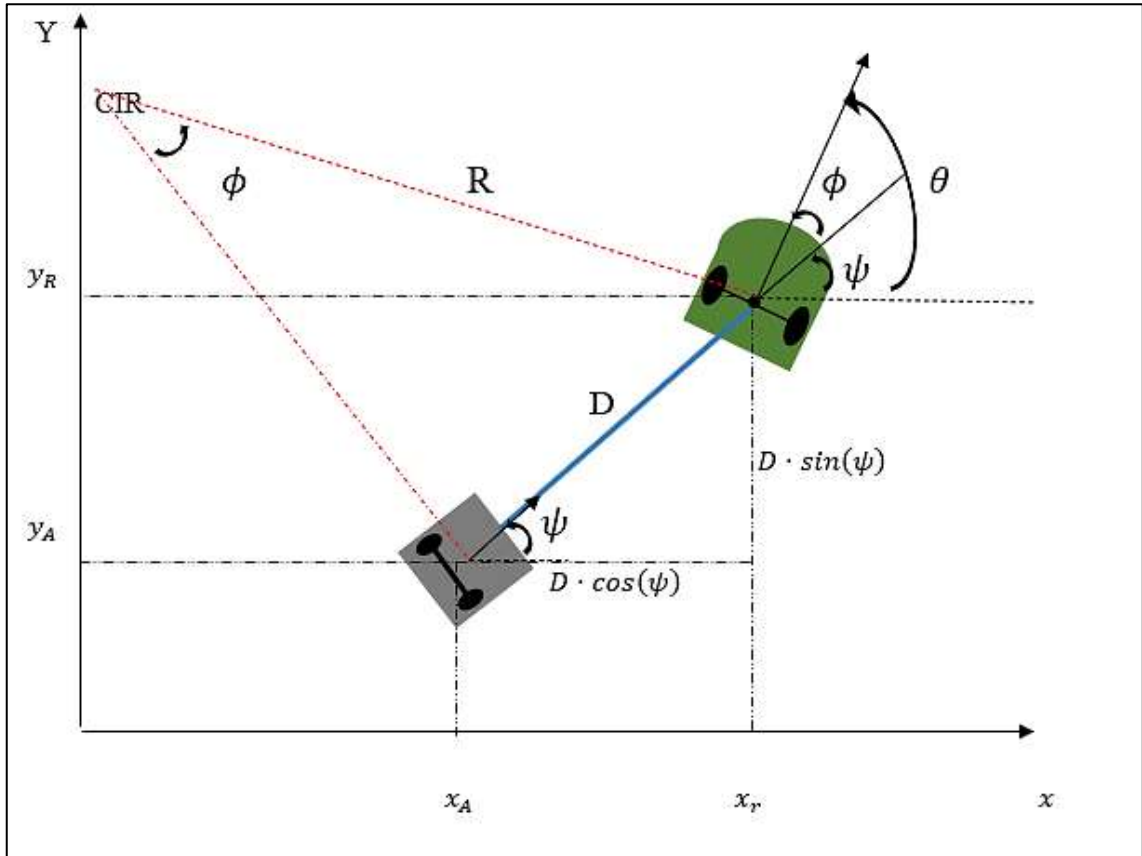


Figure 3. 10 : modèle cinématique de robot « bicyclette »

$$\theta = \phi + \psi \quad (3. 23)$$

$$\psi = \theta - \phi \quad (3. 24)$$

Nous pouvons ainsi calculer ϕ :

On a :

$$\sin(\phi) = D/R \quad (3. 25)$$

Et comme

$$v = \omega \cdot R \leftrightarrow R = \frac{v}{\omega} \quad (3. 26)$$

Et finalement on trouve que :

$$\sin(\varnothing) = \frac{D}{R} \leftrightarrow \sin(\varnothing) = \frac{D * v}{\omega} \quad (3.27)$$

$$\varnothing = \arcsin\left(\frac{D * v}{\omega}\right) \quad (3.28)$$

Et finalement on trouve que :

$$\psi = \theta - \arcsin\left(\frac{D * v}{\omega}\right)$$

⇒ Sur l'axe (x, y) : la position de l'accessoire au moment t est égale à la position de robot en retranchant le vecteur allant de centre de masse au point d'attachement.

⇒ Ce vecteur

⇒ A une magnitude L et fait un angle ψ , il est représenté par :

$$G = \begin{pmatrix} D * \cos(\psi) \\ D * \sin(\psi) \end{pmatrix}$$

Alors la position de l'accessoire est donnée par :

$$x_A = x_r - D * \cos(\psi)$$

$$y_A = y_r - D * \sin(\psi)$$

Après l'étude de la commande, on peut générer un algorithme pour le fonctionnement du robot.

3.6 Fonctionnement du robot

L'objectif est de créer un robot capable de naviguer de manière autonome dans des environnements variés.

L'algorithme suivant est conçu pour que le mouvement soit flexible, de telle sorte que le robot peut calculer les vitesses gauche et droite nécessaires afin de suivre un parcours prédéfini, et peut s'adapter aux conditions imprévues comme le changement de chemin.

Le robot « bicyclette » est constitué d'un unicycle et une remorque, le contrôleur développé agit uniquement sur l'unicycle pour contrôler ses vitesses. Ensuite, la remorque suit la trajectoire de l'unicycle.

- ⇒ Tout d'abord, le robot unicycle calcule sa position courante, en utilisant les données qu'il reçoit de la part de ses moteurs.
- ⇒ L'étape suivante, c'est de calculer la distance qu'il doit parcourir pour arriver à l'autre point, avec l'orientation désirée.
- ⇒ Ensuite, il doit bouger, donc il calcule la vitesse nécessaire et l'orientation qu'ils vont lui permettre de faire ce passage, et ajuste les vitesses de ses roues à partir de ça.
- ⇒ L'étape finale, c'est d'envoyer ces données aux moteurs gauche et droite.
- ⇒ Le passage est fait, et le robot est dans le point désiré, il cherche maintenant le prochain point.
- ⇒ L'algorithme fonctionne d'une manière répétitive, jusqu'à terminer le chemin.
- ⇒ La remorque suit la trajectoire de l'unicycle, en s'adaptant avec les contraintes en minimisant les oscillations et en évitant les angles indésirables comme $\frac{\pi}{2}$.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'algorithme de contrôle pour un robot mobile unicycle actionné par deux roues, en mettant en évidence les conditions pour qu'il soit stable et prêt à effectuer ses tâches sans erreurs. Ensuite, nous avons établi la relation entre le robot étudié et l'accessoire attaché à celui-ci, pour développer le robot de notre étude sous la forme d'une bicyclette (robot et une remorque).

Nous pouvons maintenant passer à la visualisation d'étude obtenue de la commande de robot en utilisant le logiciel de simulation : MATLAB (SIMULINK)

Chapitre 4

Simulation et interprétation

4.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur la simulation et l'interprétation des résultats. Nous commençons par le concept clé de la simulation. Ensuite, nous discutons du logiciel MATLAB utilisé pour élaborer la simulation. Ainsi, les différentes étapes du processus de simulation. Nous expliquons également chaque étape implémentée dans l'interface Simulink.

Dans la deuxième partie, nous présentons les résultats de la simulation pour différents types de trajectoires.

4.2 La simulation

Le modèle de simulation est proposé pour valider les algorithmes de contrôle. Il permet d'améliorer la compréhension d'un système sans devoir le manipuler réellement afin de minimiser le coût et le temps de la recherche et développement. Différents outils sont utilisés pour l'analyse des systèmes robotiques pour la programmation hors ligne comme le logiciel Matlab et son extension Simulink. ^[22]

4.3 Logiciel utilisé

MathWorks (s.d.) décrit MATLAB comme "Est une plateforme de programmation conçue spécifiquement pour les ingénieurs et les scientifiques afin d'analyser et de concevoir des systèmes et des produits qui transforment notre monde. Le cœur de MATLAB est le langage MATLAB, un langage matriciel permettant l'expression la plus naturelle des mathématiques computationnelles. "

MATLAB offre une large gamme de fonctionnalités dans des secteurs tels que les systèmes de contrôle, le traitement du signal, l'automatisation des tests, les systèmes de télécommunication et la robotique. ^[23]

Il est utilisé pour concevoir, simuler et vérifier chaque aspect des systèmes autonomes et de la perception du mouvement. Cependant, il s'agit d'un langage interprété, ce qui peut entraîner des performances lentes, et de mauvaises instructions de programmation peuvent contribuer à ralentir le logiciel.

4.4 Les étapes d'élaboration de la simulation

4.4.1 Modélisation du Moteur à Courant Continu (CC)

Le robot unicycle est propulsé par deux moteurs à courant continu. Le fonctionnement électrique et mécanique du moteur à courant continu est présenté dans la Figure 4.2, et ce modèle sera ensuite intégré au modèle cinématique du robot. [22]

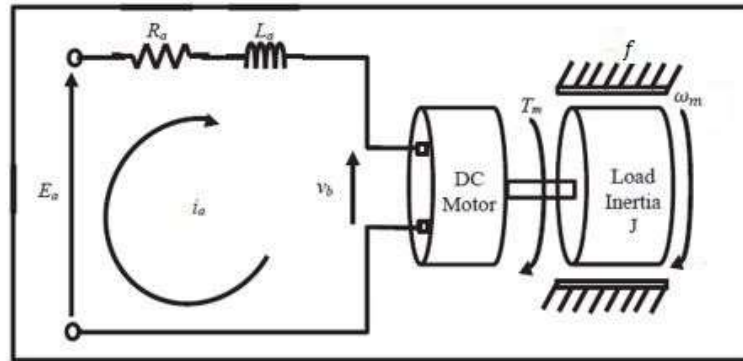


Figure 4. 1 : Schéma d'un moteur à courant continu [22]

E_a : Tension aux bornes de l'induit

v_b : Tension de la force électromotrice (f.e.m.)

i_a : Courant d'armature

R_a : Résistance du bobinage de l'induit

L_a : Inductance dans le bobinage du moteur

J : Moment d'inertie

f : Frottement visqueux

T_m : Couple du moteur

ω_m : Vitesse angulaire du moteur

Le modèle de base d'un moteur à courant continu donné dans les équations différentielles suivantes :

$$E_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + v_b \quad (4.1)$$

$$T_m = J \frac{d\omega_m}{dt} + f \omega_m$$

Où :

$$v_b = K \omega_m \quad (4.2)$$

$$T_m = K i_a \quad (4.3)$$

En prenant la transformée de Laplace des équations ci-dessus, on obtient les équations suivantes :

$$E_a = R_a I_a(s) + s L_a I_a(s) + K \omega_m(s) \quad (4.4)$$

$$K I_a(s) = J s \omega_m(s) + f \omega_m(s) \quad (4.5)$$

A partir de l'équation (4.5), on trouve :

$$I_a = \frac{J s \omega_m(s)}{K} + \frac{f \omega_m(s)}{K} \quad (4.6)$$

On remplace I_a dans l'équation (4.4)

$$E_a = R_a \left(\frac{J s \omega_m(s)}{K} + \frac{f \omega_m(s)}{K} \right) + s L_a \left(\frac{J s \omega_m(s)}{K} + \frac{f \omega_m(s)}{K} \right) + K \omega_m(s) \quad (4.7)$$

$$E_a = \omega_m(s) \left[R_a \left(\frac{J s}{K} + \frac{f}{K} \right) + s L_a \left(\frac{J s}{K} + \frac{f}{K} \right) + K \right] \quad (4.8)$$

$$E_a = \omega_m(s) \left[R_a \left(\frac{J s}{K} \right) + R_a \left(\frac{f}{K} \right) + s L_a \left(\frac{J s}{K} \right) + s L_a \left(\frac{f}{K} \right) + K \right] \quad (4.9)$$

$$E_a = \omega_m(s) \left(\frac{K^2 + (R_a + s L_a)(f + s J)}{K} \right) \quad (4.10)$$

La principale fonction de transfert entre la tension appliquée et la vitesse angulaire est donnée dans l'expression suivante :

$$\frac{\omega_m(s)}{E_a} = \frac{K}{K^2 + (R_a + s L_a)(f + s J)} \quad (4.11)$$

$$\frac{\omega_m(s)}{E_a} = \frac{\frac{K}{(K^2 + R_a f)}}{1 + \left(\frac{R_a J + L_a f}{K^2 + R_a f} \right) s + \left(\frac{L_a J}{K^2 + R_a f} \right) s^2} \quad (4.12)$$

$$\frac{\omega_m(s)}{E_a} = \frac{H_0}{1 + 2 m \tau_0 s + \tau_0^2 s^2} \quad (4.13)$$

Où :

$$H_0 = \frac{K}{(K^2 + R_a f)}, \quad m = \frac{R_a J + L_a f}{2 \sqrt{J L_a (K^2 + R_a f)}}, \quad \tau_0 = \sqrt{\frac{L_a J}{K^2 + R_a f}}$$

En utilisant les paramètres indiqués dans le tableau 4.1 et en les remplaçant dans l'équation correspondante, nous obtenons les valeurs suivantes :

$$H_0 = 1.5732, \quad m = 0.0081, \quad \tau_0 = 7.8567$$

Ce qui nous donne :

$$\frac{\omega_m(s)}{E_a} = \frac{1.5732}{1 + (0.1272)s + (6.5526 \cdot 10^{-5})s^2} \quad (4.14)$$

L’instruction « c2d » de Matlab permet de convertir cette fonction de transfert continue en une fonction de transfert discrète avec un temps d’échantillonnage de 0.001 seconde. L’équation obtenue après la conversion est :

$$G(z) = \frac{0.006904 z^2 + 0.0036771}{z^2 - 1.137 z + 0.1435} \quad (4.15)$$

L’équation (4.15) est utilisée pour implémenter les moteurs à courant continu de chaque roue dans Matlab Simulink.

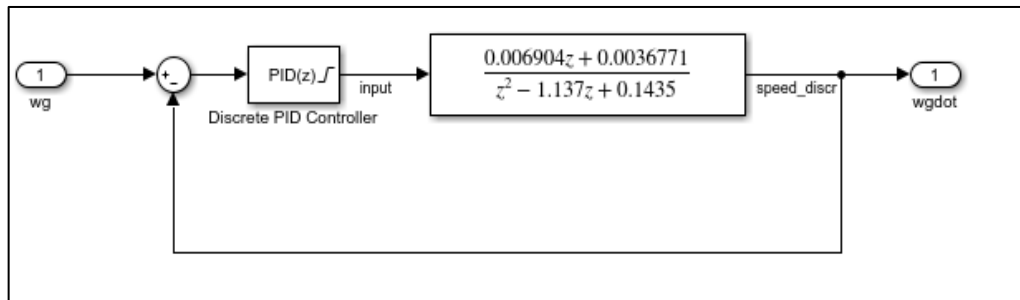


Figure 4. 2 : Le schéma bloc fonctionnel de moteur courant continue

Les paramètres physiques de l’actionneur sont indiqués dans le tableau 4.1 ci-dessous :

Paramètre	Description	Valeur	Unité
R_a	Résistance du bobinage de l’induit	41	Ω
L_a	Inductance dans le bobinage du moteur	0.021159	H
J	Moment d’inertie	0.0006998	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$
K	Constante de couple	0.3555	$\text{N} \cdot \text{m} / \text{A}$
f	Frottement visqueux	0.0024291	$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}$

Tableau 4. 1 : Paramètres physiques de l’actionneur utilisé

4.4.2 Commande du moteur CC

Etant donné que notre robot est mis en mouvement par l’intermédiaire de deux moteurs à courant continu, commander ce robot revient à commander les deux moteurs dont est muni le robot. Nous avons utilisé un contrôleur de type PID discret disponible dans la bibliothèque de l’environnement Simulink. Ce dernier offre la possibilité d’optimiser les gains du contrôleur d’une manière automatique. La figure (Fig.4.3) montre la réponse du moteur en boucle fermée

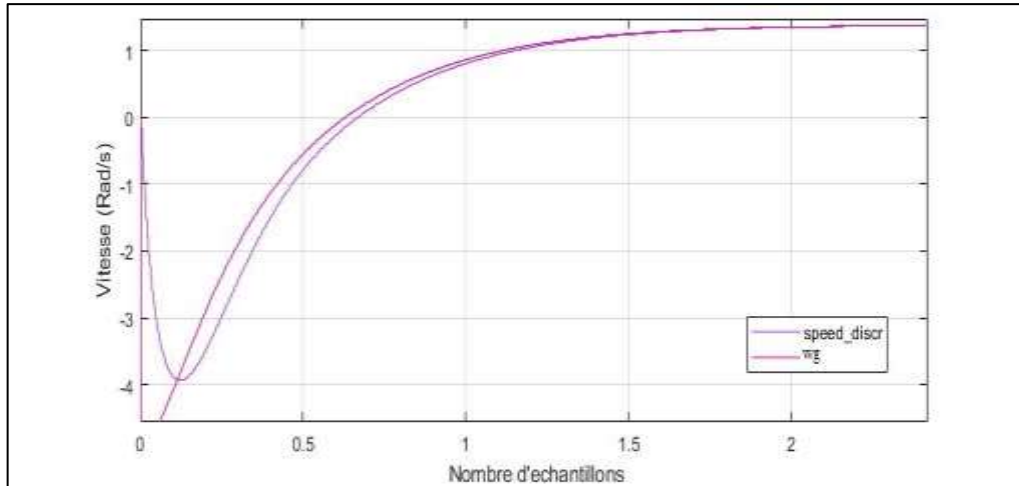


Figure 4. 3 : La réponse du moteur

Les paramètres du contrôleur obtenus sont donnés par :

$$K_p = 1.46307298750597$$

$$K_i = 14.8514657713175$$

$$K_d = 0.0137203694003471$$

Le modèle cinématique du robot unicycle, représenté par le système d'équation (2.6) est donné sous forme Simulink dans la figure 4.4.

Rappel :

$$\begin{cases} x(t) = \int_0^t \frac{r}{2} (\omega_D + \omega_G) \cos \theta dt \\ y(t) = \int_0^t \frac{r}{2} (\omega_D + \omega_G) \sin \theta dt \\ \theta(t) = \int_0^t \frac{r}{2L} (\omega_D - \omega_G) dt \end{cases} \quad (2.6)$$

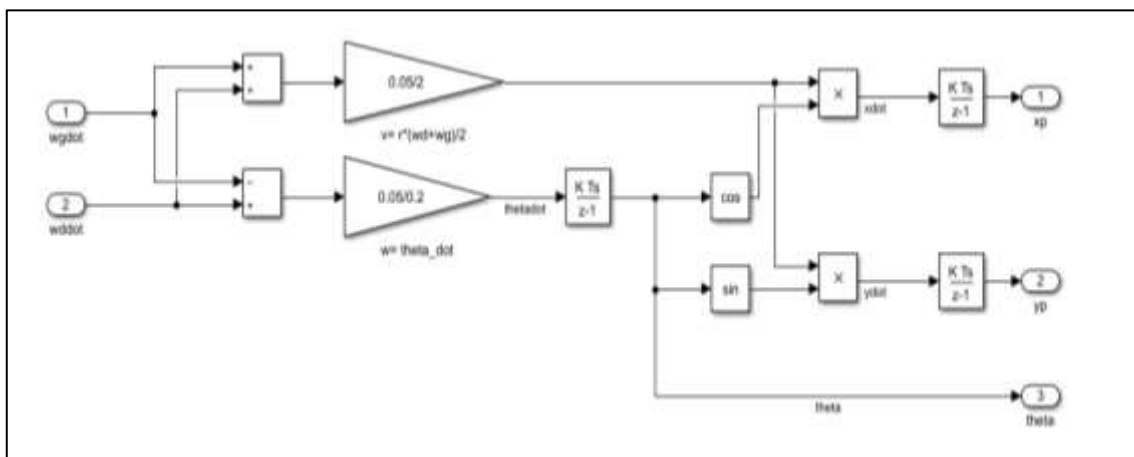


Figure 4. 4 : Le schéma fonctionnel Simulink du modèle cinématique

Nous avons maintenant obtenu un système complet sous la forme du schéma bloc fonctionnel ci-dessous :

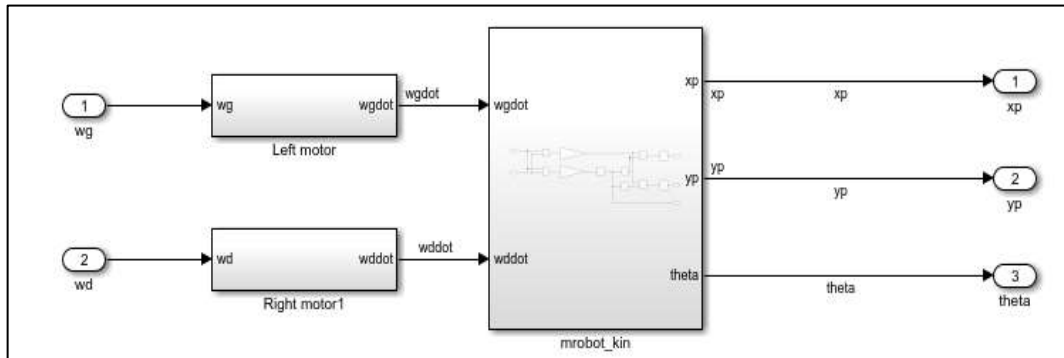


Figure 4. 5 : Schéma Simulink du modèle cinématique avec moteur courant continue

4.4.3 La génération de trajectoire

Lors de la génération de la trajectoire du robot, il est souvent nécessaire de sélectionner un certain nombre de points clés qui serviront de référence pour la trajectoire.

Une fois que les points de référence ont été sélectionnés, l'algorithme de génération utilise ces points pour créer une trajectoire continue en les reliant entre eux.

4.4.4 Le contrôleur du suivi de trajectoire

C'est un algorithme, qui calcule les paramètres nécessaires pour le passage correcte de robot d'un point vers un autre.

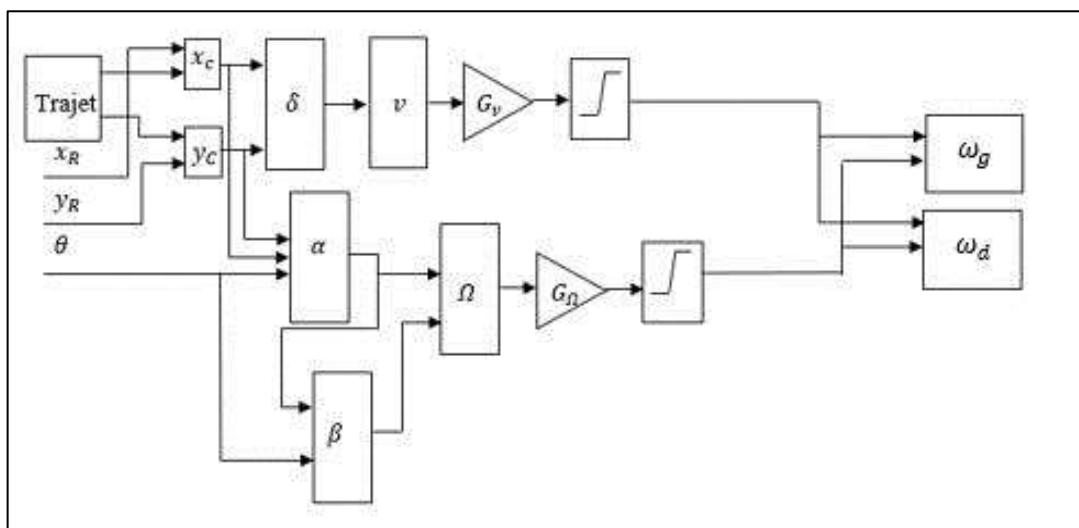


Figure 4. 6 : Contrôleur des mouvements

L'algorithme commence par l'acquisition des données reçues par les encodeurs des roues, pour déterminer la position et l'orientation actuelles de robot $[x_c; y_c; \theta]$.

- La position actuelle va être traitée pour calculer la distance qu'il doit parcourir pour arriver au prochain point, et son orientation désirée.
- Ensuite, il va continuer à calculer les vitesses longitudinale et angulaire pour atteindre la position désirée.
- Les vitesses des roues se calculent à base de la vitesse linéaire et angulaire, cela sera transmis aux moteurs (gauche et droit).
- Lorsque le robot atteint le point désiré, il va commencer à chercher le point le plus proche suivant.

Le processus de contrôle de suivi de trajectoire se répète continuellement, avec les données de la position mises à jour à chaque étape, jusqu'à ce que le robot termine son chemin.

4.5 Le programme global

A la suite de l'étude présentée dans le 3ème chapitre, nous voulons évaluer la précision et les résultats de l'algorithme développé. L'algorithme était développé pour contrôler le mouvement du robot le long de d'un chemin donné. Une fois que la trajectoire est planifiée, le contrôleur génère des vitesses de consigne qui sont ensuite transmises aux encodeurs des moteurs du robot, pour régler ces vitesses, nous utilisons un PID avancé qui ajuste les vitesses des moteurs en fonction des erreurs de position.

La figure suivante présente l'algorithme :

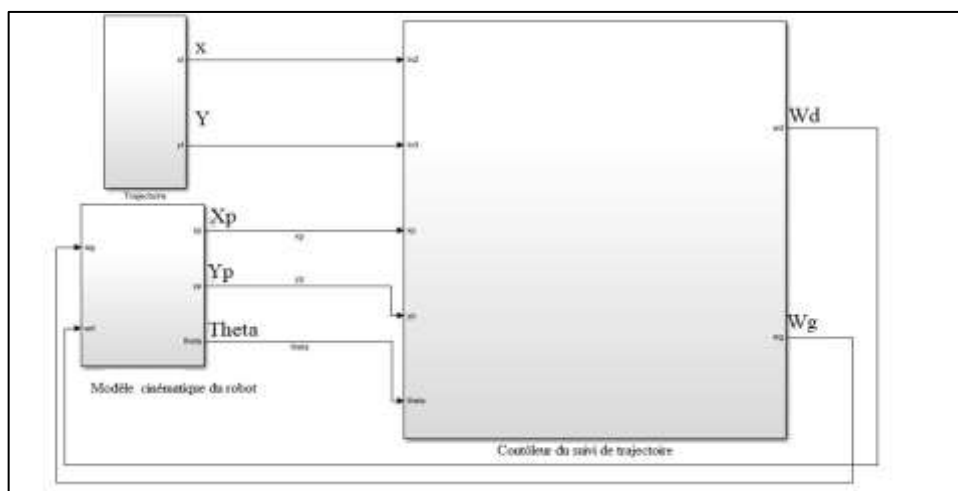


Figure 4. 7 : Fonctionnement de robot

⇒ Lors de la simulation, nous avons rencontré des difficultés. Nous avons observé que le robot n'était pas suffisamment performant, présentant des déviations et n'étant pas capable de suivre tous les points donnés

⇒ Pour résoudre ces problèmes nous avons ajouté :

- Une condition d'arrêt : au niveau de δ pour garantir que la position finale sera sur le chemin désirée, le robot va se préparer à terminer son mouvement avant 0.1 m de la position finale.
- Régulateur P : au niveau de δ pour minimiser l'écart entre le chemin de robot et le chemin désiré.
- Gains pour les vitesses : pour rendre le mouvement de robot plus souple et flexible en lui permettent de s'adapter aux variations de vitesse et direction et en minimisant les vibrations indésirables.
- La saturation des vitesses : pour contrôler le comportement du robot, et l'empêcher de se déplacer trop rapidement, ce qui pourrait le faire dévier de sa trajectoire.
- Ajustements des gains : ces ajustements ont permis d'améliorer les performances de robot et de réduire les déviations.
 - Le gain pour la vitesse longitudinale k_δ : pour minimiser la vitesse jusqu'à l'arrivée, il est nécessaire d'utiliser un gain approprié pour obtenir une réponse rapide et plus précise, en minimisant les erreurs de suivi de trajectoire.
 - Les gains de la vitesse de rotation k_α et k_β : pour varier la rotation du robot, et l'aider à approcher à la rotation désirée, en minimisant les oscillations.

4.6 Tests et résultats

Dans cette section, nous présentons quelques exemples d'expérimentations que nous avons réalisées pour différentes trajectoires afin de mieux comprendre les avantages et les défauts de la loi de commande développée. Les valeurs de contrôleur de la commande qui nous ont permis d'atteindre les performances cibles sont :

K_e	K_a	K_b	$gain_v$	$gain_w$	K_p
0.5	2	-0.1	4.5	2	1.1

4.5.1 Trajectoire droite

Le premier cas du test présente une simple trajectoire désirée $y = x$. Ce test est pour évaluer la fonctionnalité de base de l'algorithme de contrôle du robot.

La position et l'orientation initiales du robot sur le plan sont :

$$x_p = 0, y_p = 0 \text{ et } \theta = 0$$

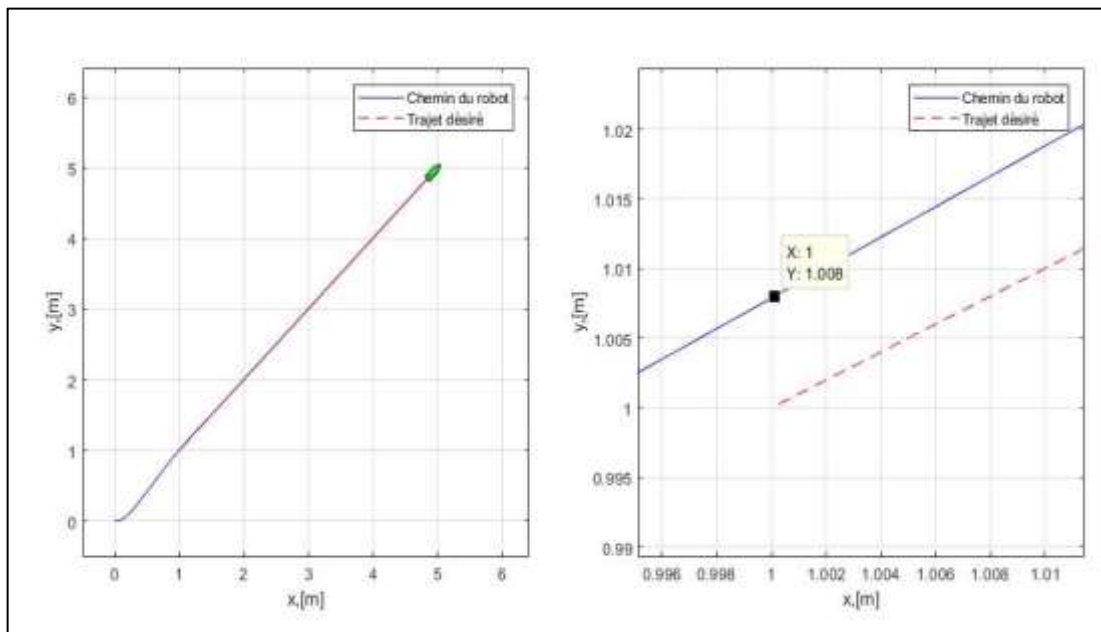


Figure 4. 8 : Erreur entre le chemin du robot par rapport au trajet droit désiré

Le graphe de la figure (4.8) représente l'erreur entre le chemin du robot et la trajectoire droite. On peut voir que le robot suit approximativement le trajet désiré, mais il y a un écart de 0.008m.

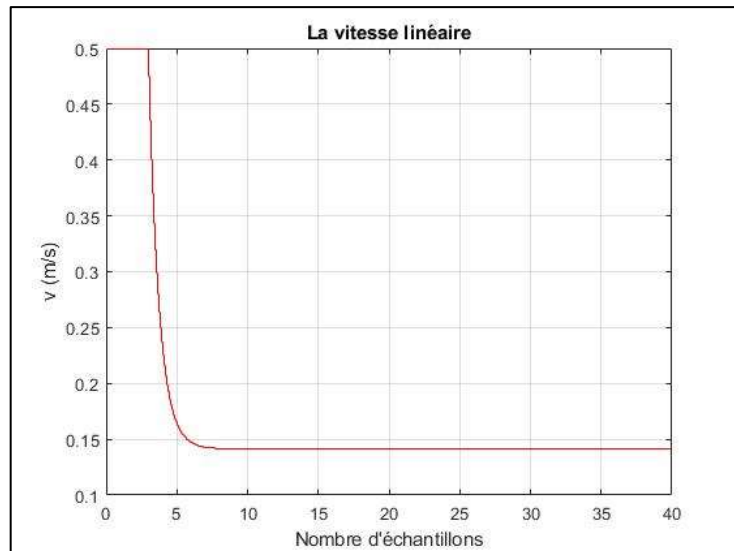


Figure 4. 9 : Variation de la vitesse linéaires V (m/s) pour une trajectoire droite

En examinant le graphe de la figure (Fig.4.9), on peut voir que la vitesse linéaire du robot varie de 0.5 m/s à 0.14 m/s pendant la phase de décélération, qui dure environ 10 échantillons. Ensuite, la vitesse reste constante à 0.14 m/s jusqu'au 40ème échantillon, ce qui indique que le robot suit une trajectoire droite à vitesse constante.

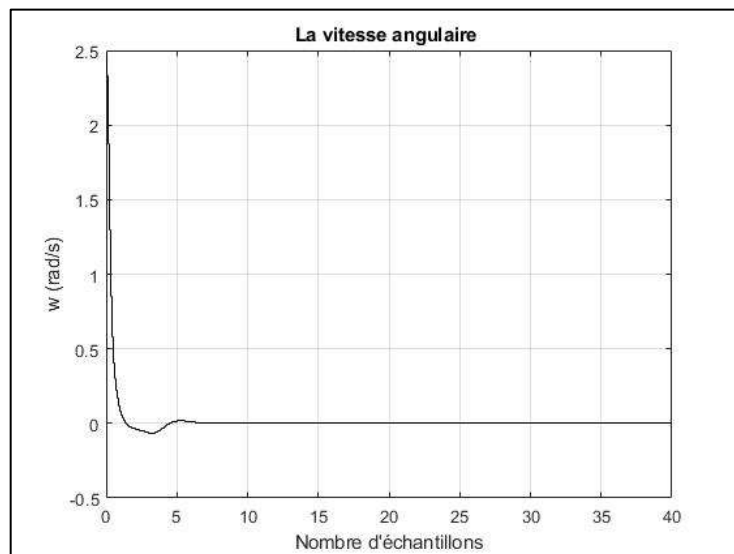


Figure 4. 10 : Variation de la vitesse angulaire ω (rad/s) pour une trajectoire droite

En examinant le graphe de la figure (Fig.4.10), on peut voir que la vitesse angulaire varie au cours des premières d'échantillons, passant de 2.4 à -0.05 rad/s. Cette variation de la vitesse angulaire correspond à une rotation du robot pour s'aligner sur la trajectoire droite désirée. Après quelques nombres d'échantillons, la vitesse angulaire du robot reste constante à 0 rad/s, ce qui indique que le robot suit la trajectoire droite sans rotation.

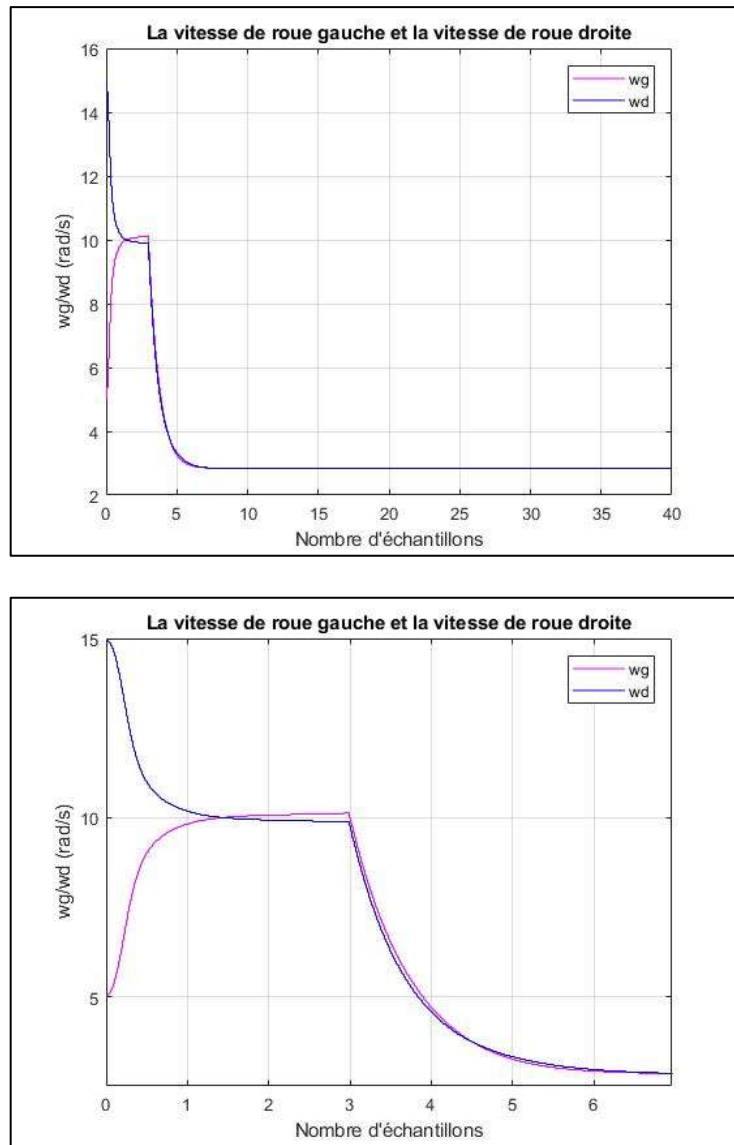


Figure 4. 11 : Variation de la vitesse de la roue ω_g et de la roue ω_d en un trajet droit

La Figure (Fig.4.11) présente deux graphes des vitesses des roues gauche et droite du robot. Lorsque le nombre d'échantillons est compris entre 0 et 10, le robot ajuste les vitesses de ses roues de manière opposée pour corriger sa trajectoire et s'aligner sur la trajectoire désirée. Cette correction de la vitesse permet d'aligner le robot sur la trajectoire souhaitée. Par la suite, les vitesses des roues gauche et droite restent constantes jusqu'à la fin de l'observation, ce qui explique que le robot se déplace le long de la trajectoire droite sans dévier.

Le premier test a évalué la fonction de base de l'algorithme de contrôle du robot en présentant une trajectoire simple. Les résultats ont montré que la commande développée fonctionne correctement, ce qui est une première étape importante dans la validation de l'efficacité de l'algorithme robot.

4.5.2 Trajectoire en huit

Dans le deuxième cas, la forme huit a été choisie pour tester la capacité du robot à suivre une trajectoire plus complexe, qui implique des changements de direction et des virages serrés. Les coordonnées initiales du robot sur le plan sont :

$$x_p = 0, , y_p = 0 \text{ et } \theta = 0$$

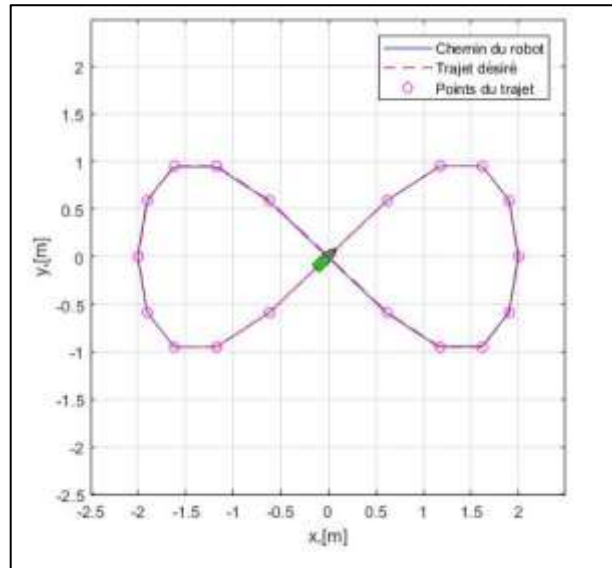


Figure 4. 12 Chemin du robot dans la trajectoire en huit

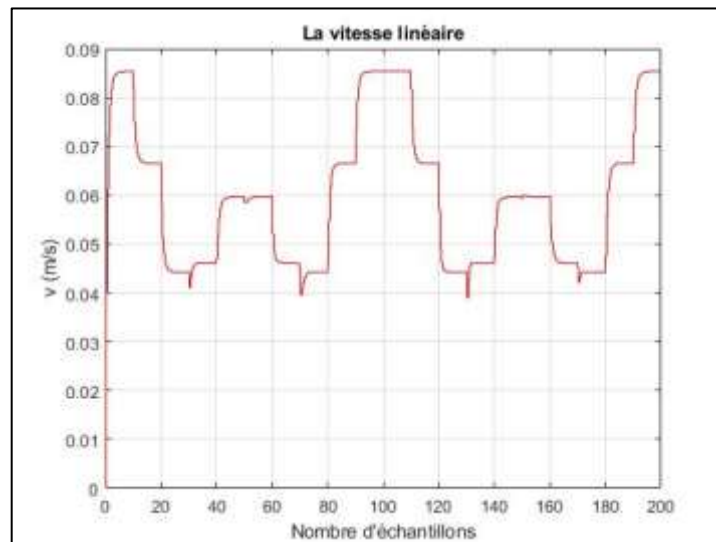


Figure 4. 13 : Variation de la vitesse linéaires V (m/s) pour une trajectoire en huit

La figure (Fig.4.12) montre le chemin en huit emprunté par le robot et démontre sa capacité à suivre la trajectoire prédéfinie. La figure (Fig.4.13) permet d'observer que le robot se déplace d'un point à l'autre, et une fois qu'il atteint l'un des points définissant la trajectoire, il ajuste sa vitesse en conséquence.

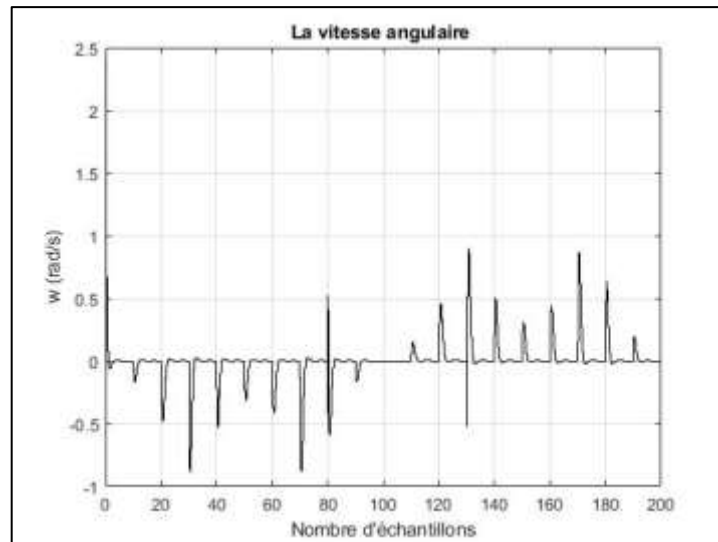


Figure 4.14 : Variation de la vitesse angulaire ω (rad/s) pour une trajectoire huit

Le graphe de la figure (Fig.4.14) montre que le robot maintient sa vitesse angulaire nulle lorsqu'il est sur la trajectoire, mais ajuste sa vitesse angulaire aux points de virage. Les différences dans les pics sont expliquées par les virages plus serrés qui nécessitent une vitesse angulaire plus élevée, tandis que les virages plus doux nécessitent une vitesse angulaire moins élevée.

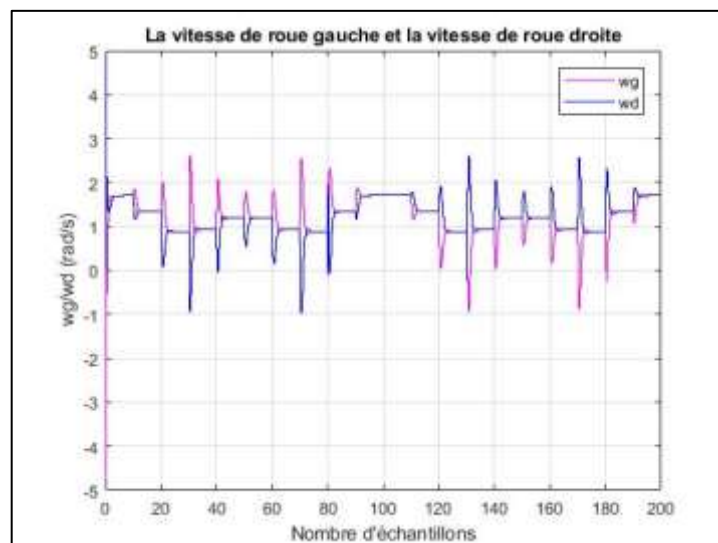


Figure 4.15 : Variation de la vitesse de la roue ω_g et de la roue ω_d en trajectoire huit

La figure (Fig.4.15) présente des vitesses angulaires de la roue gauche et droite qui sont opposées dans les points de virage, cela indique que le robot tourne sur lui-même pour changer de direction dans la trajectoire en huit. Lorsque le robot suit le chemin désiré, les vitesses ω_g et ω_d sont constantes et ont les mêmes valeurs.

Dans le domaine agricole, il n'y a pas de trajet standard pour les robots mobiles, il dépendra de l'application spécifique et des contraintes de l'environnement. Chaque tâche nécessite une approche différente pour le trajet du robot.

4.5.3 Trajet en parallèle

Le trajet proposé pour le déplacement du robot mobile consiste à maintenir son orientation parallèle à un axe de référence tout en le déplaçant en ligne droite.

Cette méthode de déplacement est adaptée pour réaliser des tâches de pulvérisation ou d'irrigation dans des champs. La remorque attachée doit suivre le même trajet, ce qui permet de transporter du matériel nécessaire à la réalisation de la tâche à effectuer.

Les coordonnées initiales du robot sur le plan sont :

$$x_p = 0, , y_p = 0 \text{ et } \theta = 0$$

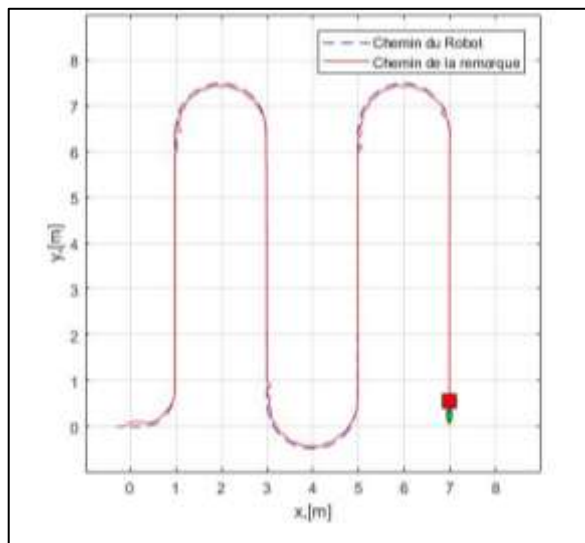


Figure 4. 16 : Chemin du robot et la remorque dans la trajectoire parallèle

La figure (Fig.4.16) montre le parcours prévu pour le robot mobile et la remorque qui le suit. Ce type de trajet permet de traiter uniformément toutes les zones du champ. Lorsque le robot se déplace en tournant dans les virages, la remorque suit la même trajectoire, mais avec un léger écart par rapport au robot. Ce décalage n'affecte pas significativement la capacité du robot et de la remorque à couvrir uniformément toutes les zones du champ.

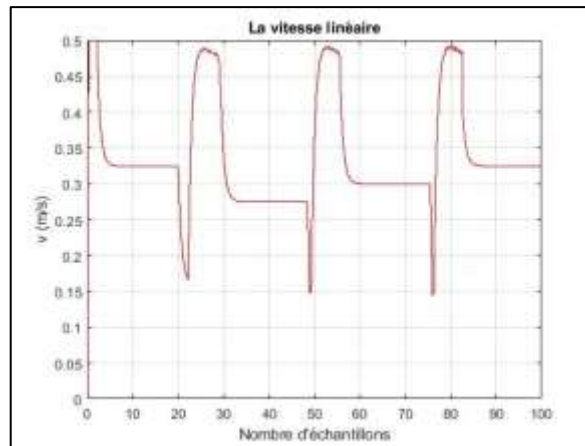


Figure 4. 17 : : Variation de la vitesse linéaires V (m/s) pour une trajectoire parallèle

La diminution de la vitesse linéaire au début indique que le robot est en train d'ajuster sa trajectoire pour se diriger vers le point prédéfini (1,1). Une fois que le robot est correctement aligné avec le trajet, la vitesse linéaire devient constante. Au début de l'arc entre les deux trajets parallèles, le robot ralentit pour effectuer le virage et suit la nouvelle trajectoire. Cela explique pourquoi la vitesse linéaire diminue initialement. Ensuite, une fois que le robot s'est aligné sur la nouvelle trajectoire, il peut accélérer à nouveau pour reprendre sa vitesse linéaire normale. Cela explique pourquoi la vitesse linéaire augmente à nouveau pendant l'arc.

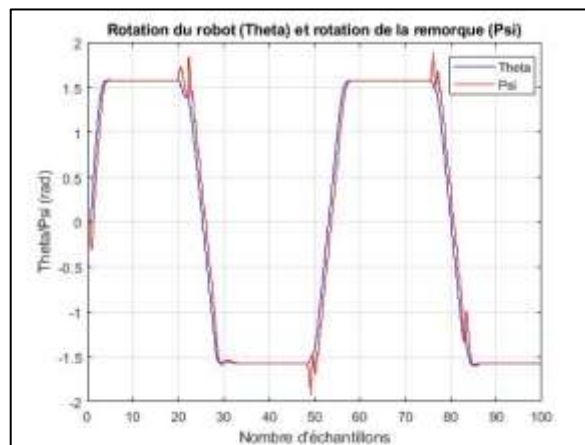


Figure 4. 18 : Orientation du robot (θ) et de la remorque (ψ) en trajet parallèle

La figure (Fig.4.18) montre deux graphes représentant l'orientation du robot (θ) et de l'orientation de la remorque (ψ). Lorsque le robot suit le parcours désiré en ligne droite tout en maintenant son orientation, les valeurs des angle θ et ψ sont égales et constantes, ce qui permet à la remorque de suivre le même chemin en restant alignée avec le robot. Toutefois, lors des virages, la remorque suit également la trajectoire du robot tout en maintenant son alignement avec lui.

4.7 Discussion des résultats

Les résultats encourageants du robot mobile en termes de précision, fiabilité et vitesse de déplacement constant peuvent être considérés comme un pas important vers la réalisation d'un robot agricole fonctionnel. De plus, la capacité de la remorque à suivre avec précision la trajectoire du robot en maintenant son alignement avec lui de manière uniforme ouvre la voie à une application plus large de cette technologie dans des domaines tels que l'agriculture de précision et la logistique agricole.

4.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une simulation et des interprétations du système de contrôle de robot mobile avec remorque. Nous avons commencé par décrire le logiciel utilisé pour la modélisation, ainsi que les étapes d'élaboration de la simulation. Ensuite, nous avons présenté les résultats de nos tests sur trois trajectoires différentes.

Chapitre 5

Réalisation du robot

5.1 Introduction

Dans le domaine de la robotique, les composants utilisés pour la construction jouent un rôle important pour la détermination des performances et les capacités d'un robot.

Dans ce chapitre, nous présentons les étapes de la construction de notre robot agricole notamment le choix des matériaux utilisés, la conception mécanique et l'assemblage électronique.

5.2 Le moteur à CC utilisé (EMG30)

Les moteurs sont des composants essentiels pour un robot fonctionnel car ils fournissent la puissance pour le déplacer.

Pour notre application, nous avons utilisé le moteur EMG30, qui est à notre disposition. L'EMG30 est un motoréducteur 12 Vcc avec un rapport de réduction de 30 (30 rotations donnent une rotation sur l'axe de sortie du réducteur). Ce moteur est équipé d'un encodeur. ^[24]

Il est idéal pour les petites ou moyennes applications robotiques, offrant un entraînement et un retour d'information rentables pour l'utilisateur. ^[25]



Figure 5. 1 : Moteur EMG30

- L'EMG30 est fourni avec un connecteur JST à 6 voies (référence PHR-6) à l'extrémité d'environ 90 mm de câble en standard. ²⁵
- Il comporte un réducteur, qui augmente le couple de sortie pour faire tourner la charge en réduisant sa vitesse de rotation.

- Le tableau suivant présente les caractéristiques de ce moteur :

Alimentation	12 Vcc
Consommation	530mA (150 mA à vide)
Courant de blocage	2.5 A
Vitesse de rotation	170 t/min
Couple	1.5 kg.cm
Encodeur	360 impulsions par tour

Tableau 5. 1 : Les caractéristiques de moteur EMG 30

5.3 Les encodeurs

Les odomètres utilisés pour cette application sont des encodeurs incrémentaux magnétiques. Ils déterminent la position angulaire à l'aide d'une technologie de capteur de champ magnétique. ^[26]

- Pour chaque signal de sortie, l'encodeur utilise un champ magnétique pour détecter les impulsions, en utilisant un aimant permanent sur l'arbre de moteur et un capteur.
- Lors de mouvement de moteur, l'aimant crée un champ magnétique qui est détecté par le capteur.
- Le signal généré par le capteur représente des variations de tension, qui seront ensuite traduites en signal numérique.

(Tension \neq 0 \rightarrow impulsion, tension = 0 \rightarrow absence d'impulsion)

5.3.1 Les encodeurs et le sens de mouvement

L'encodeur génère 2 signaux de sortie appelés A et B :

Si A est à l'état haut (H) et B est à l'état bas (L), alors cela signifie que l'arbre ou le moteur tourne dans le sens horaire.

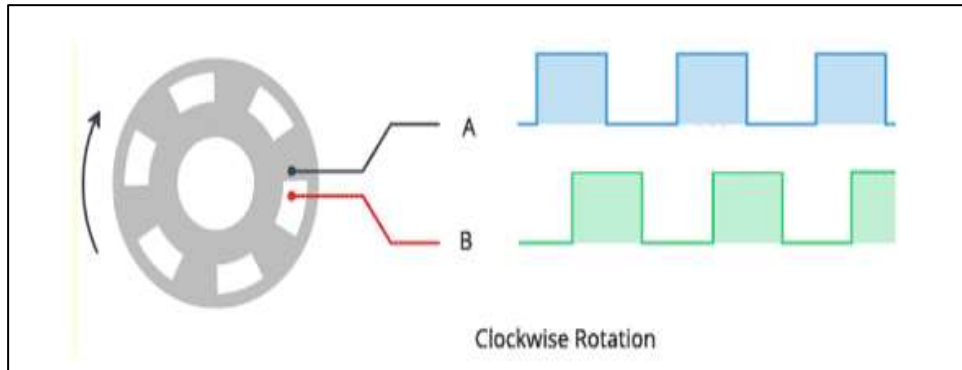


Figure 5. 2: La rotation dans le sens positif (B est retardé)

Si A est à l'état bas (L) et B est à l'état haut (H), alors cela signifie que l'arbre ou le moteur tourne dans le sens anti-horaire.

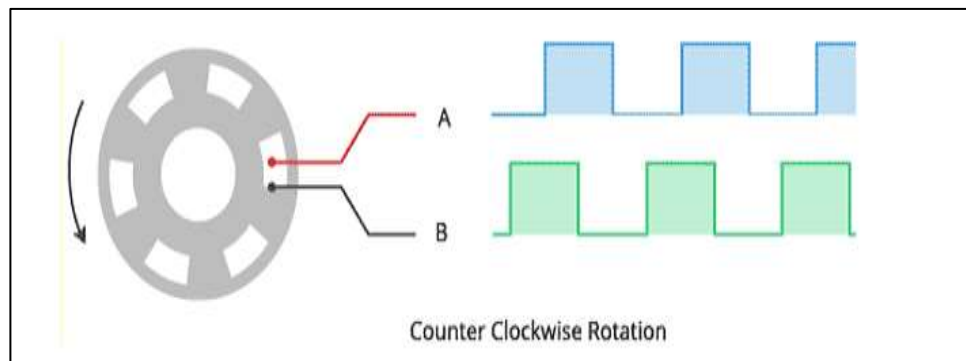


Figure 5. 3: La rotation dans le sens négatif (A est retardé)

5.3.2 Les encodeurs et le calcul de nombre de tours

On peut calculer le nombre de tours, en comptant les impulsions générés (fronts montants et descendants) par les deux voies A et B.

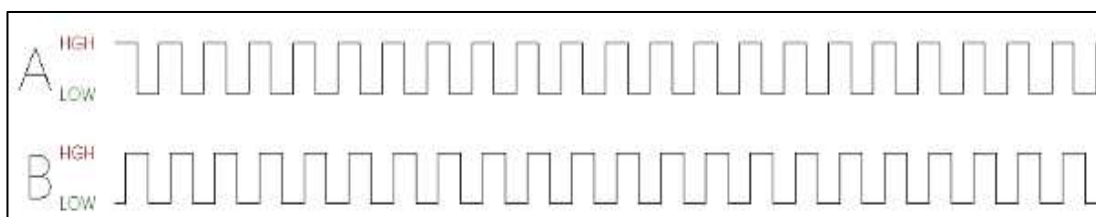


Figure 5. 4: Signaux des voies A et B

Pour cela, on utilise 4 compteurs :

Le compteur	Etat de signal A	Etat de signal B
Compteur 1	HAUT	BAS
Compteur 2	HAUT	HAUT
Compteur 3	BAS	HAUT
Compteur 4	BAS	BAS

Tableau 5. 2: Le comptage des impulsions à partir de A et B

- Le nombre total de toutes les impulsions générées par les deux voies A et B peut être converti pour calculer le nombre de tours parcouru en divisant par la résolution de l'encodeur qui est le nombre d'impulsions générées par l'encodeur pour un tour ($2 \times \pi \text{ rad}$).

5.4 Le circuit intégré L298

L298 est un circuit intégré monolithique à 15 broches, il s'agit d'un double pont en H. Il est idéal pour les applications robotiques et bien adapté pour la connexion à un microcontrôleur nécessitant seulement quelques lignes de commande par moteur. Il peut également être interfacé avec des interrupteurs manuels simples, TTL portes logiques, relais. ^[27]

- Le fonctionnement d'un L298 avec un microcontrôleur implique l'envoi des signaux de commande en PWM à travers les broches d'entrée de circuit pour contrôler les deux moteurs à cc.
- L298 dispose de deux ponts en H pour contrôler chaque moteur indépendamment.
- Chaque pont en H est composé en quatre transistors pour contrôler le sens et la vitesse de moteur, et quatre diodes pour éviter les surtensions lors de l'arrêt de moteur.

La figure suivante présente l'architecture interne d'un L298 :

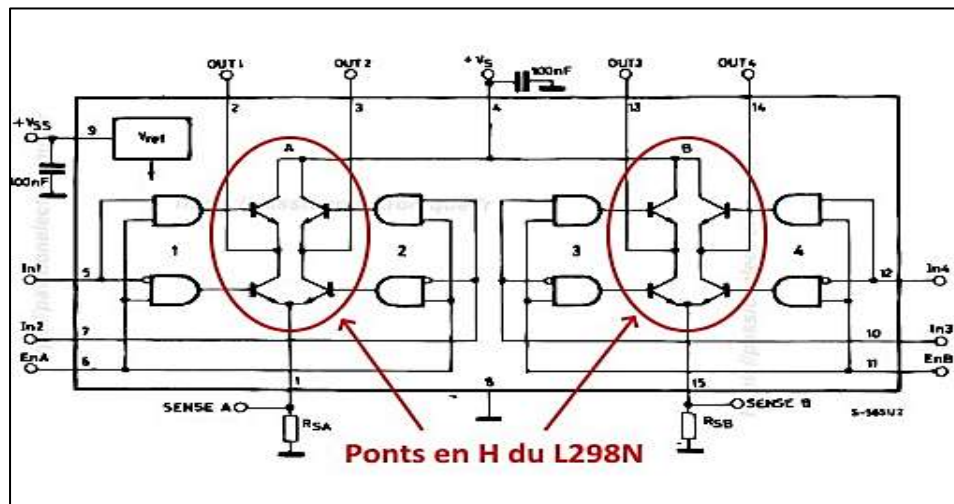


Figure 5. 5: Schéma interne d'un L298

En envoyant des signaux de commande (PWM) aux transistors deux par deux (ceux de sens opposés), on peut contrôler le sens du passage du courant dans la charge, branchée « au milieu du H ». [28]

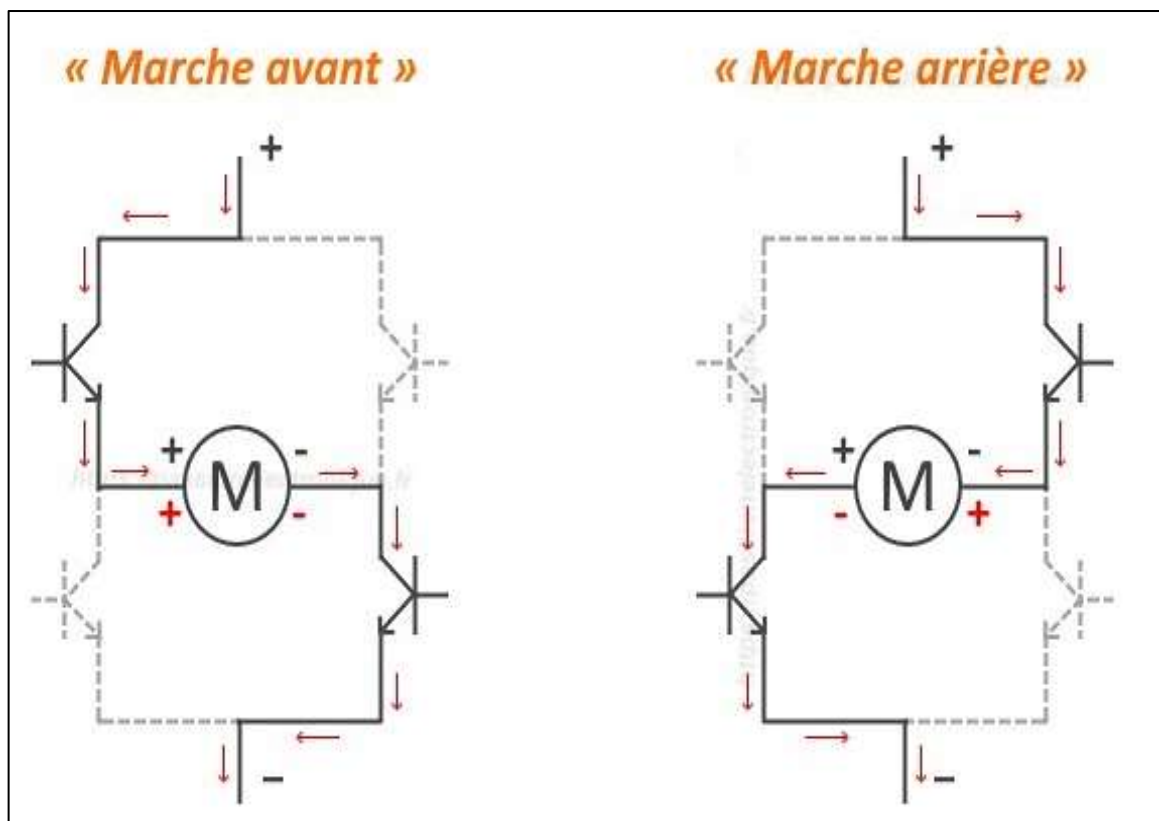


Figure 5. 6 : Direction du moteur [28]

- L298 peut aussi contrôler la vitesse des moteurs, en générant un signal de fréquence fixe et de rapport cyclique variable, en peut calculer la tension moyenne qui est proportionnelle à la vitesse de moteur.

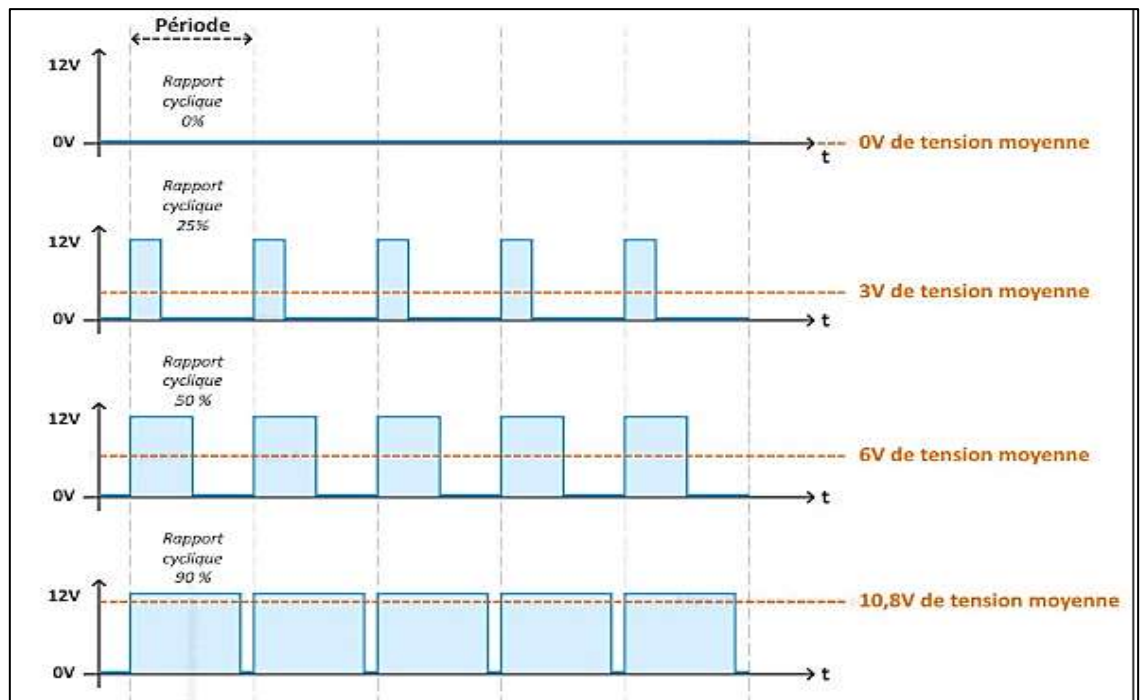


Figure 5. 7 : Signal PWM et la variation de la tension moyenne [30]

5.5 Arduino MEGA 2560

L'Arduino Mega 2560 est une carte microcontrôleur basée sur l' ATmega 2560 . Il dispose de 54 broches d'entrée/sortie numériques (dont 15 peuvent être utilisées comme sorties PWM), 16 entrées analogiques, 4 UART (ports série matériels), un oscillateur à cristal 16 MHz, une connexion USB, une prise d'alimentation, un en-tête ICSP, et un bouton de réinitialisation. [28]

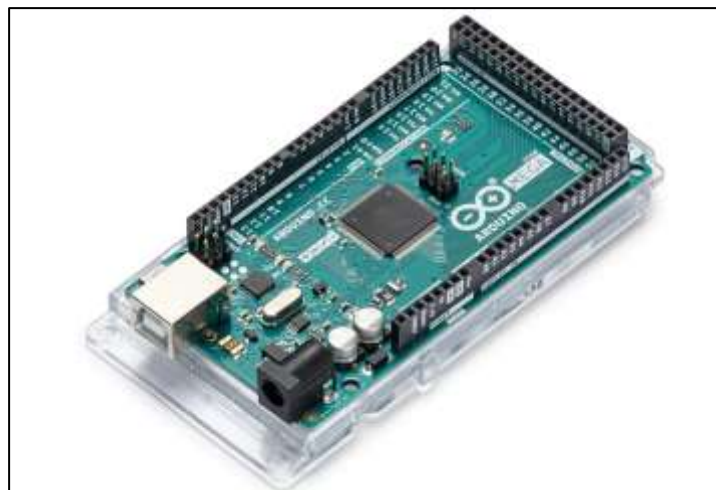


Figure 5. 8 : : Arduino méga 2560

5.6 Carte de puissance

Une carte de puissance représente une interface entre la carte de commande et la partie motrice du système, elle permet de contrôler les moteurs à CC en fonction des instructions envoyées de la part de commande (carte ARDUINO).

En d'autres termes, elle permet de convertir les signaux de commande (PWM) de la carte commande en signaux de puissance pour alimenter les moteurs.

Pour contrôler à la fois la vitesse et la direction de deux moteurs, nous avons conçu une carte de puissance qui est composée d'une carte ARDUINO MEGA 2560, un circuit intégré L298, et une alimentation.

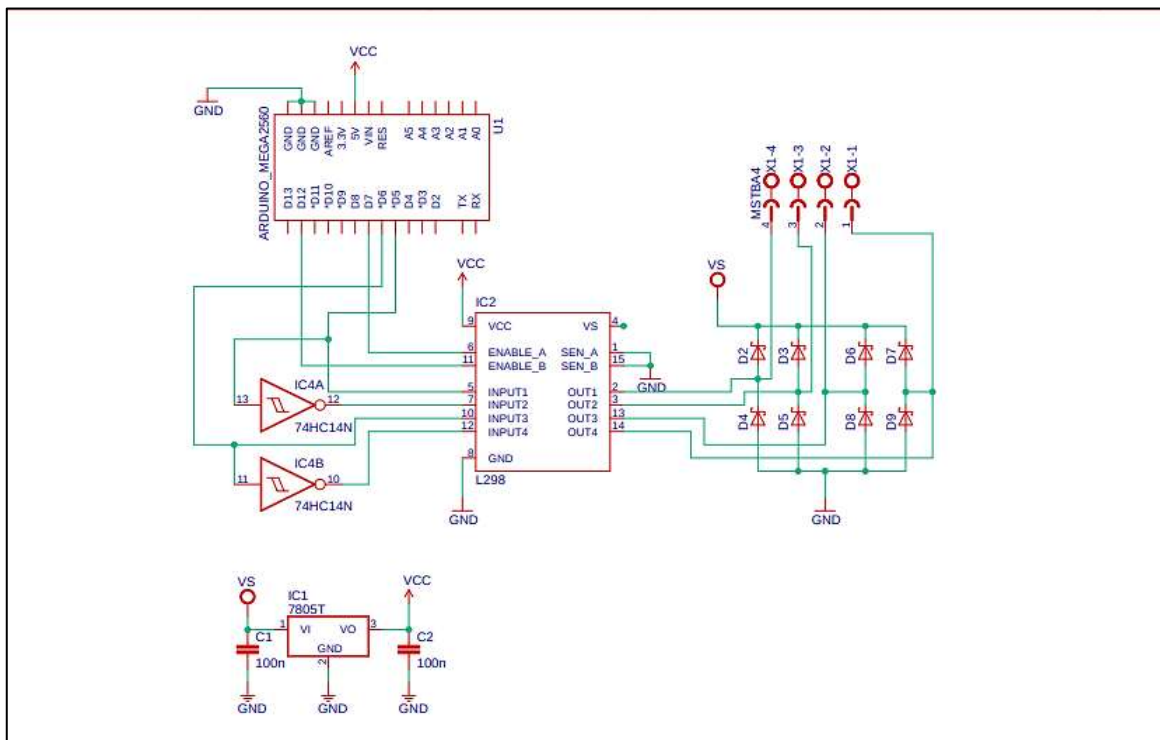


Figure 5. 9 : La carte de puissance du robot

- Pour contrôler un moteur, l'Arduino envoie un signal numérique (HIGH / LOW) de commande au pont H pour indiquer la direction et la vitesse de moteur.
- Lorsque le signal est envoyé au L298, deux des transistors du pont H sont activés (recevant un signal HIGH) ce qui permet au courant de circuler dans la direction souhaitée, les deux autres transistors sont désactivés (recevant un signal LOW)

5.7 Conception mécanique du robot

La conception mécanique est l'étape de création du robot, elle implique la sélection des matériaux, des dimensions, des formes.

Le robot réalisé est constitué d'un unicycle auquel est attachée une plateforme polyvalente sous forme de remorque.

La figure suivante représente le robot développé :

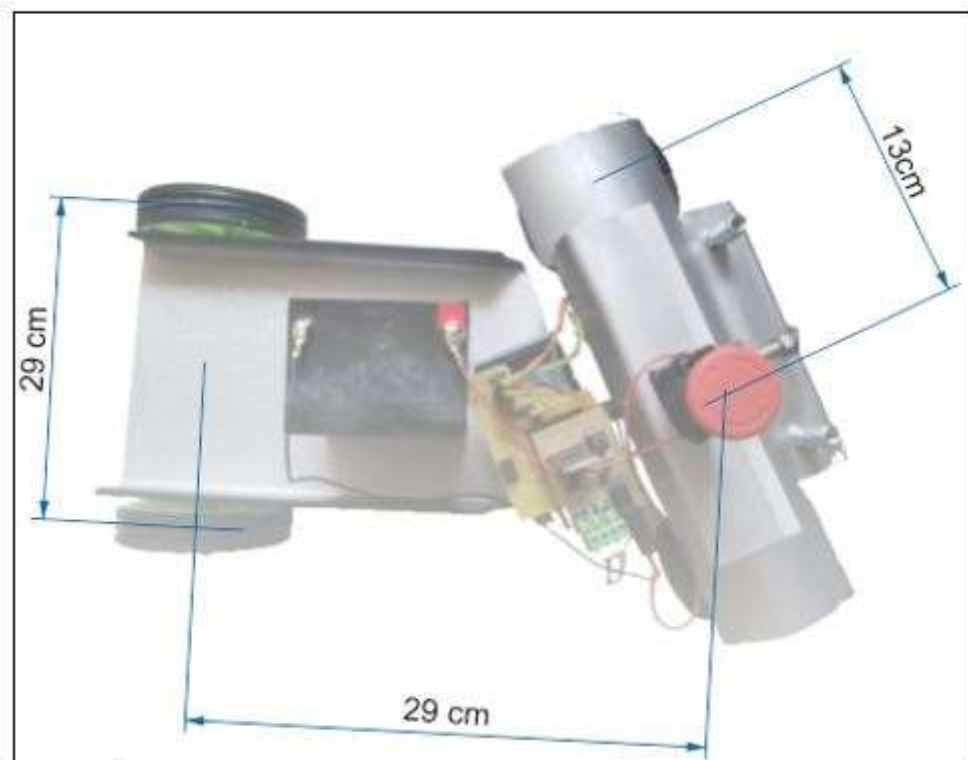


Figure 5. 10 : Prototype du robot agricole

➤ L'unicycle :

Il mesure 26 cm de hauteur, 33.5 cm de largeur et 15 cm de longueur, avec deux roues en caoutchouc ayant un rayon de 5 cm et une épaisseur de 5 cm.

➤ La remorque :

Elle mesure 12.5 cm de hauteur, 29 cm de largeur et 28 cm de longueur avec deux roues en plastique ayant un rayon de 5.75 cm et une épaisseur de 2.5cm.

Pour faciliter la mise en marche, le prototype est équipé avec un bouton marche / arrêt, qui est connecté avec la carte de puissance, pour actionner les deux moteurs à CC simultanément en utilisant une batterie de 12 V pour l'ensemble du circuit.

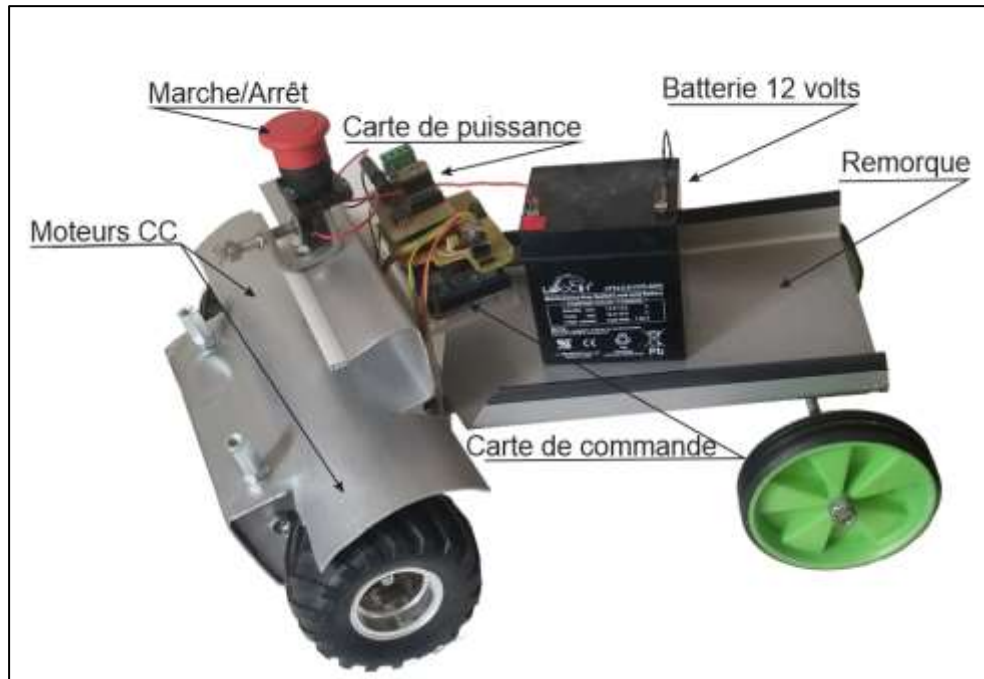


Figure 5. 11 : La configuration électronique du robot

5.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué le fonctionnement des composants utilisés en détaillant leur rôle dans le fonctionnement du robot. Ensuite, nous avons abordé l'assemblage électronique, et enfin nous avons présenté un aperçu de la conception mécanique de notre prototype de robot agricole.

Conclusion générale

L'objectif principal de notre travail était de concevoir un robot mobile avec remorque destiné à être utilisé dans les applications agricoles. Pour cela nous avons développé un algorithme de commande pour permettre à cette plateforme de suivre une trajectoire définie avec précision.

Le travail a débuté par l'importance du secteur agricole et les défis auxquels il est confronté. Nous avons également examiné l'utilisation croissante des robots dans l'agriculture pour relever ces défis.

Ensuite, une synthèse des principes fondamentaux et des éléments clés a été présentée afin d'introduire les concepts essentiels et les éléments nécessaires pour étudier les robots mobiles.

En élaborant un modèle cinématique pour le robot mobile et la remorque, nous avons pu concevoir un système de contrôle qui permet au robot mobile de suivre un chemin déterminé tout en ajustant sa vitesse, pendant que la remorque suit le robot.

Nous avons ensuite implémenté cet algorithme de commande dans l'environnement Simulink pour tester et valider le système de contrôle. Les simulations réalisées dans différents scénarios nous ont permis d'évaluer les performances de contrôle et d'ajuster les paramètres en fonction des résultats de la simulation.

L'étude est accompagnée d'une réalisation pratique du robot qui a montré des résultats en termes de la navigation et d'efficacité dans les tâches agricoles.

Notre étude a permis de développer un système de contrôle pour le robot mobile et sa remorque, mais il est important de reconnaître qu'il existe des possibilités d'amélioration, notamment concernant le réglage des paramètres. Dans notre cas, cela a été effectué manuellement, ce qui a été relativement compliqué en raison de la difficulté de trouver une bonne combinaison des cinq paramètres de réglage de notre contrôleur.

Les points du trajet ont été planifiés manuellement et cela peut affecter la qualité et l'efficacité du trajet effectué par la remorque attachée au robot.

Enfin, le système de contrôle développé n'a pas pris en compte certains facteurs importants tels que les conditions météorologiques et les obstacles imprévus. Cela a limité la capacité du robot mobile et de sa remorque à fonctionner de manière autonome dans des environnements variables et imprévisibles.

Il est recommandé d'explorer des méthodes plus efficaces pour régler les paramètres du système de contrôle, telles que l'optimisation automatisée des paramètres à l'aide de l'intelligence artificielle. Cette approche permettrait de réduire le temps associé au réglage manuel des paramètres. La collaboration avec des experts de l'agriculture pour comprendre les besoins spécifiques du secteur est également recommandée pour concevoir des solutions adaptées et efficaces.

Notre projet de fin d'études en robotique mobile représente un travail fondateur qui peut inspirer d'autres travaux de recherche, parmi lesquels on peut citer :

Concevoir une autre architecture mécanique qui permettra au robot d'évoluer dans des terrains accidentés.

Remplacer les moteurs utilisés par d'autres qui permettront l'amélioration des performances en vitesse du robot.

Implémenter d'autres méthodes de commande pour différents objectifs comme un pilotage réactif du robot ou bien un contournement d'obstacles en utilisant divers types de capteurs extéroceptifs comme les capteurs infrarouge (IR), ultrason ou bien une caméra à acquisition numérique.

Bibliographiques

- [1] Banque mondiale. Agriculture et alimentation. In : *Banque mondiale*. 31 mars 2023. <https://www.banquemondiale.org/fr/topic/agriculture/overview> (consulté le 02 juillet 2023).
- [2] Maryville University. Why is Agriculture Important? In : Maryville University Blog [en ligne]. 2023. <https://online.maryville.edu/blog/why-is-agriculture-important/#what-is> (consulté le 02 juillet 2023).
- [3] GreenFacts. Agriculture et développement : défis et enjeux. In : *GreenFacts*.2015. <https://www.greenfacts.org/fr/agriculture-developpement/1-2/1-agriculture-defis.htm#0> (consulté le 02 juillet 2023).
- [4] Michel Foucher. La géopolitique des frontières maritimes. In : *Géoéconomie* [en ligne]. 2016, n° 80, p. 159-176. <https://www.cairn.info/revue-geoeconomie-2016-3-page-159.htm>(Consulté le 01/04/2023).
- [5] FAO. Guide de bonnes pratiques en matière d'hygiène pour la production primaire alimentaire [en ligne]. Rome : FAO, 2007. 134 p. <http://www.fao.org/3/cb2186fr/cb2186fr.pdf>(Consulté le 01/04/2023).
- [6] F. García-Orenes, C. Guerrero, A. Roldán. Task-based agricultural mobile robots in arable farming. 2013: Spanish Journal of Agricultural Research [en ligne], 11,1, 199-209. <https://revistas.inia.es/index.php/sjar/article/view/9573/3237>(Consulté le 01/04/2023).
- [7] National Geographic France. De plus en plus lourds, les équipements agricoles abîment les sols fertiles [en ligne]. Publié le 12 avril 2021. <https://www.nationalgeographic.fr/environnement/de-plus-en-plus-lourds-les-equipements-agricoles-abiment-les-sols-fertiles>(Consulté le 01/04/2023).
- [8] R. Naresh, E, Narwal. “ROBOTIQUE AGRICOLE ET DRONES” : ResearchGate [en ligne]. 2021. https://www.researchgate.net/publication/349736909_AGRICULTURAL_ROBOTICS_AND_DRONES (Consulté le 01/04/2023).
- [9] S. BELLILI, “ Conception et Réalisation d’un Robot d’Inspection des Pipelines à base de Carte Arduino Uno ”. Mémoire master en électronique. Université de Biskra, Algérie,2019.
- [10] F. BENABADI, Y. HAOUA, “Localisation d’un robot mobile par l’odomètre avec affichage sur pc”. Mémoire master en électronique. Université Saad Dahleb, Blida, Algérie,2013.
- [11] G. ZIDANI, “ Commande Robuste d’un Robot Mobile à Roues”. Thèse doctorat. Université de Batna-2, Algérie,2017.
- [12] A. BOUSSAID, B. HAMROUN, “ Modélisation, commande et réalisation d’un robot mobile unicycle”. Mémoire master en génie électronique. École Nationale Polytechnique d’Alger.2005
- [13] A. REHAIEM, “Conception, Réalisation et Command D’un Robot Mobile”. Mémoire master en électronique. Université d’Ouargla, Algérie,2016

-
- [14] A. SAIDANI, S. BENYAHIA, "Path following mobile robot". Mémoire master en électronique. Université Saad Dahleb, Blida, Algérie, 2022.
- [15] F. BOUGUEROUA, N. BOUHAFNA, "Commande robuste des robots mobiles". Mémoire master en électromécanique. Université BOUSSOUF Abdelhafid, Mila, Algérie, 2022.
- [16] A. De Luca, G. Oriolo, "Chapter 7 MODELING AND CONTROL OF NONHOLONOMIC MECHANICAL SYSTEMS".
<https://www.researchgate.net/publication/242282320> (Consulté le 07/05/2023).
- [17] J. P. Laumond, "La robotique mobile," Edition Hermes Science Publication, Paris, 2001.
- [18] R. Khenfer, S. Houacine, and S. Bououden. Les Stratégies et Méthodes de Navigation d'un Robot Mobile. In: Revue des Energies Renouvelables [en ligne]. 2014, volume 17, numéro 1, pp. 111-120.
https://www.academia.edu/9595331/Les_Strat%C3%A9gies_et_M%C3%A9thodes_de_Navigation_dun_Robot_Mobile(consulté le 30/05/2023).
- [19] Robotique.wikibis.com. Odometrie [en ligne]. 2009.
<http://www.robotique.wikibis.com/odometrie.php> (consulté le 30/05/2023).
- [20] Aquaportail. Rotation [en ligne]. 2022. <https://www.aquaportail.com/definition-6368-rotation.html> (consulté le 30/05/2023).
- [21] Mouvement rectiligne. (s.d.). StudySmarter FR.
<https://www.studysmarter.fr/resumes/physique-chimie/physique/mouvement-rectiligne/>
- [22] K. AMI, M. DJENANE, "Pilotage automatique d'un robot mobile par l'intelligence artificielle". Mémoire master en électronique des systèmes embarqués. Université Oum El Bouaghi, Algérie, 2020.
- [23] MathWorks. *Qu'est-ce que MATLAB ?* [en ligne]. 2021.
<https://fr.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html> (Consulté le 22/06/2023).
- [24] G. Tronic. (s. d.). Ducteur moteur + encodeur EMG30. PASSEZ À LA TRONIC.
<https://www.gotronic.fr/art-motoreducteur-encodeur-emg30-866.htm>
- [25] Données EMG30. (s. d.).
<https://www.robot-electronics.co.uk/htm/emg30.htm>
- [26] POSITAL FRABA Inc. "Encoder Technology - Absolute Encoders". Posital.com,
<https://www.posital.com/fr/produits/codeurs-absolus/principes-de-mesure-magnetiques-optiques/Encoder-Technology.php>.
- [27] L298 Dual H-Bridge Motor Driver. (s. d.). Dzduino Boutique en ligne.
<https://www.dzduino.com/l298-dual-h-bridge-motor-driver-fr>
- [28] Arduino Mega 2560 Rev3. (s. d.). Boutique officielle Arduino.
<https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>

