

Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



N° d'ordre :

N° de série :

Université de Ghardaïa

Faculté des Sciences et Technologies

Département d'Automatique et Électromécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologies*

Filière : *Automatique*

Spécialité : *Automatique et systèmes*

Par : *OULED SSSAID Manel*

RECIQUI Hadjer

Thème

**Conception et réalisation d'un robot suiveur
de ligne**

Soutenu publiquement le : 17/06/2021 Devant le jury :

ABESSALAM Kifouche

Univ. Ghardaïa

Examineur

BECHOUAT Mohcene

Univ. Ghardaïa

Examineur

HACENE Nacer

MCB

Univ. Ghardaïa

Encadrant

Année universitaire 2020/2021

Dédicace

Nous avons dédié ce modeste travail à:

A nos Parents, que Dieu les gardes,

A notre chère « Myma Zouhra »

A nos sœur « Ryma » et nos frères,

A tous nos amis

Hadjer et Manel

Remerciement

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Dr. HACENE Nacer**, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

Nos remerciement s'adresse également à tout nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Nous sommes reconnaissants envers nos familles et tenons à les remercier pour leur amour et nos soutient.

ملخص:

الهدف من هذه المذكرة هو تصميم وبناء روبوت متحرك ذو قيادة تفاضلية لحل مشكل تتبع الخطوط. أولاً ، تم إجراء نمذجة الروبوت حيث تم إيجاد النموذجين الحركي والديناميكي للروبوت بالتفصيل. وقد تم بناء النماذج واختبارها باستخدام برنامج الماتلاب. تم تصميم وحدة تحكم PID للسماح للروبوت باتباع الخط المطلوب. تظهر نتائج المحاكاة كفاءة المتحكم المقترح باستخدام مسارات مختلفة. تم بناء نموذج أولي للروبوت على أساس لوحة Arduino . تم تجهيز هذا الروبوت بجهازين استشعار يعملان بالأشعة تحت الحمراء يسمحان له بمتابعة الخط.

الكلمات المفتاحية: روبوت متنقل ذو قيادة تفاضلية، تتبع الخطوط، وحدة تحكم PID ، أردوينو

Résumé

Le but de ce mémoire est de concevoir et construire un robot mobile à entraînement différentiel pour le problème de suivi de ligne.

Tout d'abord, la modélisation du robot a été effectuée où le modèle cinématique et dynamique du robot sont déterminés en détail. Les modèles sont construits et testés à l'aide de l'environnement Matlab Simulink.

Un contrôleur PID a été conçu pour permettre au robot de suivre la ligne souhaitée. Les résultats de la simulation montrent l'efficacité du contrôleur proposé en utilisant différentes trajectoires.

Un prototype du robot sur la base d'une carte Arduino a été construit. Ce robot est équipé de deux capteurs infrarouges qui lui permettent de suivre la ligne.

Mots clés: Robot mobile à entraînement différentiel, suivi de ligne. Contrôleur PID, Arduino.

Abstract

The goal of this thesis is to design and build a differential drive mobile robot for the line following problem.

First, the robot modeling was performed where the kinematic and dynamic model of the robot are determined in detail. Models are built and tested using the Matlab Simulink environment.

A PID controller has been designed to allow the robot to follow the desired line. The simulation results show the efficiency of the proposed controller using different trajectories.

A prototype of the robot on the basis of an Arduino board has been built. This robot is equipped with two infrared sensors that allow it to follow the line.

Keywords: Differential drive mobile robot, line following. PID controller, Arduino.

Table des matières

Dédicace	II
Remerciement	III
Résumé.....	IV
Table des matières.....	V
Liste de Figures.....	XI
Liste des tableaux	X
Liste des abréviations.....	XI
Introduction générale.....	1

Chapitre I

I.1. Introduction.....	4
I.2. La définition d'un robot mobile.....	5
I.3. Classification des robots mobiles.....	5
I.3.1. Robots mobiles à roues.....	5
I.3.2. Robots mobiles à chenilles.....	6
I.3.3. Robots mobiles à pattes	7
I.3.4. Robots mobiles volants	7
I.3.5. Robots mobiles sous-marins.....	8
I.3.6. Robots mobiles hybrides.....	8
I.4. La navigation autonome d'un robot mobile.....	9
I.5. Perception.....	10
I.6. La navigation autonome d'un robot mobile.....	13
I.6.1. La navigation	13
I.6.2. Localisation	13
I.6.3. La cartographie (Mapping)	14
I.6.4. Le suivi de trajectoire.....	14
I.6.5. L'évitement d'obstacles	15
I.7. Suivi de lignes	15
L'application de robot suiveur de ligne	15
I.8. Conclusion.....	17

Chapitre II

II.1 Introduction.....	20
II.2 Présentation de robot.....	20

II.3 Modélisation Cinématique.....	21
II.4 Le modèle cinématique.....	23
II.5.La modélisation dynamique.....	26
II.6. Simulation.....	31
• Réponse indicielle.....	32
• Réponse indicielle du modèle cinématique	33
• Réponse indicielle du modèle dynamique.....	35
• Réponse indicielle du modèle cinématique et dynamique.....	36
II.7. Conclusion.....	38

Chapitre III

III.1 Introduction.....	40
III.2 Suivi de ligne.....	40
III.3 Le contrôleur PID.....	41
III.3.1.Rôle de l'action proportionnelle (P)	42
III.3.2 Rôle de l'action Intégrale (I)	42
III.3.3 Rôle de l'action dérivée (D):	42
III.3.4. Rôle d'Action du correcteur (PI)	43
III.3.5. Rôle d'Action du correcteur (PD).....	43
III.3.6. Rôle d'Action du correcteur (PID)	43
III.4. Conception du contrôleur PID.....	44
III.5. Simulation.....	45
• Trajectoire circulaire.....	46
• Trajectoire en forme de fleur.....	48
III.6 Conclusion.....	50

Chapitre IV

IV.1. Introduction.....	52
IV.2. Coté Hardware.....	52
IV.2.1. La plate-forme.....	52
IV.2.2. moteur DC avec boîte de vitesses.....	53
IV.2.3. Capteur Infrarouge FC51.....	53

IV.2.4. Le pilote de moteur L298N.....	54
IV.2.5 La carte Arduino Uno.....	55
IV.2.6 La réalisation final (Le branchement)	56
IV.3. Coté Software.....	58
IV.3.1. Présentation de l'environnement de l'Arduino IDE.....	58
IV.3.2. L'organigramme de suivi de ligne.....	60
IV.3.3. Le code du robot.....	61
IV.4. Conclusion.....	64
Conclusion générale.....	66

Liste de Figures

Chapitre I

Figure I.1: Robot Mobile Intelligent à détection et évitement d'obstacles

Figure I.2 : Voiture tout terrain (robot mobile à roues)

Figure I.3 : Types de robot à roues

Figure I.4 : Exemples de robots mobiles à chenilles

Figure I.5 : Exemples de robots mobiles à pattes

Figure I.6 : Exemple d'un robot volant.

Figure I.7 : Exemple d'un robot sous-marin

Figure I.8 : Exemple d'un robot hybride

Figure I.9 : La navigation autonome d'un robot mobile

Figure I.10 : Les capteurs extéroceptifs

Figure I.11: Un VGA

Figure I.12 : Au Chine, Robots serveurs dans un restaurant Au Japon, le café servi par des robots

Figure I.13 : Jeux de circuit magique.

Chapitre II

Figure II.1 : Robot mobile de type unicycle (DDMR). [10]

Figure II.2 : Position du robot [07]

Figure II.3 : Le modèle de mouvement du robot

Figure II.4. Les forces sur les roues : une représentation équivalente

Figure II.5. Schéma des vitesses appliquées au robot [10]

Figure II.6. La cinématique du robot sur SIMULINK

Figure II.7. La dynamique du robot sur SIMULIN indicielle

Figure II.8 : Modèle de la réponse indicielle de la cinématique du robot sur SIMULINK

Figure II.9. La réponse indicielle ($V_R=2\text{m/s}$ et $V_L=2\text{m/s}$ avec $\varphi = 0$)

Figure II.10. La réponse indicielle ($V_R=2\text{m/s}$ et $V_L=2\text{m/s}$ avec $\varphi = \frac{\pi}{3}$ rad)

Figure II.11. La réponse indicielle ($V_R=2\text{m/s}$ et $V_L=0.6\text{m/s}$ avec $\varphi = \frac{\pi}{3}$ rad)

Figure II.12. Modèle de la réponse indicielle de la dynamique du robot sur SIMULINK

Figure II.13. La réponse indicielle ($E_R=5\text{V}$ et $E_L=5\text{V}$)

Figure II.14. La réponse indicielle ($E_R=3\text{V}$ et $E_L=-1\text{V}$)

Figure II.15. Modèle de la réponse indicielle de la dynamique avec la cinématique du robot sur SIMULINK

Figure II.16. La réponse indicielle ($E_R=5\text{V}$ et $E_L=5\text{V}$ avec $\varphi = \frac{\pi}{4}$ rad)

Figure II.17. La réponse indicielle ($E_R=5\text{V}$ et $E_L=3\text{V}$ avec $\varphi = \frac{\pi}{4}$ rad)

Chapitre III

Figure III.1 : Schéma de base du système de suivi de trajectoires

Figure III.2 : Correcteur PID

Figure III.3. Le problème de suivi de ligne [10]

Figure III.4 : L'entrées et la sortie de PID

Figure III.5 : Système générale de contrôle pour le problème du suivi de ligne

Figure III.6 : Suivre une ligne circulaire

Figure III.7 : l'erreur sur la: a) distance (Dis), b) orientation(β)

Figure III.8 : La commande appliqué pour la trajectoire circulaire : a) Tension du moteur Droit E_R , b) Tension du moteur Gauche E_L

Figure III.9 : Suivre une ligne en forme de fleur

Figure III.10 : l'erreur sur la. la: a) distance (Dis), b) orientation(β)

Figure III.11. La commande appliquée pour la ligne La commande appliquée sur le robot : a)
Tension du moteur droit

Chapitre IV

Figure IV.1 : La plate-forme du robot à entraînement différentiel.

Figure IV.2 : Moteur à courant continu avec Gearbox.

Figure IV.3 : Capteur Infrarouge FC51.

Figure IV.4 : Le pilote de moteur L298N.

Figure IV.5 : .La carte Arduino Uno.

Figure IV.6 : L'installation d'un circuit électrique entre les éléments électroniques d'un robot
suivi de ligne

Figure IV.7 : Robot mobile suivi de ligne avec deux capteurs infrarouge.

Figure IV.8 :L'interface graphique de l'environnement de développement Arduino IDE.

Figure IV.9.L'organigramme de suivi de ligne appliqué dans le projet.

Liste des tableaux

Table I.1. Les types de capteurs proprioceptifs

Table II.2 : Les paramètres du robot

Liste des abréviations

AUAV: Autonomous Unmanned Aerial Vehicle

GPS: Global Positioning Systems

VGA: Véhicule à Guidage Automatique

DDMR: Differential Drive Mobile Robot

ICC: Instantaneous Center of Curvature

PID : Proportionnelle Intégrale Dérivée

IDE: Integrated Development Environment

AC-DC: Direct Current-Alternating-Current

IN/OUT: Entrée(Input)/Sortie(Output)

ICSP: In-Circuit Serial Programmer

SPI: Serial Peripheral Interface

USB: Universal Serial Bus

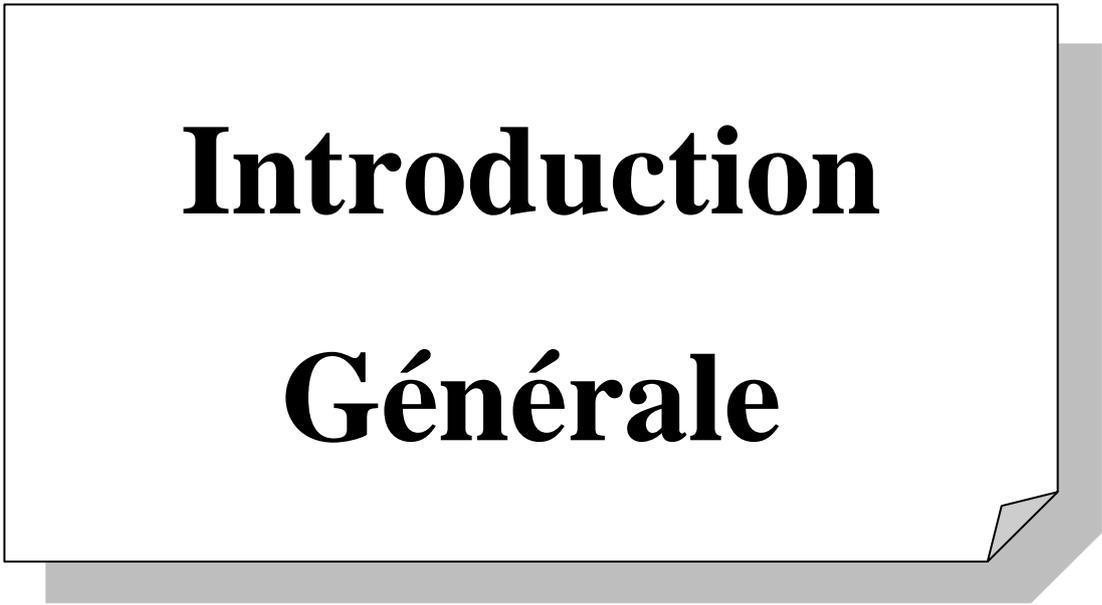
EEPROM:Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory

V_R : La vitesse de motor droite

V_L : la vitesse de motor gauche

E_R : La tension de motor droite

E_L : La tension de motor gauche



Introduction Générale

Introduction Générale

Un robot étend les sens et les capacités de l'homme dans divers environnements. Le besoin de l'homme pour la machine était donc croissant, ce qui a entraîné l'émergence d'une nouvelle science la robotique qui permet de remplacer les êtres humains dans des situations où ils sont incapables d'effectuer le travail, des situations plus dangereuses, des tâches répétitives et difficiles.

La robotique est l'intersection de la science, de l'ingénierie, de la technologie et se consacre à la conception, à la construction et à l'utilisation de robots mécaniques. En général, il s'agit d'entreprendre un système technologique aussi rapidement que possible, avec le moins d'efforts et de coûts possible. Lorsque des machines programmables sont construites pour assister les humains ou émuler leurs actions. La robotique comporte deux grands pôles d'intérêt : la robotique de manipulation (Robotique industrielle) et la robotique mobile.

Les robots ont été conçus à l'origine pour effectuer des tâches répétitives (comme la construction de voitures sur une chaîne de montage, la soudure...), mais ils ont depuis largement dépassé leurs utilisations initiales pour effectuer des tâches dont les types d'applications possibles sont innombrables. Comme l'aide dans le domaine des technologies médicales, l'assistance à la conduite des véhicules peuvent être utilisées dans le cadre de missions de sauvetage dangereuses, largement utilisés dans les environnements industriels pour transporter des produits à titre d'exemple. La plupart du temps, ces tâches sont répétitives et suivent un chemin bien défini, parfois matérialisé par des lignes au sol ou des points de repère artificiels.

Chaque robot a un niveau d'autonomie différent, allant des robots contrôlés par l'homme, qui effectuent des tâches sur lesquelles l'homme a un contrôle total, aux robots entièrement autonomes, qui effectuent des tâches sans aucune influence extérieure.

L'objectif de cette thèse est de concevoir et de construire un robot mobile à entraînement différentiel pour le problème de suivi de ligne. La tâche de base du robot mobile est de suivre une trajectoire souhaitée sans intervention humaine.

Ce mémoire est organisée comme suit:

Après l'introduction, le premier chapitre présentera quelques notions principales sur la robotique mobile.

Ensuite, la modélisation du robot sera faite dans le deuxième chapitre, nous développerons également les modèles cinématiques et dynamiques du robot mobile.

Le troisième chapitre proposera une solution au problème de suivi de trajectoire en utilisant un contrôleur PID.

Le dernier chapitre est consacré à la réalisation d'un prototype du robot basé sur une carte Arduino.

Enfin, une conclusion générale présentera les résultats de ce travail.

Chapitre I :
**Généralités : Applications des
robots suiveur des lignes**

Chapitre I

Généralités : Applications des robots suiveur des lignes

I.1 Introduction

La robotique est l'union d'un groupe de sciences mécaniques, d'électronique et de programmation. Les roboticiens cherchent à faire fonctionner le robot automatiquement, en lui fournissant un ensemble d'appareils qui lui permettent de percevoir l'environnement dans lequel il se trouve et de prendre la décision appropriée et rationnelle dans le même environnement sans intervention humaine.

En fait, les robots ont progressivement envahi différents domaines d'activité. L'industrie est sans aucun doute celle qui profite le plus de cette avancée technologique. Par exemple, les manipulateurs sont la forme de robots la plus largement utilisée, et ils ont été intégrés dans diverses applications, telles que l'industrie automobile. Depuis, les gens ont progressivement pris conscience de l'urgence de disposer de robots mobiles, ce qui est évident pour atteindre cet objectif, les gens ont commencé un large éventail de domaines de recherche.

Aujourd'hui, les robots mobiles sont largement utilisés dans l'industrie (transport de produits), l'agriculture, les travaux publics ou l'exploration spatiale. De plus, il existe une forte tendance à étendre l'environnement dans lequel le robot fonctionne à un environnement de bureau ou à un environnement domestique (robot de service) [06]

Par conséquent, la grande importance de la technologie de la robotique mobile nous a conduit à concevoir un robot mobile qui suit un objectif autonome qui peut suivre un chemin clair incarné par une bande blanche ou noire. Ce projet nous permet de mettre en pratique les plus grandes connaissances théoriques, électroniques, électriques et informatiques acquises au cours des années de formation.

I.2 La définition d'un robot mobile

Le robot est un système automatique mécanisé capable d'effectuer une ou plusieurs tâches, par l'exécution d'un programme, doté de capacités de perception, de décision et d'action qui lui permettent d'agir de manière autonome dans son environnement en fonction de la perception qu'il a

Les robots mobiles sont des robots qui peuvent se déplacer d'un endroit à un autre de manière autonome. Contrairement à la majorité des robots industriels, qui ne peuvent se déplacer que dans un espace de travail spécifique

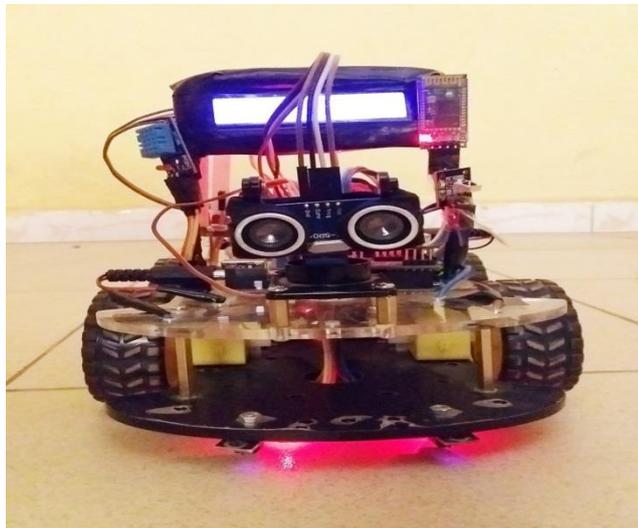


Figure I.1: Robot Mobile Intelligent à détection et évitement d'obstacles

I.3 Classification des robots mobiles

Les robots mobiles peuvent être classés en fonction de l'environnement dans lequel ils travaillent et du dispositif qu'ils utilisent pour se déplacer. La classification la plus intéressante, et la plus utilisée, est celle de leur degré d'autonomie. Ils peuvent être classés comme suit:

I.3.1 Robots mobiles à roues :

les robots mobiles à roues, ce type de robot est actuellement le plus populaire. Compte tenu de la simplicité du mécanisme de locomotion utilisé, cette technique permet, selon la disposition et la taille des roues, de se déplacer dans toutes les directions avec une

accélération et une vitesse importantes, les robots à trois et quatre roues sont souvent les plus courants.

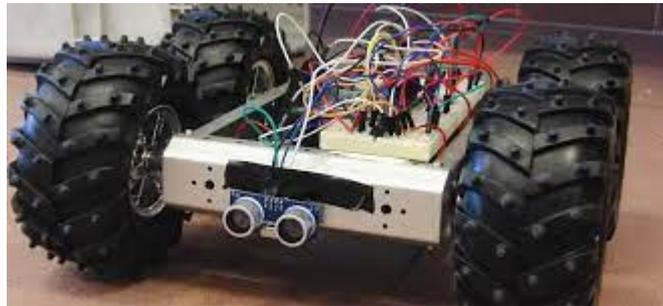


Figure I.2 : Voiture tout terrain (robot mobile à roues)

Nous citerons ici les quatre classes principales de robots à roues

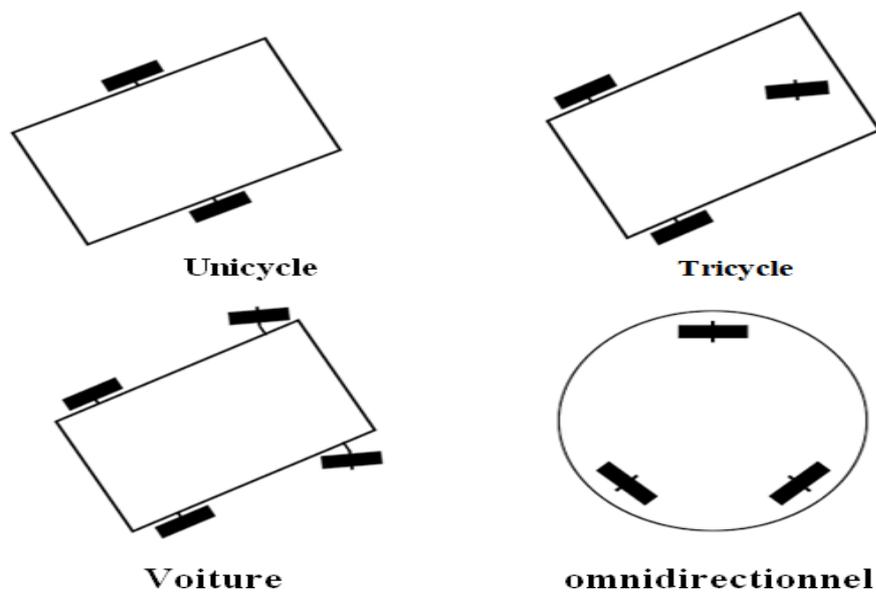


Figure I.3 : Type de robot a roues

I.3.2 Robots mobiles à chenilles :

L'utilisation de la piste offre une bonne adhérence au sol et la possibilité de franchir des obstacles. En ce qui concerne l'adhérence, cette application convient à une utilisation sur des surfaces inégales ou de mauvaise qualité.

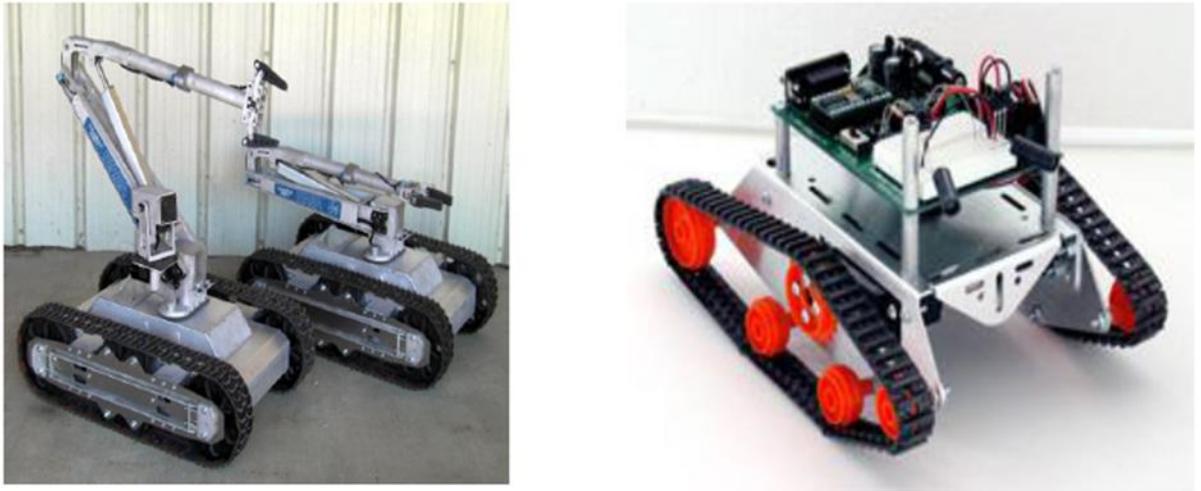


Figure I.4 : Exemples de robots mobiles à chenilles

I.3.3 Robots mobiles à pattes :

Lorsqu'il est difficile, dangereux ou impossible pour des personnes d'accéder au site, le robot mobile à pattes est conçu pour effectuer diverses tâches. Dans ce cas, les jambes mobiles sont la solution au problème de déplacement. Cette solution est universelle car la plupart des animaux terrestres se déplacent de cette manière.



Figure I.5 : Exemples de robots mobiles à pattes

I.3.4 Robots mobiles volants :

Un véhicule aérien sans pilote (UAV) est un avion qui n'a pas de pilote humain à bord. À l'origine, les véhicules aériens sans pilote étaient utilisés pour des vols qui étaient trop risqués pour être effectués par des humains. Bien qu'ils aient été conçus spécifiquement pour un usage militaire, l'utilisation autres domaines, se développent rapidement.



Figure I.6 : Exemple d'un robot volant.

I.3.5 Robots mobiles sous-marins:

Les robots sous-marins sont des véhicules sous-marins qui sont rapides pour acquérir des données et qui ont une grande capacité à protéger tout type de données (physiques, acoustiques ou visuelles). Certains ont été utilisés comme plateformes pour des échantillonneurs ou divers capteurs

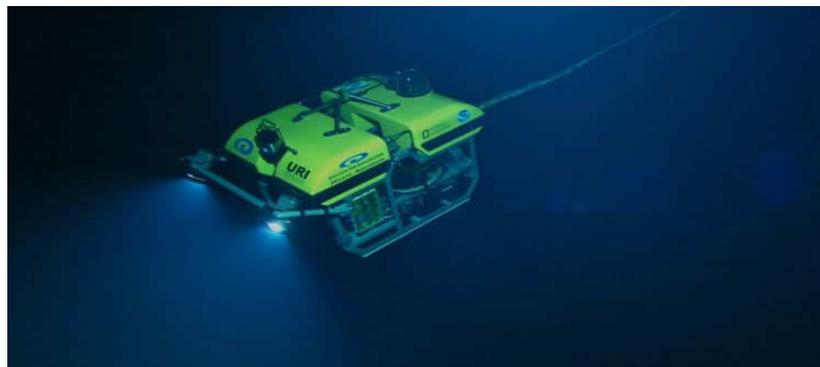


Figure II.7 : Exemple d'un robot sous-marin

I.3.6 Robots mobiles hybrides:

Vise à incorporer des parties animales dans des robots



Figure I.8 : Exemple d'un robot hybride

I.4 La navigation autonome d'un robot mobile

Les robots autonomes sont des machines intelligentes capables d'effectuer des tâches et d'évoluer dans un environnement de manière autonome, sans contrôle ni intervention humaine, en percevant les objets qui les entourent à partir d'informations sensorielles. La perception de l'environnement en robotique est assurée par le programme, les actionneurs et les capteurs qui y sont placés.

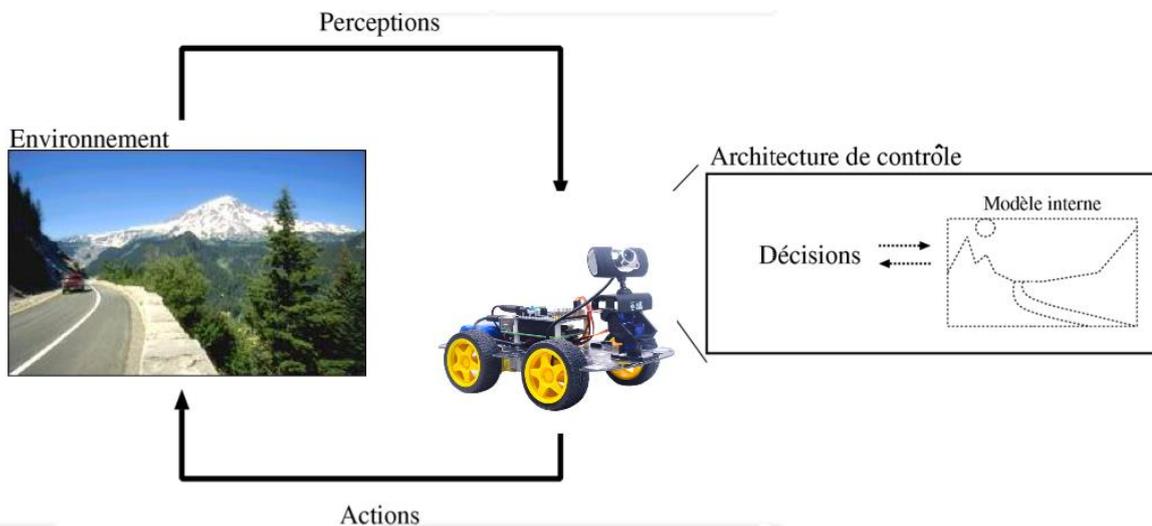


Figure I.9 : La navigation autonome d'un robot mobile

Pour que ces robots puissent accomplir leurs tâches efficacement, ils doivent Les composants clés de l'action autonome sont : la perception, la décision et l'actionnement.

- **Perception** : le robot doit obtenir des informations sur son environnement de fonctionnement grâce à ses capteurs.

- **Décision** : est prend des procédures en fonction de la tâche à accomplir et des informations reçues de l'environnement

- **Actionnement**: Interagissez avec d'autres agents via des boucles de contrôle et effectuez des actions de manière fiable

I.5 Perception

Le concept de perception dans la technologie des robots mobiles implique la capacité du système à collecter, traiter et formater des informations utiles au robot afin qu'il puisse agir dans le monde environnant.

Alors que pour des tâches de manipulation on peut considérer que l'environnement du robot est relativement structure, pour extraire les informations utiles à l'accomplissement de sa tâche, il est nécessaire que le robot dispose de nombreux capteurs mesurant aussi bien son état interne que l'environnement dans lequel il évolue [03]

En robot mobile, il est important de distinguer entre des capteurs extéroceptifs et des capteurs proprioceptifs.

➤ Les capteurs extéroceptifs

Les capteurs extéroceptifs sont utilisés en robotique mobile pour acquérir des informations sur l'environnement proche du robot, par exemple des mesures de distance, d'intensité lumineuse ou d'amplitude sonore.



Figure I.10: Les capteurs extéroceptifs

- **Capteur infrarouge** : Un capteur infrarouge est un détecteur capable de mesurer le rayonnement infrarouge dans la zone qu'il couvre.
- **Capteur ultrason** : est un capteur de distance. Il comprend un émetteur de paquets d'ondes et un récepteur de celui-ci et permet de calculer la distance d'un objet devant lui en comparant les temps d'émission et de réception à calculer de vol de l'écho en fonction de la vitesse de propagation du son.
- **Capteur Laser** : est un appareil qui utilise un faisceau laser afin de déterminer la distance d'un objet opaque. Il fonctionne en envoyant une impulsion laser dans un faisceau étroit vers l'objet et en mesurant le temps que met l'impulsion à rebondir sur la cible et à revenir à l'expéditeur. La distance de l'objet réfléchissant peut être calculée sur la base de la vitesse de propagation de la lumière et du temps de vol. [17]

- **Capteurs à micro-ondes** : sont basés sur le rayonnement de signaux électromagnétiques de l'ordre du gigahertz. Il peut fonctionner dans trois modes différents.[05]

- **Capteurs tactiles**: qui sont le plus souvent utilisés pour des arrêts d'urgence lorsqu'ils rencontrent un obstacle qui n'avait pas été détecté par le reste du système de perception[1]

- **GPS (Global Positioning Systems)** : est un système de localisation basé sur des balises et des satellites, Chaque satellite détecte les récepteurs au sol fixes ou mobiles situés dans sa zone de visibilité et transmet un signal à chaque satellite à une période fixe, qui contient des informations telles que son identité, l'heure de transmission du signal et les paramètres qui définissent son orbite donc sa position.

➤ **Les capteurs proprioceptifs**

Les capteurs proprioceptifs fournissent des données sur l'état interne du robot par intégration des informations élémentaires sur les paramètres cinématiques du système mobile.[1.5]

On peut regrouper les capteurs proprioceptifs en deux familles (Table I.1) :

	Nom de capteur	Utilisation
Capteurs de déplacement	Les odomètres	Pour connaître l'itinéraire parcouru et positionner le robot
	Les accéléromètres	Permet de mesurer l'accélération linéaire
	Le radar doppler	Pour mesurer la vitesse linéaire
Capteurs d'attitude	Les gyroscopes Le géomètre Le gyrocompas	-Mesure de l'angle de station de la trajectoire du système mobile -Mesure une vitesse angulaire -Mesure le cap
	Les magnétomètres	Pour indiquer l'orientation de système mobile

Table I.1. Les types de capteurs proprioceptifs

I.6 La navigation autonome d'un robot mobile

Le développement des robots mobiles consiste principalement à effectuer différentes tâches, la navigation est considérée comme une tâche de base, car le succès de toute tâche nécessite le bon fonctionnement de la navigation, peut être définie comme la recherche des réponses aux trois questions :

1. "Où suis-je ?" (Localisation)
2. "Où vais-je ?" (Cartographie)
3. "Comment puis-je m'y rendre ?" (Navigation)

Pour un robot mobile autonome, ces questions renvoient aux tâches de localisation, de cartographie et de planification de la trajectoire. En outre, les robots doivent percevoir les objets qui les entourent sur la base d'informations sensorielles.(cour robotique)

I.6.1 La navigation :

La navigation est généralement définie comme le guidage du véhicule d'un point à un autre. Dans les robots mobiles, la signification du terme est élargie pour inclure tous les processus qui permettent au robot mobile de déterminer et d'exécuter les mouvements nécessaires pour atteindre une cible donnée. La robotique mobile autonome vise plus spécifiquement à concevoir des systèmes capables de se déplacer de manière autonome.[2]

I.6.2 Localisation:

La principale caractéristique d'un robot mobile est sa capacité à se déplacer d'un point à un autre. Pour ce faire, il est nécessaire de connaître sa position par rapport à l'espace de référence définissant le point source .

Quel que soit le capteur utilisé, la localisation basé sur un modèle doit passer par quatre étapes principales: l'obtention des données brutes du capteur, l'extraction des informations pertinentes, la mise en correspondance des données observées avec les données du modèle et l'estimation de la position et de la direction

dans la plupart des applications de robots mobiles, deux méthodes de base d'estimation de la position sont utilisées conjointement :

- **Localisation relatif** est généralement basé en mesurant tout simplement les distances parcourues et les directions empruntées depuis sa position initiale. (c'est-à-dire la surveillance des tours de roue pour calculer le décalage par rapport à une position de départ connue) [01]
- **Localisation absolue:** La position est calculée par rapport à des repères fixes grâce à des capteurs extéroceptifs. Ceci requiert souvent la connaissance de l'environnement. Les différentes techniques peuvent être distinguées par la nature des repères utilisés ou par la méthode de calcul. Selon la nature des repères utilisés, les approches les plus connues sont la localisation grâce aux compas magnétiques, la localisation grâce à des repères actifs, la localisation grâce à des repères passifs et la localisation basée sur le modèle. Selon les techniques de calcul utilisées on distingue, entre autres, les méthodes basées sur la trilatération (ou multilatération), les méthodes basées sur la triangulation.[04]

I.6.3 La cartographie (Mapping) :

L'objectif pour un robot autonome est d'être capable de construire une carte ou un plan et de s'y localiser obtenue en traitant les données de ses capteurs

On peut distinguer deux représentations de l'espace de navigation:

- **La représentation métrique:** est le plus courant, un espace à deux dimensions dans lequel il place les objets. qui placés avec des coordonnées précises. Cette représentation est très utile, mais elle est sensible au bruit et il est difficile de calculer les distances avec précision.

- **La représentation topologique:** ne considère que les lieux et les relations entre eux. par des formes de graphe et des nœuds.

I.6.4 Le suivi de trajectoire:

Le suivi de la trajectoire est une tâche importante du robot mobile. La trajectoire comprend les commandes des actionneurs du système informatique pour exécuter le mouvement planifié.

I.6.5 L'évitement d'obstacles :

L'évitement d'obstacles consiste à atteindre un objectif de contrôle soumis à des contraintes de position de non-intersection ou de non-collision Il nécessite des capteurs

I.7 Suivi de lignes :

Le suivi de lignes est une tâche importante du robot mobile. Le robot suit une ligne noire sur fond blanc dessinée sur le sol qui représente la trajectoire à suivre. Pour ce faire, le robot a besoin de deux capteurs infrarouges qui distinguent la ligne noire du fond blanc

Les robots suiveurs de lignes sont utilisés dans les compétitions, et aujourd'hui leurs applications se sont étendues au secteur industriel et aux transports publics, et elles ne sont plus limitées. Ils sont également utilisés dans les hôpitaux, les musées, les aéroports, etc.

I.7.1 Un véhicule à guidage automatique (VGA) :

Le véhicule à guidage automatique est une version plus développée du robot suiveur de ligne mais repose sur le même principe. Une de leur application en industrie est de pouvoir transporter de lourdes marchandises d'un point A à un point B

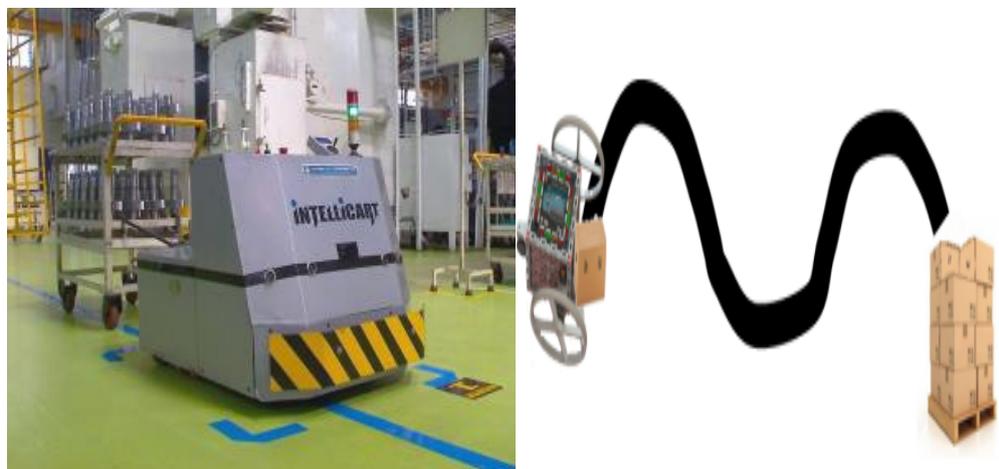


Figure I.11 : Un VGA

I.7.2 robot serveur restaurant:

le robot serveur déplace dans le restaurant pour apporter les plats aux clients déjà assis. il suit une trace au sol pour se déplacer dans la salle.



Figure I.12 : Gauche: Au Chine, Robots serveurs dans un restaurant, Droite: Au Japon, le café servi par des robots

I.7.3 Les jeux pour enfants:

Le circuit magique voiture est un jeu dans lequel l'enfant dessine lui même le chemin qu'il veut que la voiture suive grâce à un feutre noir sur un fond clair. La voiture suit le circuit grâce aux détecteurs optiques situé sous le jouet. Ces jouets sont semblables au robot que nous allons fabriquer.



Figure I.13: Le jeu de circuit magique

I.8. Conclusion :

La robotique s'intéresse à tous les aspects de l'ingénierie, de la construction et de l'exploitation de robots.

Dans ce chapitre, Nous avons donné un aperçu sur la robotique et sur la robotique mobile en particulier, Et nous avons mentionné les types de robots et les constituants de robot et certaines applications des robots mobiles dans la vie quotidienne, et on a traité l'importance de la perception pour le robot mobile qui s'accomplit par les capteurs, qui sont classifiés en deux catégories selon qu'ils mesurent l'état du robot lui-même (capteurs proprioceptifs) ou l'état de son environnement (capteurs extéroceptifs) toutes les étapes fondamentales à la navigation autonome ont été présentées (La navigation, Localisation, La cartographie, Le suivi de trajectoire, L'évitement d'obstacles). Les robots suiveurs de ligne sont utilisés dans plusieurs applications de la vie quotidienne.

Dans le chapitre suivant, nous établirons le modèle cinématique et dynamique du robot à entraînement différentiel.

Chapitre II :

Modélisation d'un robot à entraînement différentiel

Chapitre II

Modélisation d'un robot à entraînement différentiel

II.1 Introduction

Les robots mobiles à roues sont les plus largement utilisés dans tous les domaines, et sont principalement utilisés en raison de leur faible consommation d'énergie, de leur faible complexité mécanique et de leur capacité de mouvement rapide, et sont donc extrêmement importants dans le domaine de la recherche et du développement, et lorsque des vitesses élevées ou des charges lourdes sont nécessaires, il est nécessaire de penser également à la dynamique du robot, c'est-à-dire à la modélisation mathématique.

La modélisation mathématique est une étape très importante pour la commande des robots. Deux types de modèles sont généralement utilisés lors de la commande, à savoir : le modèle cinématique et le modèle dynamique. D'après la littérature, on rencontre plusieurs types de robots à savoir : les robots de type unicycle, les robots de type tricycle, et les robots de type voiture. Dans le cadre de notre travail, nous utiliserons un robot de type unicycle à cause de sa simplicité de construction et de ses propriétés cinématiques intéressantes. [08]

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation cinématique et dynamique du robot à entraînement différentiel et nous vérifierons la validité de modélisation par la simulation

II.2 Présentation du robot

Les robots mobiles à entraînement différentiel utilisant deux roues motrices sont les robots mobiles les plus courants. Ce sont des robots actionnés par deux roues motorisées, mécaniquement et électriquement indépendantes et comportant éventuellement un certain nombre de roues folles assurant son équilibre (Figure II.1). Ils sont appelés en anglais Differential Drive Mobile Robots (DDMR).

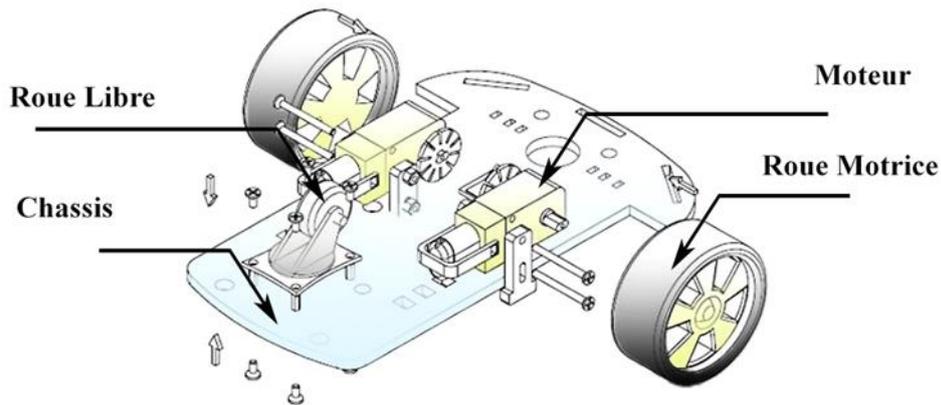


Figure II.1 : Robot mobile de type unicycle (DDMR).

II.3 Modélisation Cinématique

La cinématique est l'étude la plus fondamentale du comportement des systèmes mécaniques. En robotique mobile, nous devons comprendre le comportement mécanique du robot à la fois pour concevoir des robots mobiles adaptés aux tâches à accomplir et pour comprendre comment créer un logiciel de contrôle pour une instance du matériel du robot mobile [07].

Modèle de mouvement

La position d'un robot mobile différentiel peut être décrite par deux systèmes de coordonnées, le système de coordonnées inertielles et le système de coordonnées du robot. Comme le montre la figure 4, un système de coordonnées inertielles est un cadre global qui est fixé dans l'environnement dans lequel le robot se déplace. Il s'agit d'un cadre de référence. Le système de coordonnées du robot est un cadre local attaché au robot et se déplaçant avec lui. Comme le montre la figure 4, le système de coordonnées inertielles est désigné par $\{X_l, Y_l\}$ et le système de coordonnées du robot par $\{X_r, Y_r\}$. Le point C, qui est le point central de l'axe entre les deux roues, est l'origine du robot [07].

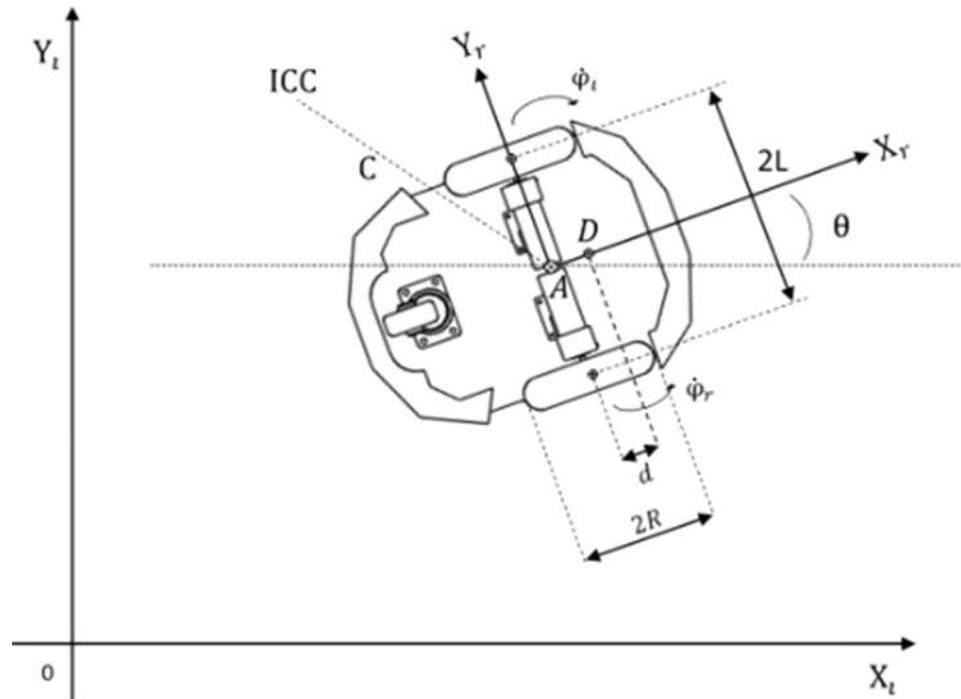


Figure II.2 : Position du robot

Figure II.2 : présente le robot mobile de type uni cycle dans les repères fixe et mobile.

A : est le point milieu de l'axe des roues.

2R : représente le diamètre de la roue du robot.

2L : représente la largeur du robot.

$\dot{\phi}_r$ et $\dot{\phi}_l$: représentent respectivement la vitesse de rotation de la roue droite et de la roue gauche.

θ : est l'angle d'orientation du robot.

d : est la distance entre le point A et le point C.

La position du robot est décrite par $C \{X, Y\}$, lorsqu'elle est exprimée en coordonnées cartésiennes du cadre d'inertie. Le cadre du robot et le cadre d'inertie peuvent être reliés à l'aide d'une matrice de transformation de base.

La transformation des vitesses entre le repère global et le repère local est donnée comme suite :

$$\dot{X}_t = R(\theta)\dot{X}_r \quad (\text{II.1})$$

Où, $R(\theta)$ est la matrice de transformation qui peut s'écrire:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Comme indiqué dans la Figure 3 pour le robot sous, le mouvement vers l'avant est obtenu lorsque les deux roues sont entraînées à la même vitesse. Tourner à gauche est obtenu en conduisant la roue droite à un taux plus élevé que la roue gauche. Conduire la roue gauche à un taux plus élevé entraîne un virage à droite. Lorsqu'une roue tourne en avant et que l'autre tourne en sens inverse, le robot tourne sur place.

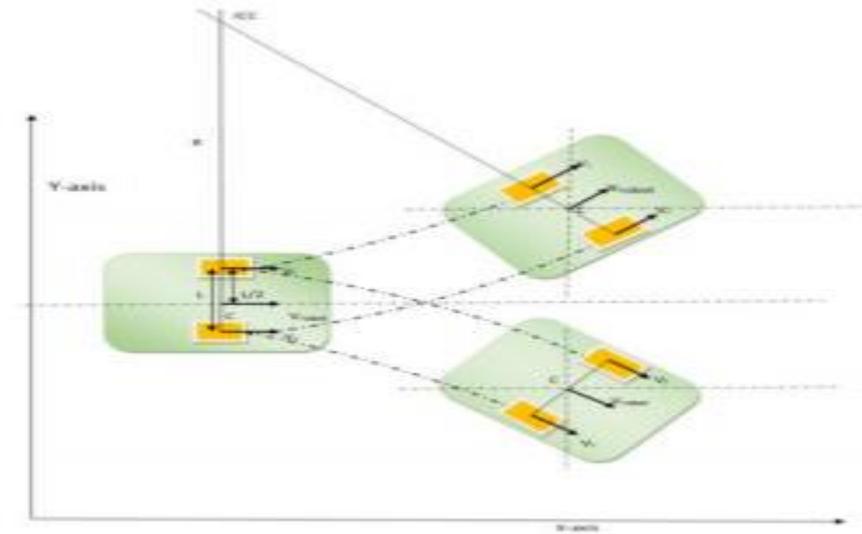


Figure II.3 : Le modèle de mouvement du robot

II.4 Le modèle cinématique:

Nous considérons les forces agissant sur la roue droite et gauche, et qui résultent respectivement des deux vitesses linéaires, V_R et V_L (Figure II.3), la vitesse du robot est déterminée par la vitesse linéaire V et la vitesse angulaire ω .

Si la roue droite tourne alors que la roue gauche ne contribue à rien et est immobile, elle se déplacera instantanément avec la moitié de la vitesse, puisque le point c 'est à mi-chemin entre les deux roues. Nous pouvons définir cela dans la relation suivante:

$$V_{CR} = \frac{V_R}{2} \quad (\text{II.3})$$

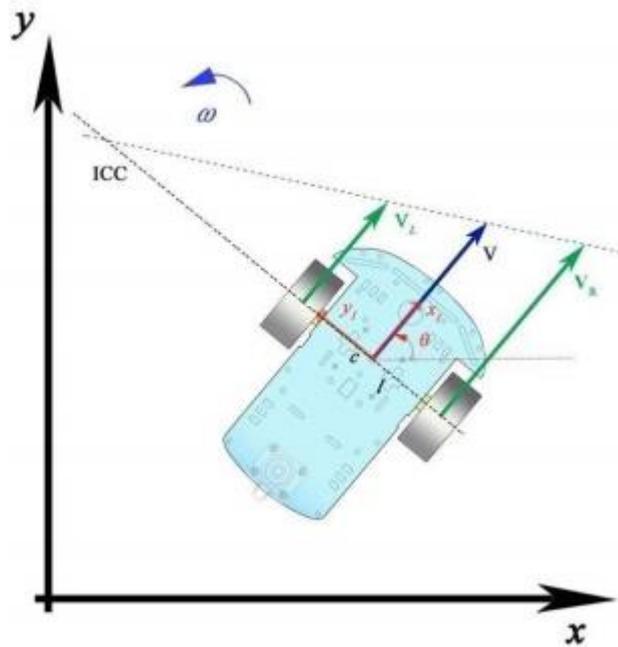


Figure II.4 : Les forces sur les roues : une représentation équivalente

Et l'inverse est vrai, si la roue gauche tourne alors que la roue droite ne contribue à rien et est à l'arrêt, elle se déplacera instantanément à la moitié de la vitesse:

$$V_{CL} = \frac{V_L}{2} \quad (\text{II.4})$$

En ajoutant les deux dernières relations, nous pouvons calculer la vitesse V du point c

$$V = V_{cR} + V_{cL} = \frac{V_R + V_L}{2} \quad (\text{II.5})$$

De la même manière, nous pouvons calculer la vitesse angulaire ω , considérons la roue droite. Si la roue droite tourne seule, le robot pivote autour de la gauche. La vitesse de rotation en c peut être calculée car la roue se déplace instantanément le long de l'arc d'un cercle de rayon $2l$:

$$\omega_{cR} = \frac{V_R}{2l} \quad (\text{II.6})$$

De même pour la roue gauche, si la roue gauche tourne seule, le robot pivote autour de la droite

$$\omega_{cL} = \frac{V_L}{2l} \quad (\text{II.7})$$

En ajoutant les deux dernières relations, nous pouvons calculer la vitesse angulaire ω du point c :

$$\omega = \omega_{cR} + \omega_{cL} = \frac{V_R + V_L}{2l} \quad (\text{II.8})$$

Nous avons obtenu les équations précédentes dans le cas où l'une des roues du robot est arrêtée et l'autre en rotation. Et nous verrons le cas où les deux roues sont en rotation.

En faisant varier la vitesse de chaque roue, le robot peut effectuer un mouvement de roulement; ce mouvement est effectué autour d'un point commun appelé Instantaneous Center of Curvature (ICC) qui se trouve le long de l'axe commun des roues gauche et droite (Figure II.3). La vitesse angulaire ω autour de l'ICC est la même pour les deux roues, nous pouvons écrire l'équation suivante :

$$\omega = \frac{V_R}{R+l} = \frac{V_L}{R-l} \quad (\text{II.9})$$

De cela nous obtenons :

$$V_R = \omega(R + l) \quad (\text{II.10})$$

$$V_L = \omega(R - l) \quad (\text{II.11})$$

Où, V_R est la vitesse de translation de la roue droite, V_L est la vitesse de translation de la roue gauche, R est la distance de l'ICC au centre du robot et l est le demi de distance entre la roue droite et la roue gauche.

On soustrait l'équation (II.10) de l'équation (II.11), nous obtenons la vitesse angulaire :

$$\omega = \frac{V_R - V_L}{2l} \quad (\text{II.12})$$

En ajoutant les mêmes deux équations, nous obtenons :

$$V_R + V_L = 2\omega R \quad (\text{II.13})$$

Donc à partir l'équation (II.5) la vitesse de translation :

$$V = \frac{V_R + V_L}{2} = \omega R \quad (\text{II.14})$$

À partir de là, nous pouvons calculer R :

$$R = \frac{V}{\omega} = l \frac{V_R + V_L}{V_R - V_L} \quad (\text{II.15})$$

Alors que les coordonnées de l'ICC sont:

$$ICC = \begin{bmatrix} ICC_x \\ ICC_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R - R \cos \theta \\ y_R - R \sin \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

La cinématique avant dans le repère local est donnée par :

$$\begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2l} & -\frac{1}{2l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ V_L \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

La cinématique inverse est donnée par :

$$\begin{bmatrix} V_R \\ V_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l \\ 1 & -l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Puisque la vitesse de translation V est toujours dans la direction x_l , alors $x_l = V$ et $y_l = 0$. La cinématique avant peut s'écrire:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_l \\ \dot{y}_l \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{2l} & -\frac{1}{2l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ V_L \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

A partir l'équation (II.2), la transformation entre le repère local et le repère global peut être donnée par:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_G^l \\ \dot{y}_G^l \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cos \theta & \frac{1}{2} \cos \theta \\ \frac{1}{2} \sin \theta & \frac{1}{2} \sin \theta \\ \frac{1}{2l} & -\frac{1}{2l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ V_L \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

V_R et V_L sont les entrées du contrôleur, où:

$$\begin{aligned} V_R &= \omega_R r \\ V_L &= \omega_L r \end{aligned} \quad (\text{II.21})$$

Donc, le modèle cinématique du robot est donné par:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_G^l \\ \dot{y}_G^l \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \theta & \frac{r}{2} \cos \theta \\ r \sin \theta & r \sin \theta \\ \frac{r}{2l} & -\frac{r}{2l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

II.5 La modélisation dynamique:

La modélisation dynamique consiste à dériver des équations qui décrivent explicitement la relation entre la force et le mouvement dans un système, la dynamique est l'étude du mouvement d'un système mécanique en tenant compte des différentes forces qui affectent son mouvement [09]

Pour pouvoir commander un robot comme l'exige son fonctionnement, le modèle dynamique du robot à entraînement différentiel est essentiel pour la conception de l'algorithme de commande et la simulation du mouvement.

$$\begin{cases} \sum F_i = m\dot{V} \\ \sum M_i = j\dot{\omega} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

$$\begin{cases} F + F_s = m\dot{V} \\ M_r + M_l + M_s = I\dot{\omega} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Où, $m[\text{kg}]$ et $I [\text{kg.m}^2]$ sont la masse et l'inertie de rotation du robot.

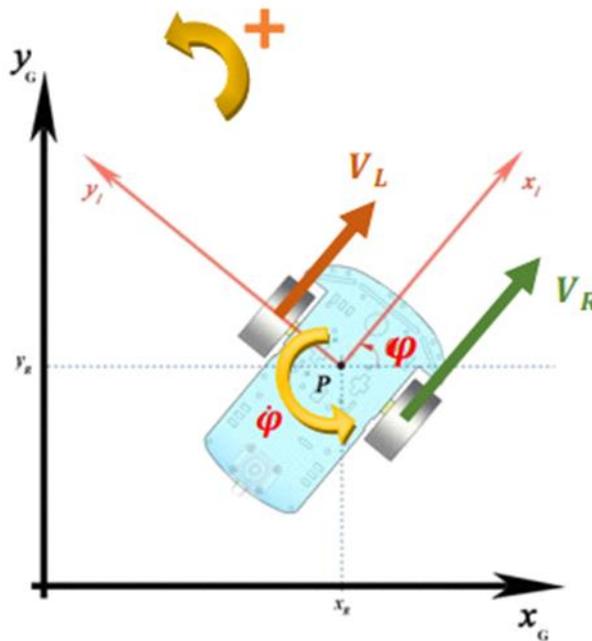


Figure II.5 : Schéma des vitesses appliquées au robot

$$\begin{cases} \frac{1}{2}F_R + \frac{1}{2}F_L - k_v V = m\dot{V} \\ F_r l - F_l l - k_w \omega = I\dot{\omega} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

k_v est le coefficient de résistance au mouvement linéaire; et k_w est le coefficient de résistance au mouvement rotatif.

La vitesse linéaire et la vitesse angulaire sont données par:

$$\begin{cases} V = \frac{1}{2}V_R + \frac{1}{2}V_L \\ \omega = \frac{1}{2l}V_R - \frac{1}{2l}V_L \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

En prenant la dérivée temporelle de l'équation (II.25), on obtient:

$$\begin{cases} \dot{V} = \frac{1}{2}\dot{V}_R + \frac{1}{2}\dot{V}_L \\ \dot{\omega} = \frac{1}{2l}\dot{V}_R - \frac{1}{2l}\dot{V}_L \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Substituons (II.27) dans (II.25), on obtient :

$$\begin{cases} \frac{1}{2}F_R + \frac{1}{2}F_L - k_v V = \frac{m}{2}\dot{V}_R + \frac{m}{2}\dot{V}_L \\ F_R l - F_L l - k_\omega \omega = \frac{I}{2l}\dot{V}_R - \frac{I}{2l}\dot{V}_L \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Alors,

$$\begin{cases} F_R + F_L = m\dot{V}_R + m\dot{V}_L + k_v V_R + k_v V_L \\ F_R - F_L = \frac{I}{2l^2}\dot{V}_R - \frac{I}{2l^2}\dot{V}_L + \frac{k_\omega}{2l^2}V_R - \frac{k_\omega}{2l^2}V_L \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

On résout l'équation (II.29), on obtient:

$$\begin{cases} F_R = \left(\frac{2l^2 m + I}{4l^2}\right)\dot{V}_R + \left(\frac{2l^2 m - I}{4l^2}\right)\dot{V}_L + \left(\frac{2l^2 k_v + k_\omega}{4l^2}\right)V_R + \left(\frac{2l^2 k_v - k_\omega}{4l^2}\right)V_L \\ F_L = \left(\frac{2l^2 m - I}{4l^2}\right)\dot{V}_R + \left(\frac{2l^2 m + I}{4l^2}\right)\dot{V}_L + \left(\frac{2l^2 k_v - k_\omega}{4l^2}\right)V_R + \left(\frac{2l^2 k_v + k_\omega}{4l^2}\right)V_L \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Maintenant, les relations entre les forces de traction et les couples des roues $[T_{wR}, T_{wL}]$ en [N. m] peuvent être données:

$$\begin{cases} T_{wR} = I_w \left(\frac{\dot{V}_R}{r}\right) + f_w \left(\frac{V_R}{r}\right) + F_R r \\ T_{wL} = I_w \left(\frac{\dot{V}_L}{r}\right) + f_w \left(\frac{V_L}{r}\right) + F_L r \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

Où $I_w [kg.m^2]$ est le moment d'inertie des roues; $f_w [N.s.m^{-1}]$ est le coefficient de frottement visqueux, et $r[m]$ est le rayon de la roue. $\left(\frac{V_R}{r}, \frac{V_L}{r}\right)$ et $\left(\frac{\dot{V}_R}{r}, \frac{\dot{V}_L}{r}\right)$ sont respectivement les vitesses angulaires et les accélérations angulaires des roues.

La relation entre le couple de roue et le couple moteur $[T_{mR}, T_{mL}]$ en [N.m] est donnée comme suit:

$$\begin{cases} T_{mR} = I_m \left(n \frac{\dot{V}_R}{r}\right) + f_m \left(n \frac{V_R}{r}\right) + \frac{T_{wR}}{n} \\ T_{mL} = I_m \left(n \frac{\dot{V}_L}{r}\right) + f_m \left(n \frac{V_L}{r}\right) + \frac{T_{wL}}{n} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

Où $I_m [kg.m^2]$ est le moment d'inertie du moteur, $f_m [N.s.m^{-1}]$ est le frottement visqueux du

moteur, et n est le rapport d'engrenage entre la roue et le moteur. $(n\frac{V_R}{r}, n\frac{V_L}{r})$ et $(n\frac{\dot{V}_R}{r}, n\frac{\dot{V}_L}{r})$ sont respectivement les vitesses angulaires et les accélérations angulaires des moteurs.

En remplaçant l'équation (II.31) dans (II.32), nous obtenons:

$$\begin{cases} T_{mR} = \left(nI_m + \frac{I_w}{n}\right)\frac{\dot{V}_R}{r} + \left(nf_m + \frac{f_w}{n}\right)\frac{V_R}{r} + \frac{F_R r}{n} \\ T_{mL} = \left(nI_m + \frac{I_w}{n}\right)\frac{\dot{V}_L}{r} + \left(nf_m + \frac{f_w}{n}\right)\frac{V_L}{r} + \frac{F_L r}{n} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Substituons les forces de l'équation (II.30) dans l'équation précédente (II.33), on obtient après l'arrangement:

$$(\text{II.34}) \quad \begin{cases} T_{mR} = \left(\frac{n^2 I_m + I_w}{nr} + \frac{2l^2 mr + Ir}{4l^2 n}\right)\dot{V}_R + \left(\frac{n^2 f_m + f_w}{nr} + \frac{2l^2 k_v r + k_\omega r}{4l^2 n}\right)V_R + \left(\frac{2l^2 mr - 1r}{4l^2 n}\right)\dot{V}_L + \left(\frac{2l^2 k_v r - k_\omega r}{4l^2 n}\right)V_L \\ T_{mL} = \left(\frac{n^2 I_m + I_w}{nr} + \frac{2l^2 mr + Ir}{4l^2 n}\right)V_L + \left(\frac{n^2 f_m + f_w}{nr} + \frac{2l^2 k_v r + k_\omega r}{4l^2 n}\right)V_L + \left(\frac{2l^2 mr - lr}{4l^2 n}\right)\dot{V}_R + \left(\frac{2l^2 k_v r - k_\omega r}{4l^2 n}\right)V_R \end{cases}$$

Nous avons modélisé la partie mécanique du robot décrite par l'équation (II.24) qui est la dynamique du robot qui relie le couple moteur à la vitesse des roues. L'étape suivante consiste à modéliser la partie électrique des moteurs du robot.

Pour un moteur à courant continu, nous avons:

$$\begin{cases} L_a \frac{di_{aR}}{dt} + R_a i_{aR} + k_E \left(n\frac{V_R}{r}\right) = E_R \\ L_a \frac{di_{aL}}{dt} + R_a i_{aL} + k_E \left(n\frac{V_L}{r}\right) = E_L \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

E_R et E_L [Volts] sont les tensions d'entrée des moteurs, i_a [A] est le courant d'induit, L_a [Henries] est l'inductance d'induit, R_a [Ω] est la résistance d'induit, k_E [V_s/rad] est la constante de force électromotrice arrière du moteur.

Puisque l'inductance du moteur est omise, car elle est petite et généralement ignorée dans la dynamique du robot, on peut négliger la dynamique du circuit électrique du moteur, $L_a \frac{di_a}{dt} = 0$, ce qui conduit à:

$$K_2 = \left(\frac{2ml^2r - Ir}{4l^2n} \right) \quad (\text{II.43})$$

$$K_3 = \left(\frac{n^2 f_m + f_w}{nr} + \frac{2l^2 k_v r + k_\omega r}{4l^2 n} + \frac{k_m k_E n}{R_a r} \right) \quad (\text{II.44})$$

$$K_4 = \left(\frac{2l^2 k_v r - k_\omega r}{4l^2 n} \right) \quad (\text{II.45})$$

II.6 Simulation :

Les deux modèles du robot ont été construits sur l'environnement Simulink MATLAB. La cinématique du robot est donnée par la Figure II.6.

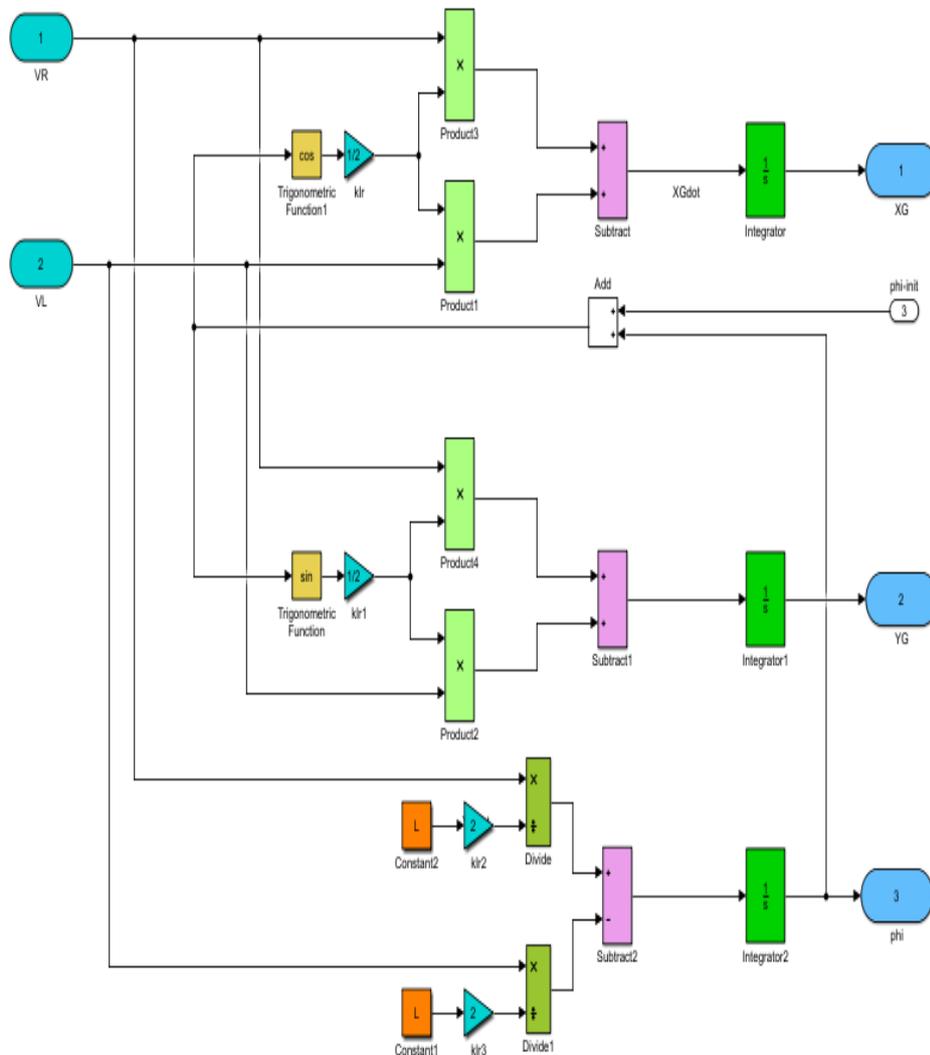


Figure II.6. La cinématique du robot sur SIMULINK

La dynamique du robot est donnée dans la Figure II.7.

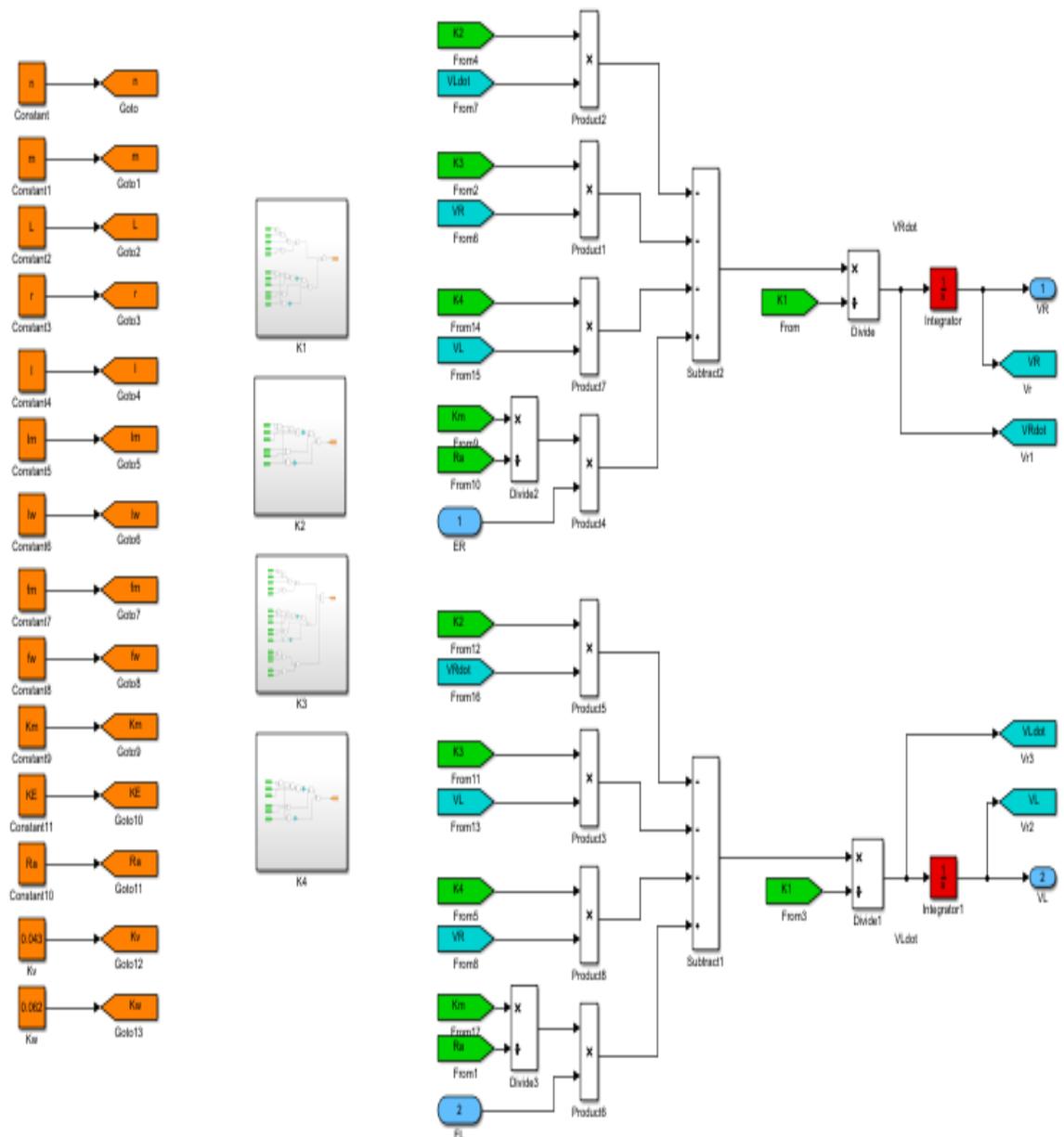


Figure II.7. La dynamique du robot sur SIMULINK

• Réponse indicielle

Pour tracer la réponse indicielle du système à un échelon, on applique aux deux entrées du modèle cinématique et dynamique deux échelons, et on tracera les sorties. Les paramètres du robot sont donnés dans la Table II.2:

n	Le rapport d'engrenage entre la roue et le moteur	10	/
M	La masse du robot	0.8	[kg]
L	L'inductance d'induit	0.1	[Henries]
r	Le rayon de la roue	0.04	[m]
I	L'inertie de rotation du robo	4.6e-3	[kg.m ²]
I_m	Le moment d'inertie du moteur	2.7e-7	[kg.m ²]
I_w	Le moment d'inertie des roues	8e-7	[kg.m ²]
f_m	Le frottement visqueux de roue	5e-8	[N.s.m ⁻¹]
f_w	Le frottement visqueux du moteur	9e-8	[N.s.m ⁻¹]
k_m	constante de force électromotrice	0.0144	[N.m/A]
k_E	constante de force électromotrice	0.0145	[V _s /rad]
R_a	La résistance d'induit	1	[Ω]
k_v	Le coefficient de résistance au mouvement linéaire	0.043	/
k_w	Le coefficient de résistance au mouvement rotatif	0.062	/

Table II.2 : Les paramètres du robot

• Réponse indicielle du modèle cinématique

Appliquons aux deux entrées du modèle cinématique d'entrées comme il est indiqué à la Figure II.8 . Le robot est initialement au point $(X_G, Y_G, \varphi) = (0m, 0m, 0^\circ)$.

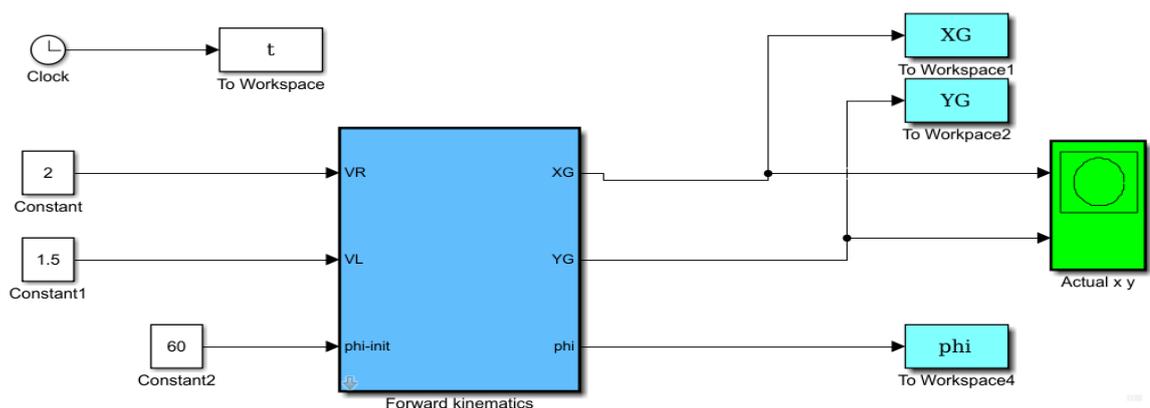


Figure II.8 : Modèles de la réponse indicielle de la cinématique du robot sur SIMULINK

On applique la même valeur de vitesse aux deux entrées du robot (V_R, V_L), les résultats obtenus sont donnés dans par la Figure II.9. Le robot marche en ligne droite sans changer son orientation initiale $\varphi = 0$

la Figure II.10. Le robot marche en ligne droite sans changer son orientation initiale $\varphi = \frac{\pi}{3}$ rad.

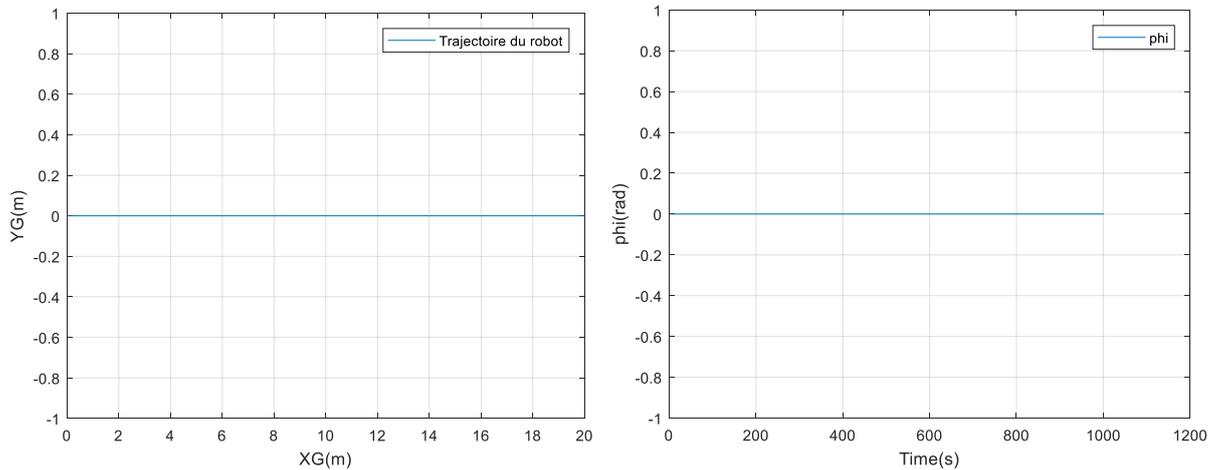


Figure II.9. La réponse indicielle ($V_R=2\text{m/s}$ et $V_L=2\text{m/s}$ avec $\varphi = 0$)

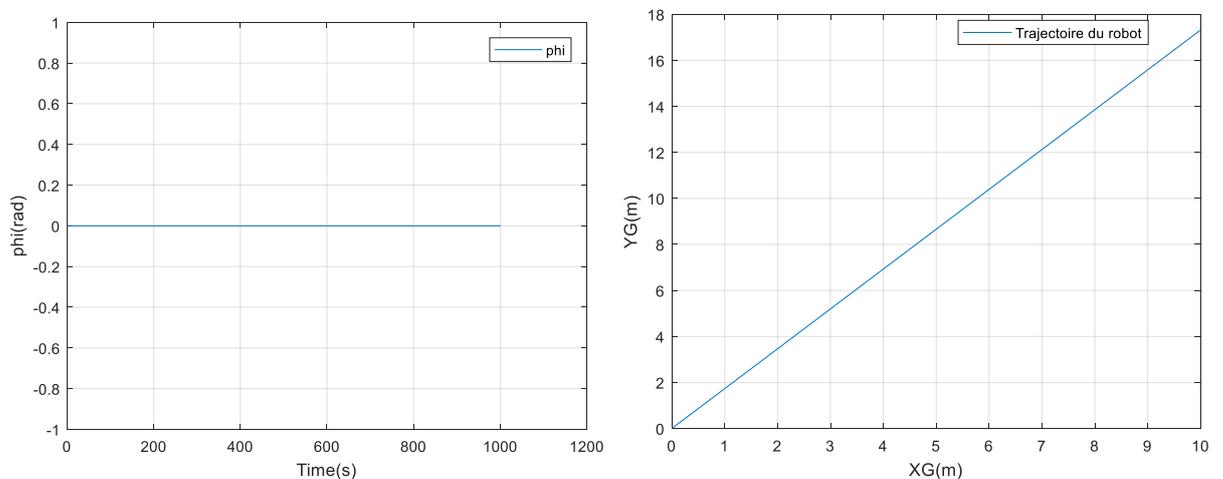


Figure II.10. La réponse indicielle ($V_R = 2\text{m/s}$ et $V_L = 2\text{m/s}$ avec $\varphi = \frac{\pi}{3}$ rad)

Les résultats obtenus de la Figure II.9 et 10 montrent que le robot marche également en ligne droite.

Maintenant, Nous appliquons des valeurs différentes aux entrées du modèle ($V_R = 2\text{ m/s}$ et $V_L = 0.6\text{ m/s}$) avec $\varphi = \frac{\pi}{3}$ rad.

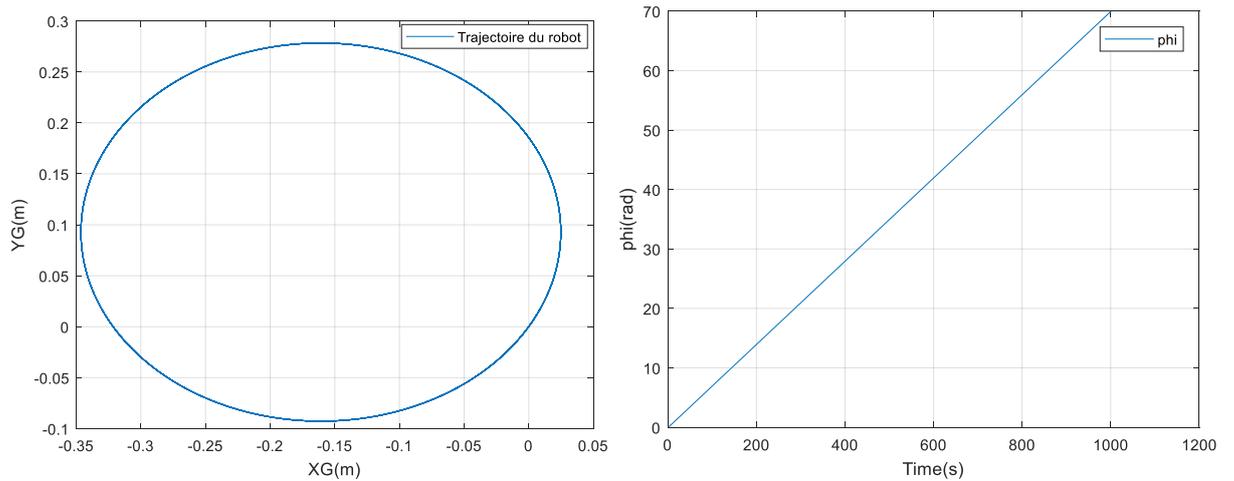


Figure II.11. La réponse indicielle ($V_R = 2\text{m/s}$ et $V_L = 0.6\text{m/s}$ avec $\varphi = \frac{\pi}{3}$ rad) le robot dessinera un cercle et l'orientation augmentera linéairement comme indiqué sur la Figure II.11.

• Réponse indicielle du modèle dynamique

De la même manière, différents types d'entrées sont appliqués au système dynamique pour le tester (Figure II.12).

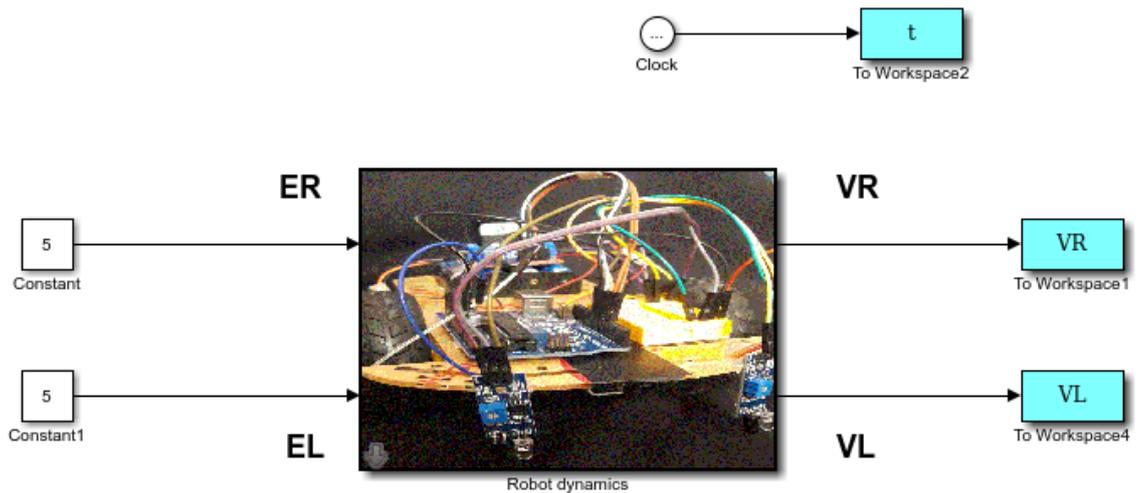


Figure II.12.Modèle de la réponse indicielle de la dynamique du robot sur SIMULINK

Les résultats sont données dans les Figures II.13 et II.14.

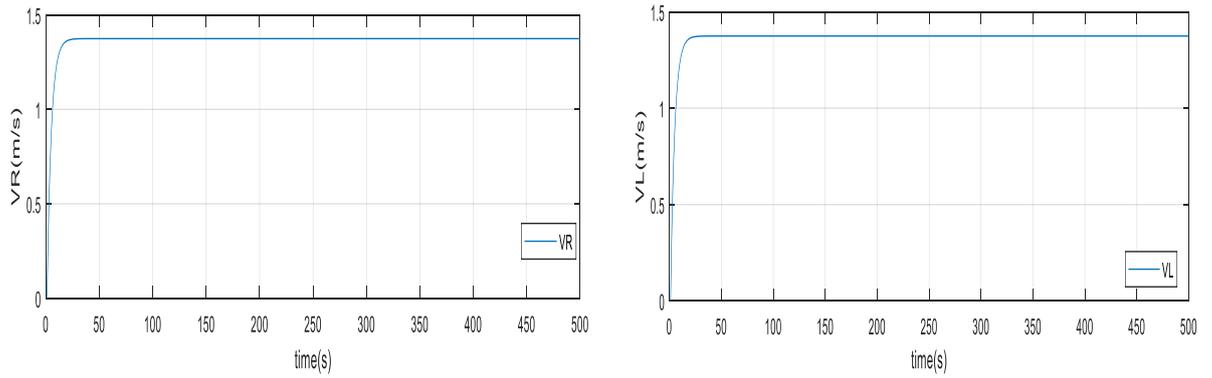


Figure II.13. La réponse indicielle ($E_R = 5V$ et $E_L = 5V$)

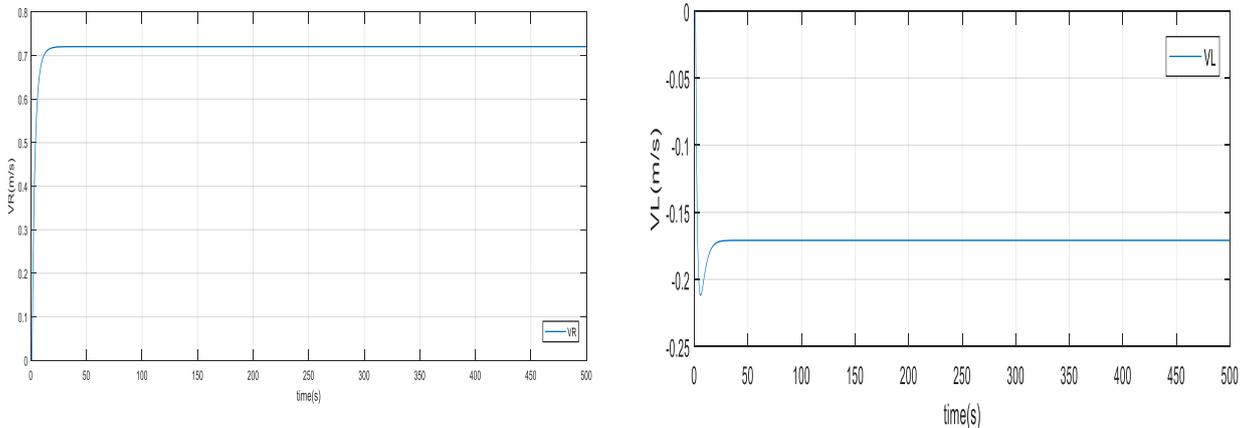


Figure II.14. La réponse indicielle ($E_R = 3V$ et $E_L = -1V$)

• Réponse indicielle du modèle cinématique et dynamique

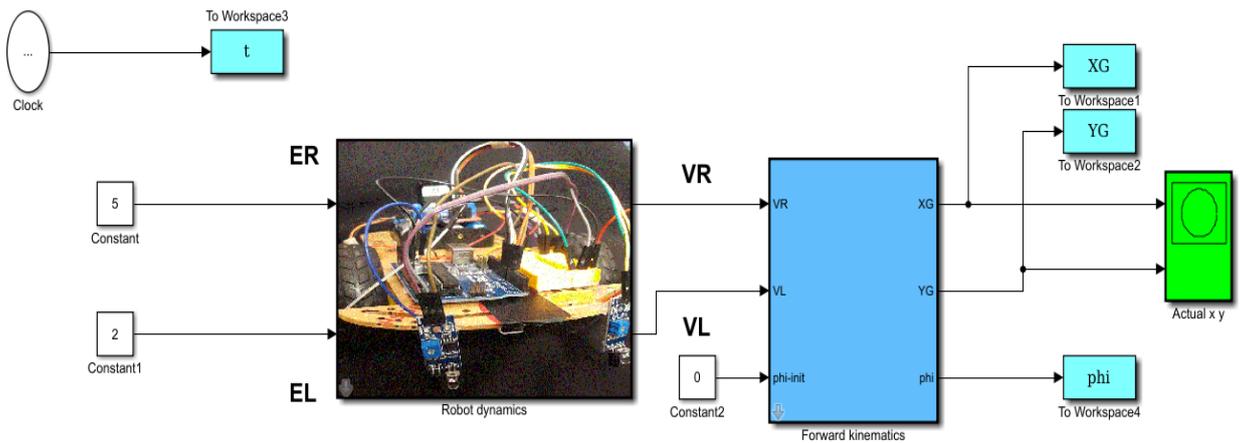


Figure II.15. Modèle de la réponse indicielle de la dynamique avec la cinématique du robot sur SIMULINK

On va associer le model cinématique avec modèle dynamique pour voir tester le modèle complet (Figure II.15). La configuration initiale du robot est $(X_G, Y_G, \varphi) = (0 \text{ m}, 0 \text{ m}, 45^\circ)$.

Les résultats sont présentés à la Figure II.16. La même valeur est appliquée aux deux moteurs ($E_R = E_L = 5V$)

la Figure II.17. deux valeurs différentes est appliquée aux deux moteurs ($E_R = 5V$ et $E_L = 3V$).

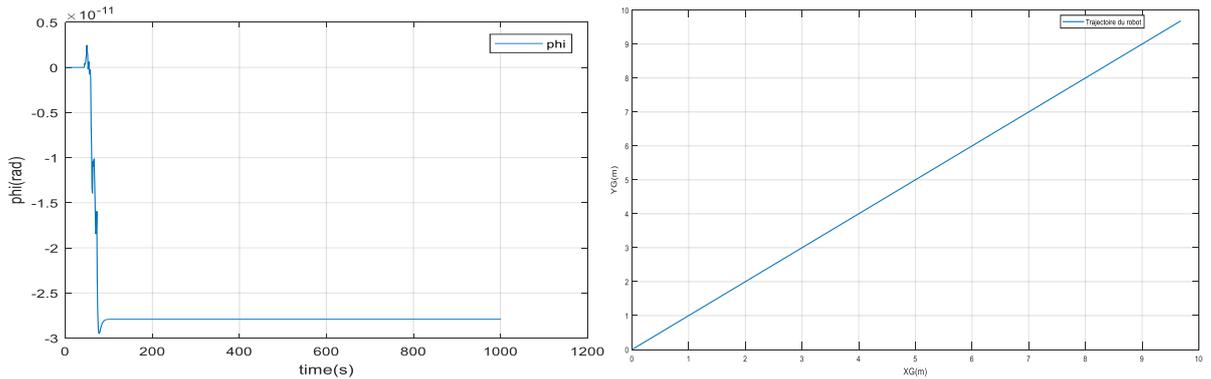


Figure II.16. La réponse indicielle ($E_R = 5 \text{ V}$ et $E_L = 5 \text{ V}$ avec $\varphi = \frac{\pi}{4} \text{ rad}$)

Les résultats obtenus de la Figure II .16 montrent que le robot dessine une ligne droite avec l'angle de $\frac{\pi}{4}$.

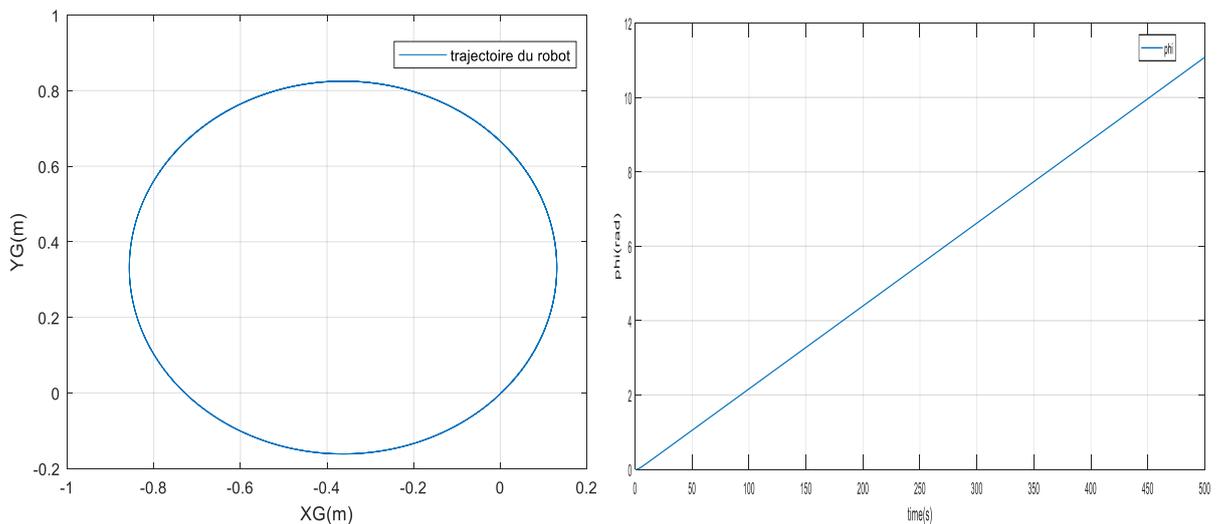


Figure II.17. La réponse indicielle ($E_R = 5 \text{ V}$ et $E_L = 3 \text{ V}$ avec $\varphi = \frac{\pi}{4} \text{ rad}$)

Les résultats obtenus de la Figure II.17 montrent que le robot dessine un cercle. Les réponses indicielles des modèles cinématiques et dynamiques sont conformes aux attentes. Ainsi, ce modèle donne une représentation réelle du robot.

II.7. Conclusion

La modélisation est un principe ou une technique qui permet d'établir un modèle explicatif d'un phénomène ou d'un comportement et une étape très importante pour la commande des robots. Deux types de modèles sont généralement utilisés lors de la commande, à savoir : le modèle cinématique et le modèle dynamique

Dans ce chapitre, la modélisation du robot mobile a été présentée. Nous avons également développé les équations cinématiques et dynamiques du robot mobile. Et nous avons vérifié la validité des modèles par simulation à l'aide du Simulink Matlab.

Dans le prochain chapitre, nous proposerons un système de contrôle basé sur le contrôleur PID pour le problème de suivi de ligne.

Chapitre III :

**Problème de suivi de
ligne**

Chapitre III

Problème de suivi de ligne du robot à entraînement différentiel

III.1 Introduction

Après avoir établi la cinématique et la dynamique du robot, nous passons à résoudre le problème du suivi de ligne, où le robot doit suivre une trajectoire désirée avec une grande précision.

Généralement, nous ne devons pas utiliser l'intelligence artificielle pour contrôler un système donné avant de tester les choix les plus simples comme contrôleur PID. Et compte tenu des diverses contraintes du milieu environnant, de la non linéarité du modèle, des incertitudes des paramètres liés au robot qui caractérise le robot mobile, et quand le système sous-jacent n'est pas connu le contrôleur PID constitue une bonne approche pour construire un contrôleur efficace qui basé sur la modélisation cinématique qui utilisé pour contrôler la vitesse du moteur à courant continu et/ou de l'ensemble de la plate-forme du robot.

III.2 Suivi de ligne

Le suivi de ligne s'appuie sur la configuration initiale (position et orientation) le robot déplace d'un point de départ à un point d'arrivée en doit suivre une trajectoire désiré. Figure 1 montre la structure de base du système de contrôle du robot mobile pour la poursuite de ligne elle consiste à calculer les commandes envoyées aux actionneurs.

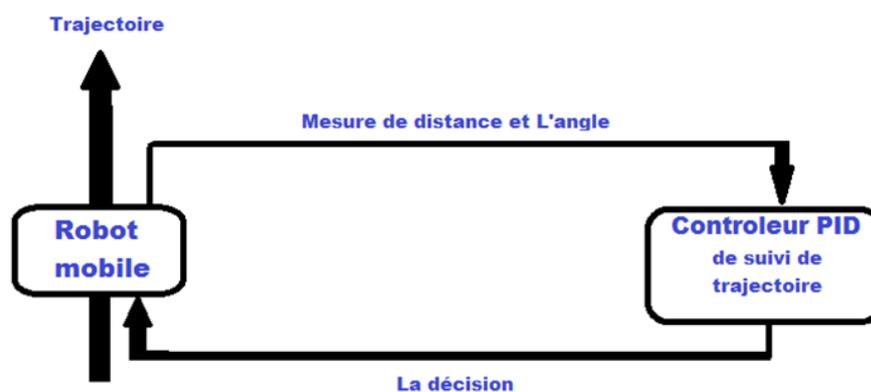


Figure III.1 : Schéma de base du système de suivi de trajectoires

III.3 Le contrôleur PID

Un contrôleur proportionnel-intégral- dérivé (PID) est un mécanisme de retour de boucle de contrôle. Comme son nom l'indique, l'algorithme PID est constitué de trois coefficients de base : proportionnel, intégral et dérivé qui sont variés pour obtenir une réponse optimale [12], à l'aide des valeurs des constantes K_P , K_D et K_I . K_P dépend des erreurs présentes, K_I dépend de l'accumulation des erreurs passées, et K_D est une prédiction des erreurs futures. Ils fournissent des signaux de commande qui sont proportionnels à l'erreur entre le signal de référence et la sortie réelle (action proportionnelle), à l'intégrale de l'erreur (action intégrale) et à la dérivée de l'erreur (action dérivée),.

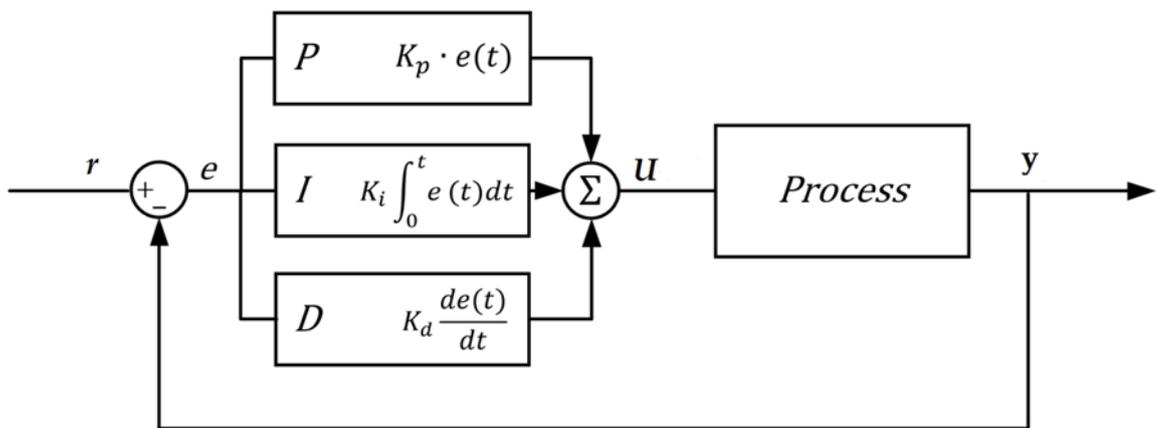


Figure III.2 : Correcteur PID

Forme :

$$U(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d(\tau) + K_D \frac{d(e)}{dt} \quad (\text{III.1})$$

$U(t)$ = signal de commande

$e(t)$ = signal d'erreur

K_P = Gain proportionnel

K_I = gain intégral

K_D = gain dérivé

Donc, le contrôleur PID est basé sur 3 blocs principaux, nous devons connaître le rôle de chaque bloc

III.3.1. Rôle de l'action proportionnelle (P)

Le rôle de l'action proportionnelle est d'accélérer la réponse de la mesure, ce qui a pour conséquence de réduire l'écart entre la mesure et la consigne. L'étude de l'action proportionnelle sur un système naturellement stable en boucle fermée, montre que lors d'un changement de consigne, le régime permanent atteint un écart résiduel [13].

Forme:

$$\boxed{\mathbf{P}} \quad \Longrightarrow \quad y(t) = K_p \cdot e(t) \quad (\text{III.2})$$

III.3.2 Rôle de l'action Intégrale (I):

Le rôle de l'action intégrale est d'annuler l'écart entre la mesure et la consigne. Le signal de sortie du régulateur en intégrateur seul est proportionnel à l'intégrale de l'écart mesure-consigne. Ce correcteur introduit un intégrateur qui ajoute un pôle nul à la fonction de transfert en boucle ouverte [13].

Forme :

$$\boxed{\mathbf{I}} \quad \Longrightarrow \quad y(t) = K_I \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (\text{III.3})$$

III.3.3 Rôle de l'action dérivée (D):

La dérivée de l'erreur de processus est calculée en déterminant la pente de l'erreur sur multiplier ce taux de variation par le gain dérivé K_d . Le terme dérivé ralentit le taux de changement de la sortie du contrôleur. Un contrôle dérivé K_d aura l'effet d'augmenter la stabilité du système, de réduire le dépassement et d'améliorer la réponse transitoire [14].

Forme :

$$\boxed{\mathbf{D}} \quad \Longrightarrow \quad y(t) = K_D \cdot \frac{de}{dt} \quad (\text{III.4})$$

III.3.4 Rôle d'Action du correcteur (PI) :

Ce correcteur introduit un pôle à l'origine. L'action de ce correcteur se fait sur les basses fréquences. La présence d'un un intégrateur qui éliminer l'erreur statique, mais il ralentit le système et le déstabilise s'il est mal placé [15].

Forme :

$$\text{PI} \implies y(t) = K_p \cdot e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (\text{III.5})$$

III.3.5 Rôle d'Action du correcteur (PD):

L'action de ce correcteur se fait sur les hautes fréquences. Son effet est stabilisant et à Tendance à augmenter la rapidité [15].

Forme :

$$\text{PD} \implies y(t) = K_p \cdot e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{III.6})$$

III.3.6 Rôle d'Action du correcteur (PID):

Le correcteur PID résulte et englobe les avantages de l'ensemble des correcteurs P, PI, PD. Son utilisation large est due aux performances qu'il peut assurer lors d'une correction ou d'une régulation [16].

Ce correcteur est essentiellement théorique; il regroupe les actions des correcteurs P.I et P.D. L'action de ce correcteur se fait sur toutes les fréquences. Son effet est stabilisant, il annule l'erreur statique, il contribue à augmenter la rapidité.

Forme:

$$\text{PID} \implies y(t) = K_p \cdot e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{III.7})$$

Synthèse d'un correcteur

Un système de commande a pour objectif de doter le système asservi de certaines propriétés [11]:

- la stabilité du système asservi
- la qualité du régime transitoire (Rapidité, dépassement)
- la précision en régime permanent
- la robustesse (marges de stabilité, rejet de perturbation)
- le temps de réponse

III.4 Conception du contrôleur PID

La figure illustre le problème des chemins suivants. À tout moment, le robot doit suivre le point actuel requis, il doit donc réduire l'erreur de distance et l'erreur de direction, Où le régulateur PID calcule l'erreur système, qui est la différence entre son état actuel et le point de consigne souhaité, et calcule la commande qui réduit cette erreur, il est principalement concerné par l'ajustement du gain proportionnel (K_p), qui est le gain intégral (K_I) et le gain différentiel (K_D) approprié pour obtenir des performances de contrôle optimales, c'est-à-dire le contrôle de la vitesse de rotation de chaque moteur (roues)

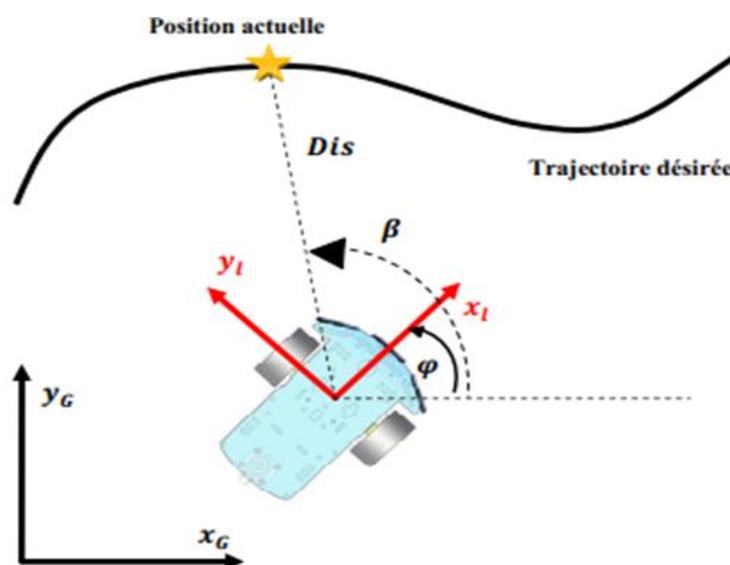


Figure III.3. Le problème de suivi de trajectoire

Le contrôleur PID possède une entrée et une sortie comme illustré à la figure

L'entrées est :

La somme de La distance Dis et L'angle d'orientation du robot β .

La sortie son :

La tension du moteur droit V_R .

La tension du moteur gauche V_L .

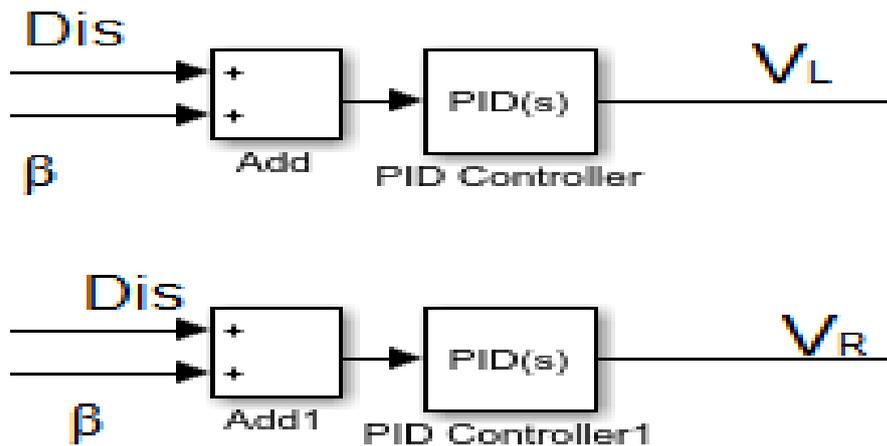


Figure III.4: L'entrée et la sortie de PID

III.5 Simulation

Le système du robot mobile est défini par le modèle cinématique et dynamique. Les valeurs d'orientation et de position du robot sont calculées et utilisées comme signaux de retour pour l'ensemble du système.

Les entrées de contrôleur PID sont la distance entre le robot et le point désiré Dis , et l'angle d'orientation relative du robot par rapport au point désiré β [10]

$$Dis = \sqrt{(y_{traj} - y_{robot})^2 + (x_{traj} - x_{robot})^2} \quad (III.8)$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{y_{traj} - y_{robot}}{x_{traj} - x_{robot}}\right) \quad (III.9)$$

Le système général de control est illustrée dans la Figure

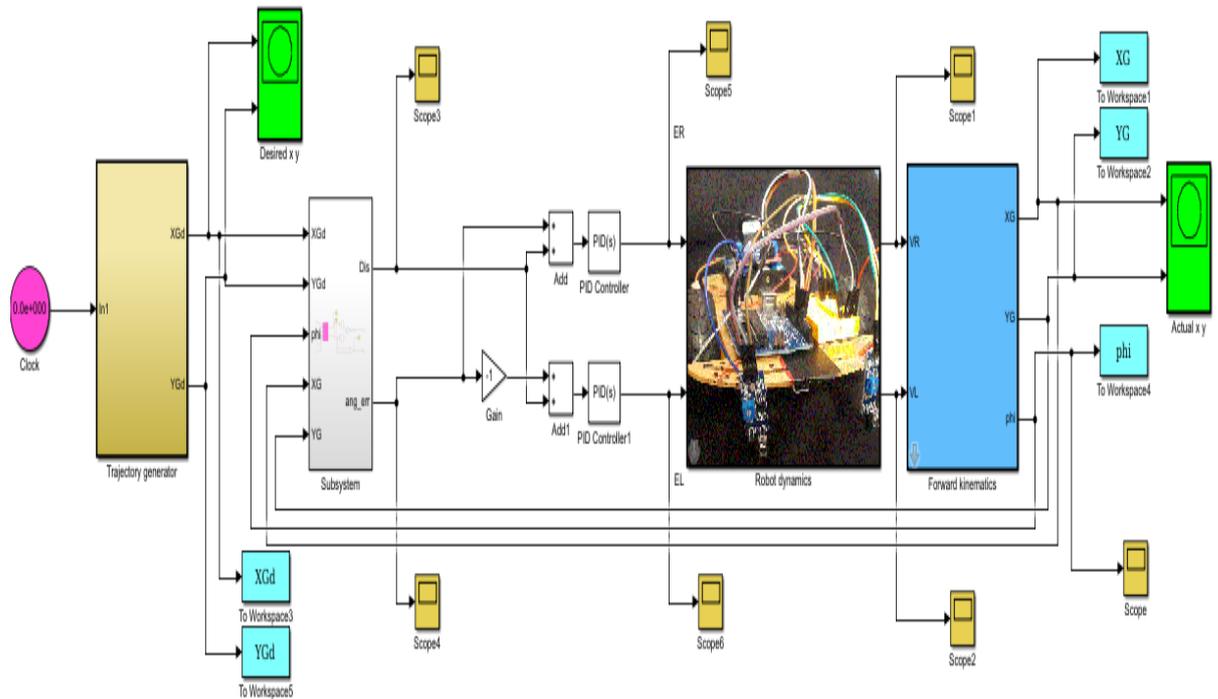


Figure III.5 : Système générale de contrôle pour le problème du suivi de trajectoires

Pour vérifier l'efficacité du contrôleur PID dans le problème de suivi de trajectoire, deux trajectoires ont été testées: une trajectoire circulaire, une trajectoire en forme de fleur

Par la méthode d'essai et d'erreur, on a défini les paramètres de contrôle suivante:

$$P = 15, I = 0.6, D = 0.8$$

- **Trajectoire circulaire**

Le robot doit suivre une trajectoire circulaire comme illustré sur la Figure 3.6. Le robot est initialement au point (0 m, 0 m, 0 rad).

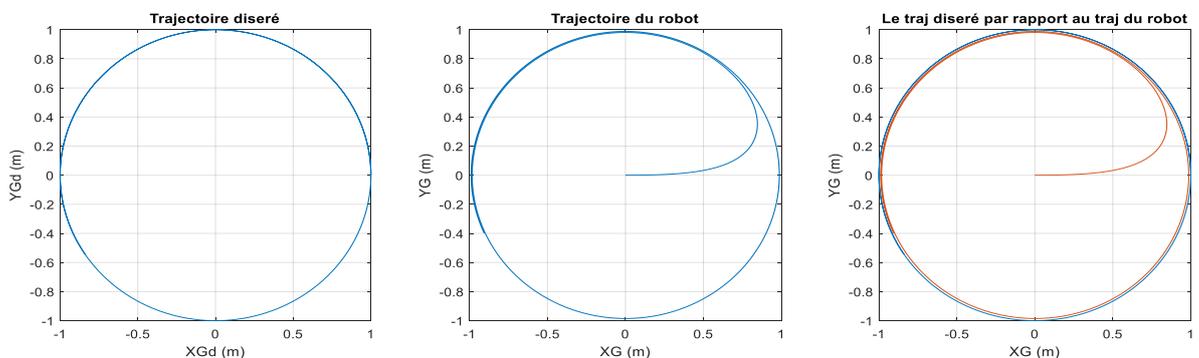


Figure III.6 : Suivre une trajectoire circulaire

Les erreurs sur la distance entre le robot et le point désiré et l'angle d'orientation sont données dans la Figure III.7

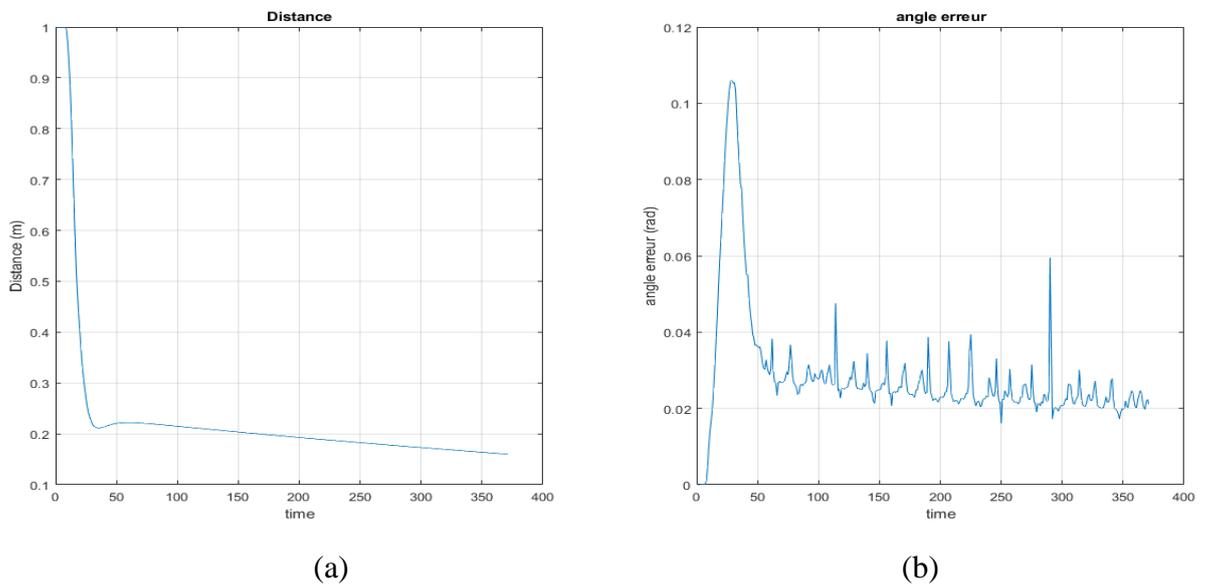


Figure III.7 : l'erreur sur la : a) distance (Dis), b) orientation(β)

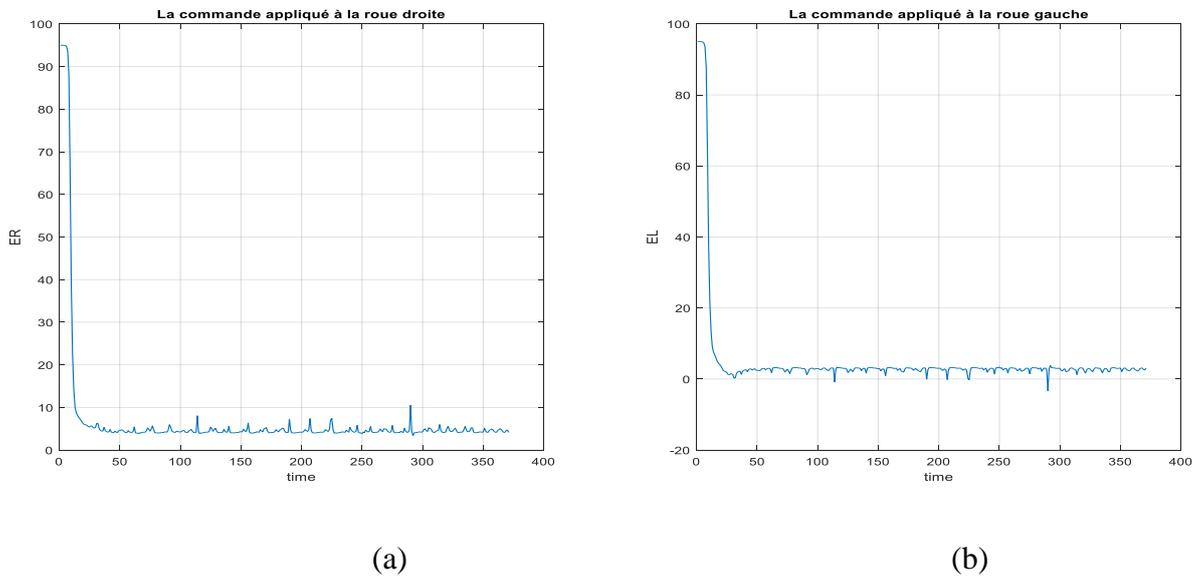


Figure III.8. La commande appliqué pour la trajectoire circulaire : a) Tension du moteur Droit E_R , b) Tension du moteur Gauche E_L

- **Trajectoire en forme de fleur**

Le robot doit suivre une trajectoire en forme de fleur (Figure III.9). Le robot est initialement au point (0 m, 0 m, 0 rad).

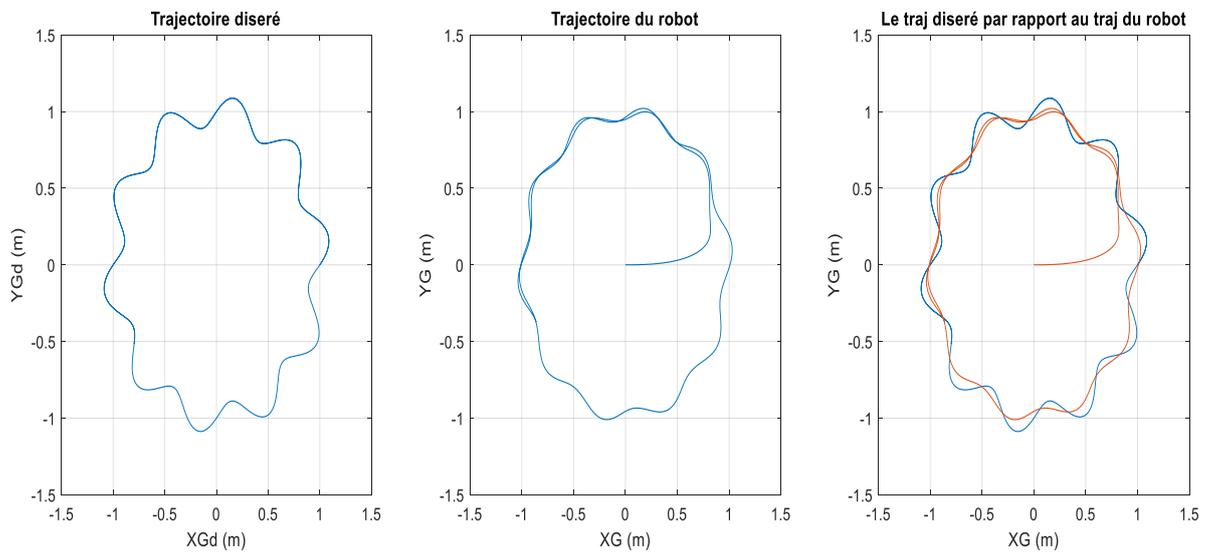


Figure III.9 : Suivre une trajectoire en forme de fleur

Les erreurs sur la distance entre le robot et le point désiré et l'angle d'orientation sont données dans la Figure III.10.

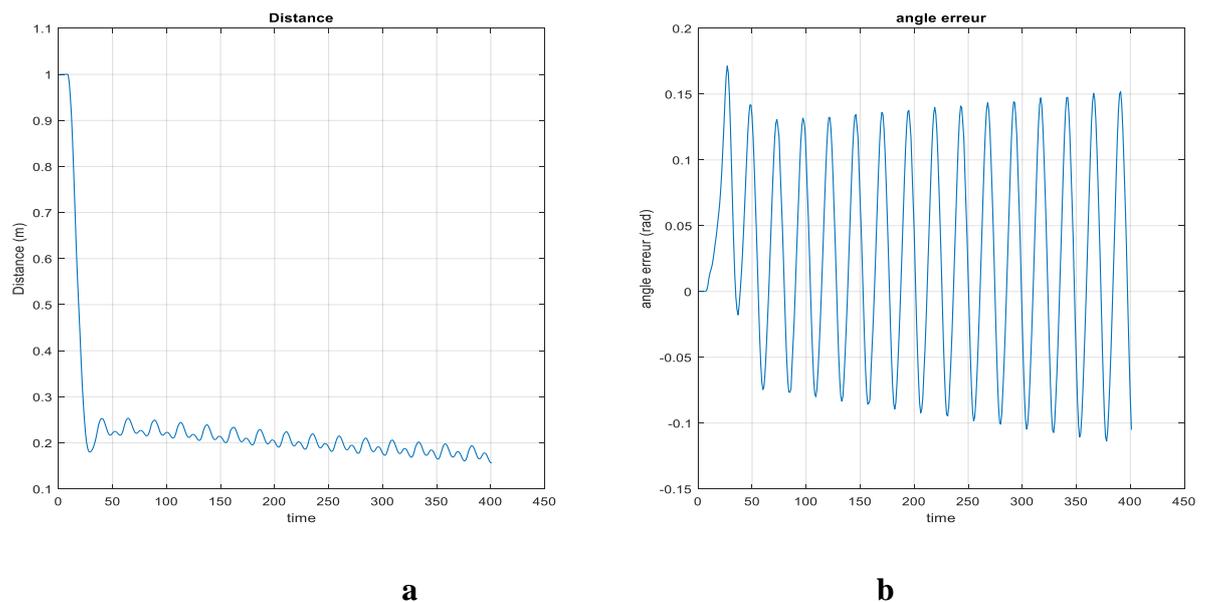


Figure III.10 : l'erreur sur la. la: a) distance (Dis), b) orientation(β)

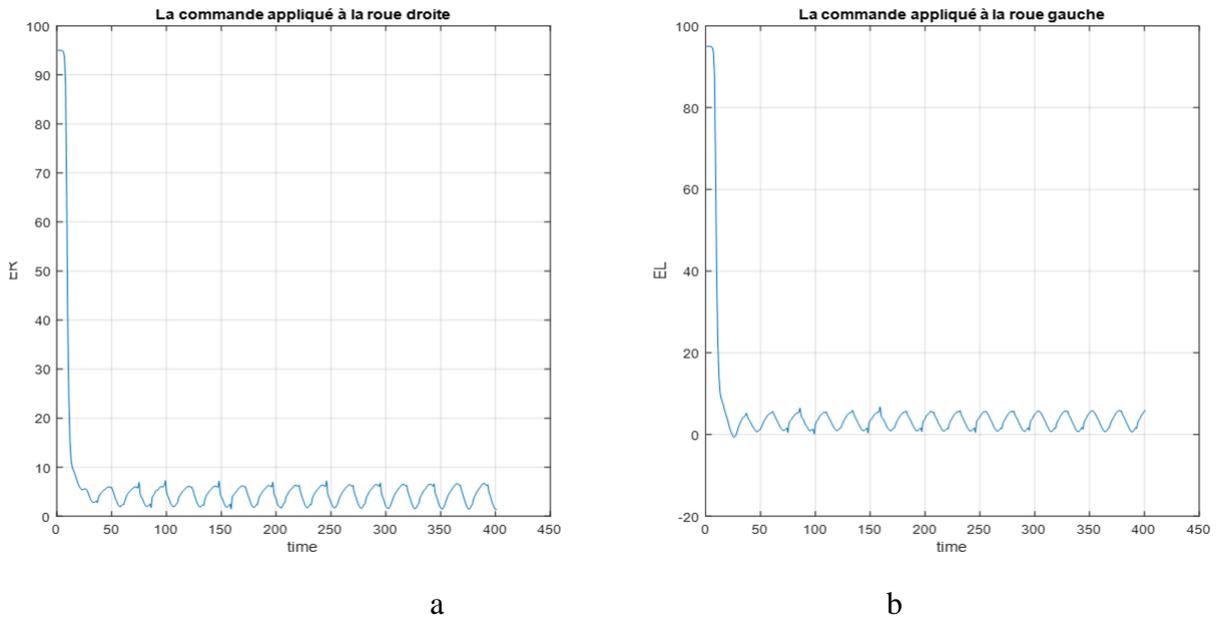


Figure III.11. La commande appliquée pour la trajectoire La commande appliquée sur le robot : a) Tension du moteur droit

Vous pouvez facilement voir que le robot peut suivre les trajectoires souhaitées avec précision. Quand la trajectoire devient plus complexe, nous pouvons voir des impulsions ou des pics, soit dans l'erreur de distance, soit dans l'erreur d'orientation. Et cela est dû au changement d'angle d'orientation.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une solution pour la navigation d'un robot mobile en utilisant le contrôleur PID, parce qu'il est le choix le plus simple.

Le contrôleur PID proposé a montré une bonne performance de suivi et de stabilité pour les différentes trajectoires qui donnée, et les résultats de simulation montrent l'efficacité de l'approche proposée et que le contrôleur proposé peut être développé efficacement par les paramètres d'ajustement: proportionnelle(P), intégrale(I), dérivée(D).

Chapitre IV :

Réalisation du robot suiveur de ligne

Chapitre IV

Réalisation du robot différentiel

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons une description détaillée de la réalisation d'un robot à entraînement différentiel, où au début, nous allons présenter le côté de la conception matérielle (**Hardware**) utilisé dans notre réalisation et qui couvre les composants nécessaires à la construction du robot mobile avec leur branchement. Puis nous allons passer à l'explication du côté logiciel (**Software**) réalisé sur l'Arduino IDE.

IV.2. Coté Hardware

La partie mécanique est l'une des parties qui nous a pris le moins de temps, nous avons développé une structure d'un robot ressemblant à un petit véhicule de jeu.

IV.2.1. La plate-forme

C'est la partie qui transporte tous les autres composants du robot (Elle doit être adaptée pour accueillir tous les composants électroniques nécessaires en termes de taille et de poids). Elle est portable sur deux roues motrices et une roue libre pour l'équilibre du robot.



Figure IV .1 : La plate-forme du robot à entraînement différentiel.

IV.2.2. moteur DC avec boîte de vitesses

Pour obtenir le mouvement mécanique du robot, nous utilisons deux moteurs à courant continu de type *Standard 130* connectés aux deux roues motrices, et nous ajouterons une boîte de vitesses (En anglais : *Gearbox*) pour augmenter le couple.[20]



Figure IV .2 : Moteur à courant continu avec Gearbox.

IV.2.3. Capteur Infrarouge FC51

Le capteur que nous utiliserons dans notre travail est le capteur infrarouge. La caractéristique du robot que nous voulons créer est sa capacité à suivre la ligne noire et revenir à la ligne en cas de départ. Pour cela nous avons utilisé deux capteurs infrarouges FC-51.

Le capteur de proximité FC-51 est composé d'une diode infrarouge (émetteur) et d'une photodiode (récepteur). Il est composé de 3 branches :

- **VCC** : Volte courant continu.
- **GND** : Ground.
- **OUT** : Interface de sortie numérique de la carte (1 si détecte il est sur la ligne noir, et 0 si est hors la ligne)

Le principe de fonctionnement général est de détecter la lumière réfléchié provenant de sa propre LED infrarouge et en mesurant la quantité de lumière infrarouge réfléchié, il peut détecter les transitions de la lumière à l'obscurité (distinction entre le blanc et le noir). Dans notre robot, nous avons utilisé deux capteurs infrarouges.

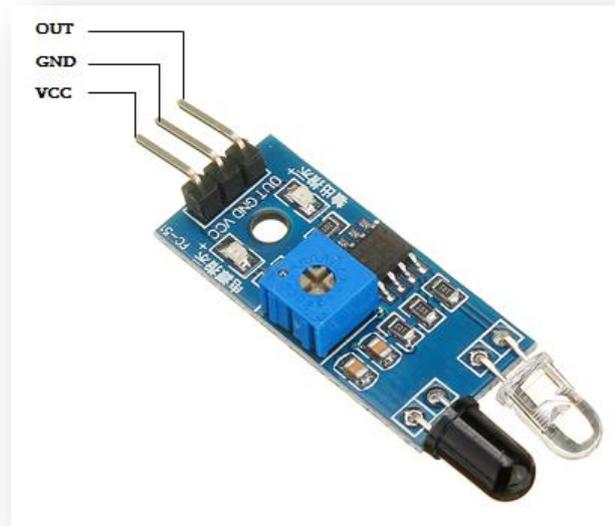


Figure IV.3 : Capteur Infrarouge FC51.

IV.2.4. Le pilote de moteur L298N

L298N est un pilote de moteur à double pont en H qui permet de contrôler la vitesse et la direction de deux moteurs DC en même temps. Car comme nous l'avons dit, le robot que nous créons, dont la fonction principale est de suivre la ligne noire et retourner à la ligne lorsqu'il sera hors la ligne, donc il faut contrôler les deux moteurs de ce robot en termes de vitesse et de sens de rotation (direction) pour accomplir cette tâche. Et pour ça on a utilisé le L298N.[18]

Le module peut piloter des moteurs à courant continu ayant des tensions comprises entre 5 et 35 V, avec un courant jusqu'à 2A. Le L298N que nous utiliserons contient deux bornes à vis pour les moteurs A et B (comporte seulement deux moteur). Les autres bornes sont :

- **OUT1 & OUT2** : Les bornes sont connectées au moteur A.
- **OUT3 & OUT4** : Les bornes sont connectées au moteur B.
- **VCC** : alimente le moteur (il vaut mieux être supérieur à 7V pour une vitesse du moteur plus rapide).
- **GND** : Une borne de masse commune (Ground).
- **5V** : La borne alimente le circuit logique de commutation à l'intérieur du circuit intégré L298N.
- **ENA** : Les bornes sont utilisées pour contrôler la vitesse du moteur A.

- **ENB** : Les bornes sont utilisées pour contrôler la vitesse du moteur B
- **IN1 & IN2** : Les broches sont utilisées pour contrôler la direction de rotation du moteur A.
- **IN3 & IN4** : Les broches sont utilisées pour contrôler la direction de rotation du moteur B.

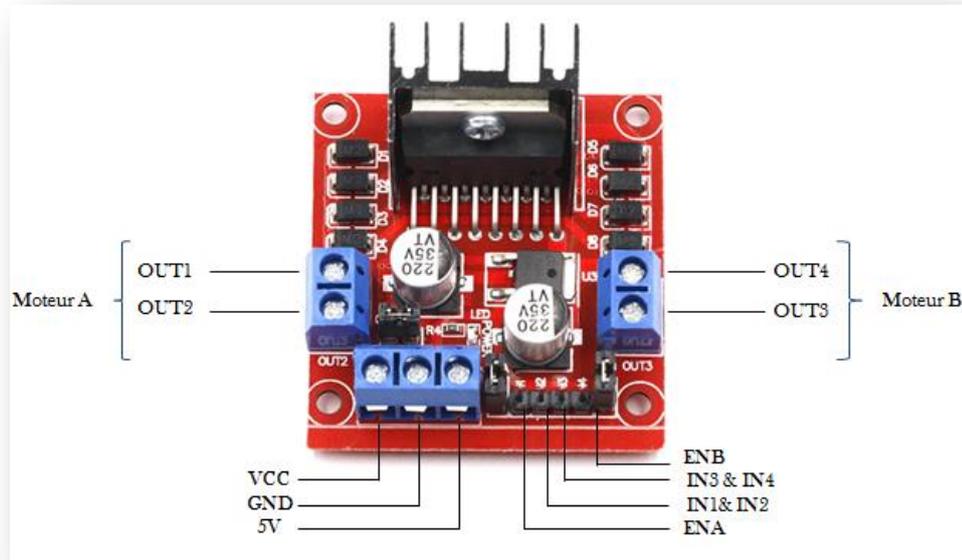


Figure IV.4 : Le pilote de moteur L298N.

IV.2.5 La carte Arduino Uno

Arduino Uno est une carte microcontrôleur basée sur l'ATmega328P. "Uno" signifie un en italien et a été choisi pour marquer la sortie du logiciel Arduino (IDE) 1.0, qui étaient les versions de référence d'Arduino, désormais évoluées vers des versions plus récentes. La carte Arduino Uno peut être alimentée via une connexion USB, en utilisant une source d'alimentation externe, ou via un adaptateur AC- DC ou une batterie [19]

La carte Arduino contient 14 entrées et sorties numériques (0 à 13) :

- **Serial 0 (RX) et 1 (TX)** : RX est utilisé pour recevoir des données et TX pour envoyer des données. Ils peuvent être utilisés comme entrées et sorties numériques
- **Les bornes de 2 à 13** : c'est des entrées /sorties numériques.
- **Les bornes 3, 5, 6, 9, 10 et 11** : peuvent être utilisées pour envoyer et recevoir des signaux PWM.

Et les autres bornes sont comme suit :

- **Les bornes A0 à A5** : c'est des entrées analogiques qui fournissent chacune 10 bits de résolution (soit 1024 valeurs différentes).
- **3 GND** : Est une borne de masse commune (prises terre Ground).
- **5V** : Cette borne (Output) émet une tension de 5V à partir du régulateur de tension sur la plaque.
- **3V3** : Cette borne (Output) émet une tension de 3.3V à partir du régulateur de tension sur la plaque.
- **Une connexion USB.**
- **Une prise d'alimentation.**
- **Un en-tête ICSP.**
- **Un bouton de réinitialisation.**

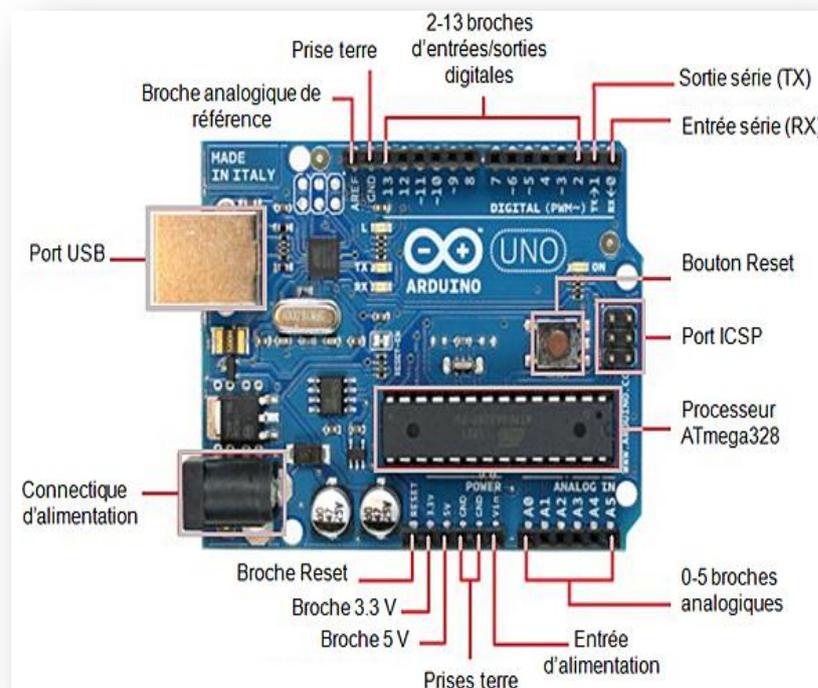


Figure IV.5 : .La carte Arduino Uno.

IV.2.6 La réalisation final (Le branchement)

Après avoir présenté les outils et éléments électroniques nécessaire pour créer un robot mobile pour suivi la ligne, nous passons à monter comment relié les composants électroniques entre eux.

Pour cela nous avons réalisé une simulation sur *Fritzing* pour expliquer la méthode de branchement (voir la Figure IV.6) :

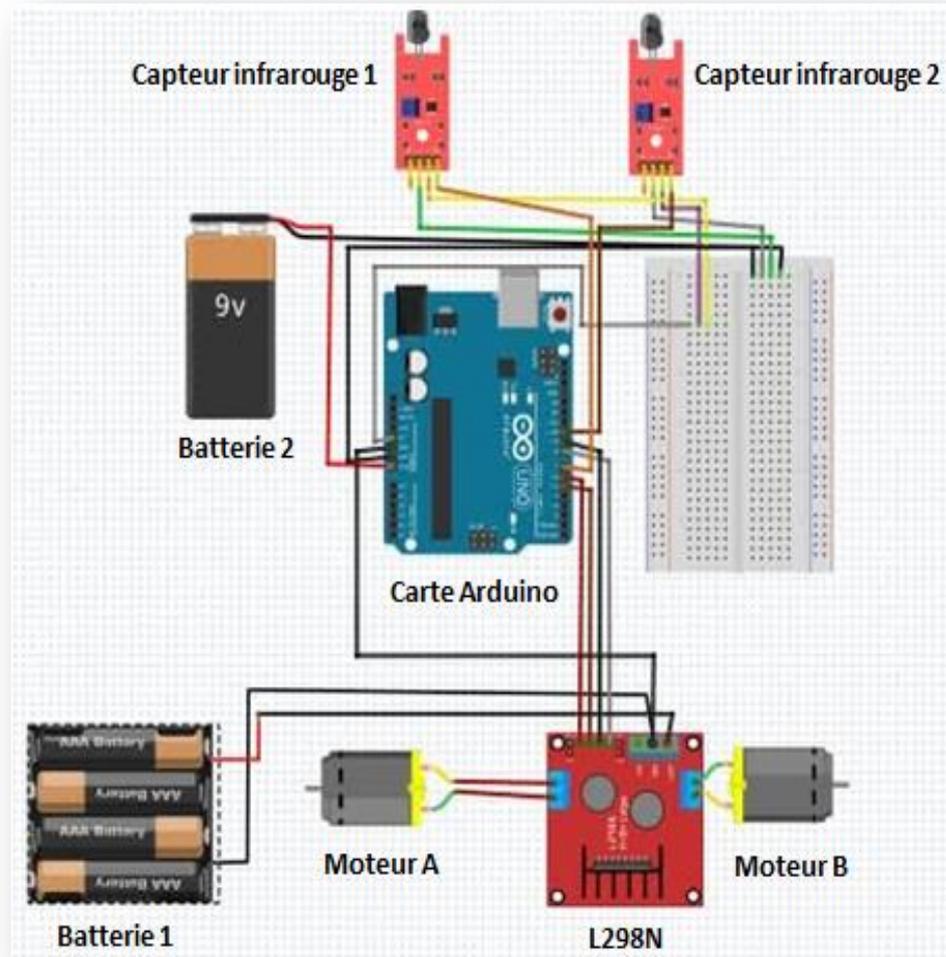


Figure IV.6 : L'installation d'un circuit électrique entre les éléments électroniques d'un robot suivi de ligne

Les deux capteurs infrarouges sont connectés à la carte Arduino, comme suite:

- La broche OUT1 sur le capteur gauche avec la broche 7 sur la carte Arduino
- La broche OUT2 sur le capteur droit avec la broche 10 sur la carte Arduino.
- La batterie2 pour l'alimentation de la carte Arduino et les deux capteurs

Le L298N (Drive of Motor) nous avons connectés aux terminaux numérique/analogiques Arduino, comme suite :

- La broche IN1 sur le L298N avec la broche 10 sur la carte Arduino.
- La broche IN2 sur le L298N avec la broche 9 sur la carte Arduino
- La broche IN3 sur le L298N avec la broche 12 sur la carte Arduino.
- La broche IN4 sur le L298N avec la broche 11 sur la carte Arduino.
- La broche OUT1 et OUT2 sur le L298N avec les bornes du moteur droit.

- La broche OUT3 et OUT4 sur le L298N avec les bornes du moteur gauche.
- La batterie 1 pour l'alimentation de la carte L298N et les deux moteurs.

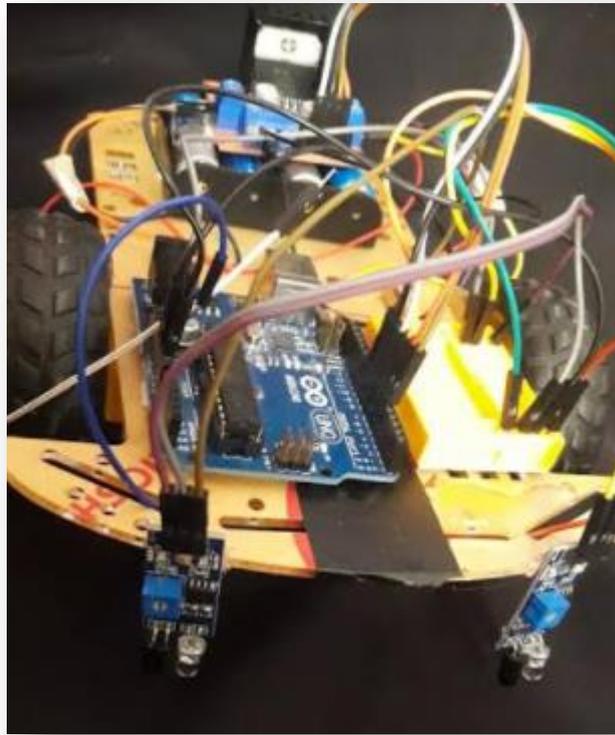


Figure IV.7 : Robot mobile suivi de ligne avec deux capteurs infrarouge.

IV.3. Coté Software

IV.3.1. Présentation de l'environnement de l'Arduino IDE

Le programme de commande du robot est écrit en langage Arduino C dans l'IDE (Integrated Development Environment ou en français, environnement de développement intégré).

Arduino IDE est un logiciel open source qui écrit dans des fonctions de C et C++ et qui est principalement utilisé pour écrire et compiler le code dans le module Arduino. Il est utilisé pour écrire et télécharger des programmes sur des cartes compatibles Arduino.

L'interface de l'Arduino IDE se décompose en quatre parties principales :

- 1- La barre de menu.
- 2- La barre de commandes rapide.?
- 3- La zone d'écriture nos code (void setup () pour la déclaration des IN et OUT, Void loop() pour les boucle)

4- La section pour afficher les alertes et les bugs de notre code. C'est le débogueur.

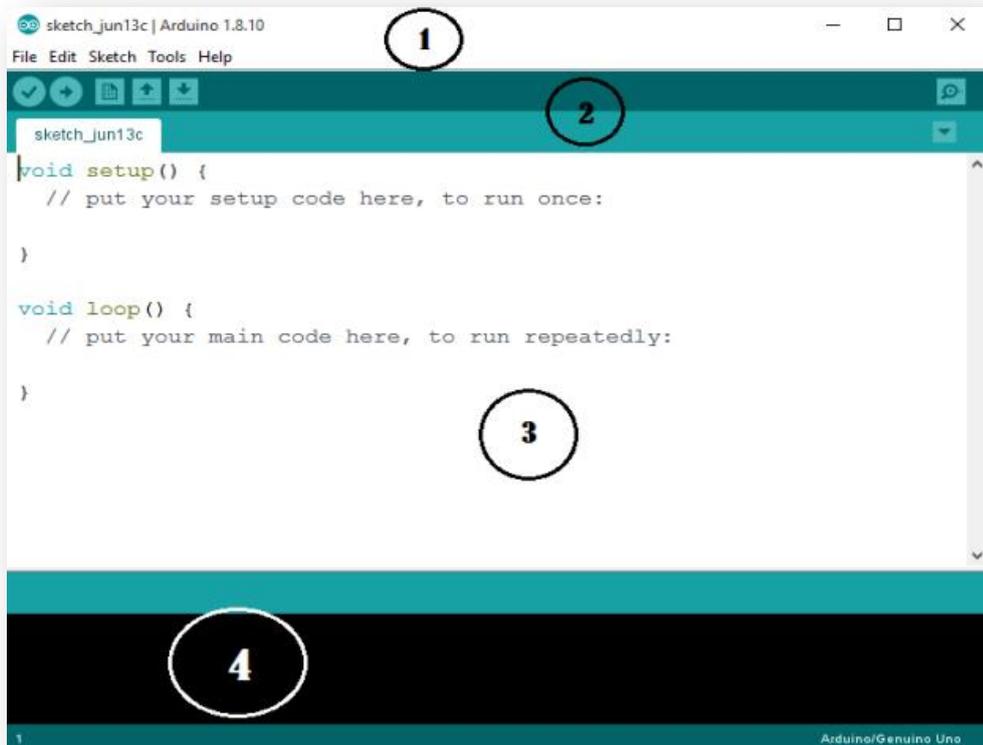


Figure IV.8 :L'interface graphique de l'environnement de développement Arduino IDE

IV.3.2. L'organigramme de suivi de ligne

L'organigramme de suivi de ligne est illustré par la Figure ci-dessous (Figure IV.9).

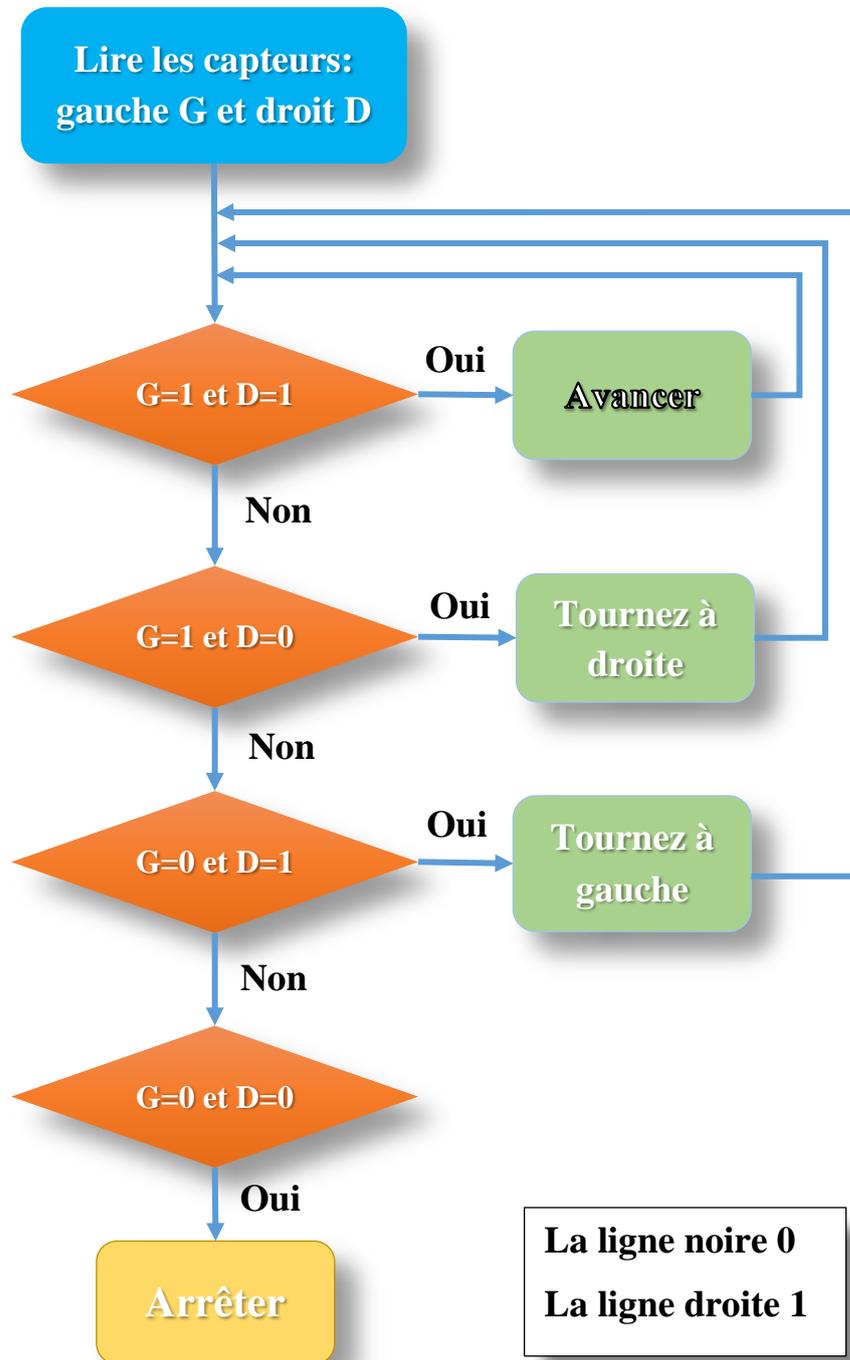


Figure IV.9. L'organigramme de suivi de ligne appliqué dans le projet

IV.3.3 Le code du robot

Nous commençons le programme par la déclaration des variables (bool) et les constants (int) qui sont les capteurs (Gauche et Droit) et les moteurs (Gauche et Droit):

```
//capteur
const int capteurGauche = 7;
const int capteurDroit = 10;
//moteur gauche
int moteurGaucheP =5 ;
int moteurGaucheN =6;
//moteur droite
int moteurDroiteP =8;
int moteurDroiteN =9;
bool etatCapteurGauche;
bool etatCapteurDroit;
```

Nous passons au void setup où nous déclarons les sorties (les moteurs) et les entrées (les capteurs). L'instruction Serial.begin (9600) est pour autoriser l'affichage des messages et des valeurs de variables ultérieurement à l'aide de l'instruction Serial.println() sur le moniteur série.

```
void setup() {
Serial.begin(9600);
pinMode (capteurGauche, INPUT);
pinMode (capteurDroit, INPUT);
pinMode (moteurGaucheP, OUTPUT);
pinMode (moteurGaucheN, OUTPUT);
pinMode (moteurDroiteP, OUTPUT);
pinMode (moteurDroiteN, OUTPUT);

}
```

Après dans le void loop, nous commençons par écrire les deux lignes qui mettent nos capteurs en état de read pour recevoir les données. Les instructions Serial.println sont pour l'affichage des messages et des valeurs de variables.

```
etatCapteurGauche = digitalRead(capteurGauche);
etatCapteurDroit = digitalRead(capteurDroit);
Serial.println("etatCapteurGauche");
Serial.println(etatCapteurGauche);
Serial.println("etatCapteurDroit");
Serial.println(etatCapteurDroit);
```

Puis, nous passons à écrire le premier cas où quand le robot sera au-dessous de la ligne noire, les deux moteurs doivent être en état de marche en même temps :

- L'état de Capteur Gauche : **1 (HIGH)**.
- L'état de Capteur Droit : **1 (HIGH)**.

```
if ((etatCapteurGauche) and (etatCapteurDroit))
{
//Serial.println("Continuer tout droit , Les deux moteurs marche en même temps ");
digitalWrite(moteurGaucheP, HIGH);
digitalWrite(moteurGaucheN, LOW);
digitalWrite(moteurDroiteP, LOW);
digitalWrite(moteurDroiteN, HIGH);
}
```

Deuxième cas est quand le robot n'est pas exactement au-dessus de la ligne noire, mais plutôt légèrement orienté vers la gauche, le moteur droit doit être en état de marche et le moteur gauche doit être en état d'arrêt :

- L'état de Capteur Gauche : **0 (LOW)**.
- L'état de Capteur Droit : **1 (HIGH)**.

```
if (!(etatCapteurGauche) and (etatCapteurDroit))
{
//Serial.println("le robot tourne a droite ");
digitalWrite(moteurGaucheP, HIGH);
digitalWrite(moteurGaucheN, LOW);
digitalWrite(moteurDroiteP, LOW);
digitalWrite(moteurDroiteN, LOW);
}
```

Troisième cas est quand le robot est légèrement orienté vers la droite de la ligne noire, le moteur droit doit être en état d'arrêt et le moteur gauche doit être en état de marche :

- L'état de Capteur Gauche : **1 (HIGH)**.
- L'état de Capteur Droit : **0 (LOW)**.

```
if ((etatCapteurGauche) and (!etatCapteurDroit))
{
//Serial.println("le robot tourne a Gauche ");
digitalWrite(moteurGaucheP, LOW);
digitalWrite(moteurGaucheN, LOW);
digitalWrite(moteurDroiteP, LOW);
digitalWrite(moteurDroiteN, HIGH);
}
```

Quatrième et le dernier cas est quand le robot est à la fin de la droite de la ligne noire, les deux moteurs doivent s'arrêter:

- L'état de Capteur Gauche : **0 (LOW)**.
- L'état de Capteur Droit : **0 (LOW)**.

```
if ((!etatCapteurGauche) and (!etatCapteurDroit))
{
//Serial.println("le robot arette ");
digitalWrite(moteurGaucheP, LOW);
digitalWrite(moteurGaucheN, LOW);
digitalWrite(moteurDroiteP, LOW);
digitalWrite(moteurDroiteN, LOW);
}
}
```

IV.4. Conclusion

Notre objectif de réaliser un robot mobile suivant une ligne noire a été atteint à l'aide de deux capteurs infrarouges capables de faire la distinction entre le noir et le blanc. Le robot est contrôlé par un microcontrôleur ATmega328P de la carte Arduino Uno où avec ses propriétés spéciales qui nous ont aidés à faciliter les tâches, notamment en ce qui concerne sa programmation.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Dans ce travail, la conception et la réalisation d'un robot suiveur de ligne mobile a été abordée à la base de la carte Arduino et des capteurs infrarouges. La tâche de base que le robot mobile doit faire est de suivre une ligne souhaitée, tout cela sans intervention humaine.

Tout d'abord, nous avons présenté quelques concepts sur les robots mobiles et leurs types, nous avons discuté de l'importance de la perception pour le robot mobile qui est accomplie par des capteurs, et avons donné un aperçu de la navigation autonome. Les éléments de base pour réaliser une navigation autonome (navigation, localisation, cartographie, suivi de trajectoire, évitement d'obstacles) où nous nous sommes concentrés sur le suivi de trajectoire nous avons également présenté quelques applications des robots suiveur de ligne dans le monde.

Après un aperçu global de la navigation du robot mobile, un modèle de robot mobile à entraînement différentiel a été développé, où la cinématique et la dynamique du robot ont été dérivées en détail. Ce type de robot est largement utilisé, notamment dans le domaine de la recherche en raison de sa simplicité et de sa facilité de travail.

Le problème du suivi de la trajectoire a été envisagé. Le robot doit suivre une trajectoire souhaitée. Nous avons choisi d'utiliser un régulateur PID car c'est le plus simple. Ainsi, le contrôleur PID proposé a montré de bonnes performances de suivi et une bonne stabilité pour les différentes positions initiales. Les résultats de simulation montrent l'efficacité de ce contrôleur qui peut être développée efficacement par les paramètres de réglage : proportionnel (P), intégral (I), dérivé (D).

Enfin, un prototype du robot a été conçu et construit. Le robot est piloté avec une carte Arduino et équipé de deux capteurs infrarouges lui permettant de suivre la ligne sur son chemin.

Références

Références

- [01] CHERROUN Lakhmissi. Navigation Autonome d'un Robot Mobile par des Techniques Neuro-Floues. Automatique. Université Mohamed Khider – Biskra, 2014.
- [02] Olivier Lefebvre. Navigation autonome sans collision pour robots mobiles nonholonomes. Automatique/ Robotique. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2006. Français. tel-00134581
- [03] Bernard BAYLE. Robotique Mobile. Université de Strasbourg .bernard.bayle@unistra.fr
- [04] Omar Ait Aider. Localisation référencée modèle d'un robot mobile d'intérieur. Traitement du signal et de l'image. Université d'Evry-Val d'Essonne, 2002
- [05] N. HACENE, Note de cours : Robotique, Université de Ghardaia, 2018/2019.
- [06] DIF AHLEM et MELIK NASSIMA Etude et conception d'un robot suiveur de cible basés. Informatique industrielle. Université OUM EL BOUAGUI– Biskra, 2012.
- [07] Boru Diriba Hirpo & Prof. Wang Zhongmin. Design and Control for Differential Drive Mobile Robot. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, October 2017. Tianjin 300222, China
- [08] Benoit Belbo Mevo. Contribution a la commande adaptative et robuste d'un robot mobile de type avec modele non_lineaire l'École de Génie de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), and Education, Mai 2019 ; Canada
- [09] Herman Høifødt. Dynamic Modeling and Simulation of Robot Manipulators Master of Science in Engineering Cybernetics NTNU Fakultet for informasjonsteknologi, Norges teknisk-naturvitenskapelige matematikk og elektroteknikk universitet. June 2011
- [10] BAHAZ REDOUANE Navigation autonome et mobile à entraînement différentiel, Université de Ghardaïa , 21/10/2020, Ghardaia.
- [12] Bhilai, S. S. T. C. "Comparative study of P, PI and PID controller for speed control of VSI-fed induction motor." (2014).
- [11] Yassine Ariba , « Construction de correcteurs'» , Doctorant groupe Mac

[13] pdf reglage PID de regulation

[14] Kambiz Arab Tehrani¹ and Augustin Mpanda^{2,3} ¹University of Nancy, Teaching and Research at the University of Picardie, INSSET, Saint-Quentin, Director of Power Electronic Society IPDRP, ²Tshwane University of Technologie/FSATI

[15] Etude des correcteurs, D. DUBOIS.

[16] Mansouri Rachid , « Cours de régulation ».

[17] Dr. Georgios A, A Survey of Sensors for Localization of Unmanned Ground Vehicles (UGVs) , Demetriou Frederick Institute of Technology 3, Lemesos Cyprus

[18] <https://lastminuteengineers.com/>

[19] Le site officiel d'Arduino: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>

[20] <https://www.electronicshub.org/arduino-line-follower-robot/>