

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE**

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Djilali Bounaama Khemis Miliana

Faculté des sciences et de la Technologie

Département de la Technologie

Mémoire présenté pour l'obtention du Diplôme de Master en

**AUTOMATIQUE**

Spécialité : Automatique et informatique industrielle

Thème :

**Contrôleur flou d'un robot mobile de tricycle**

Présenté par :

Mr : Torchi Mounir

Mr : Larbi Bouamrane Younes

Jury :

- Mr Himour Yacine : président
- Mr Kerraci Abdelkader : examinateur
- Mr Ikni Samir : encadrent

Année universitaire : 2022/2023

## **Remerciement**

**Je remercie tout d'abord ALLAH de m'avoir prêté santé et volonté pour mener à terme cette mémoire du master.**

**Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers Ikni Samir, mon superviseur de recherche, pour son soutien, ses conseils précieux et son expertise tout au long de ce projet. Sa disponibilité et sa patience ont été inestimables et ont grandement contribué à la réussite de ce travail.**

J'aimerais également remercier les membres de mon comité de jury Kerraci abdelkader et Himour yacine, pour avoir accepté de lire et d'évaluer mon travail. Leurs commentaires constructifs et leurs suggestions ont permis d'améliorer considérablement ce travail, mes collègues qui m'ont apporté leur soutien et leurs encouragements tout au long de cette aventure académique.

**Merci à tous ceux qui ont contribué à ce travail et m'ont aidé à atteindre cet objectif académique.**

**Leur influence et leur soutien resteront à jamais gravés dans ma mémoire. Merci infiniment.**

# Dédicace

**Nous dédions notre modeste travail :**

À mes chers parents, pour leur amour, leur soutien et leur patience  
tout au long de mes études.

À mon directeur de mémoire, pour ses conseils avisés, son  
expertise et sa disponibilité.

À mes amis, pour leur soutien moral et leur présence dans les  
moments difficiles.

À Toute la Promotion Automatique et informatique industrielle  
2022/2023.

À mes professeurs, pour leur enseignement et leur inspiration.

À toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la  
réalisation de ce travail, je leur adresse mes sincères  
remerciements et ma profonde gratitude.

## Résumé :

L'objectif de ce travail consiste à assurer le contrôle en suivi de trajectoire d'un robot mobile avec deux méthodes, la première un contrôleur classique de type PD. L'utilisation de ce type de commande (PD), a bien montré son efficacité depuis des décennies. La deuxième étape est consacrée à développer une stratégie basée sur le raisonnement flou dans le cadre de la synthèse d'un contrôleur flou du robot mobile. Enfin, on termine par une analyse comparative des résultats obtenus dans le cas de simulation des deux types de contrôleur. Il a été découvert que l'utilisation du contrôle flou contribue à de meilleurs résultats concernant le suivi de la trajectoire d'un robot mobile, car les erreurs sont réduites et la vitesse est augmentée.

Mots clés : suivi de trajectoire, robot mobile, PD, contrôleur flou .

## ملخص :

الهدف من هذا العمل هو ضبط التحكم في تتبع المسار لروبوت متنقل باستخدام طريقتين مختلفتين. الطريقة الأولى تعتمد على وحدة التحكم الكلاسيكية من نوع تحكم تناسبي تفاضلي هذا النوع من التحكم قد أثبتت فعاليتها في مجال الآلية على مر العقود، ويعتمد على تقنيات التحكم المختلفة المناسبة لتحقيق الأهداف المرسومة وتحقيق الأداء المطلوب. المرحلة الثانية من العمل تركز على تطوير استراتيجية قائمة على المنطق الضبابي لتصميم وحدة تحكم ضبابية للروبوت المتنقل.

في النهاية، سيتم إجراء تحليل مقارنة للناتج المحققة من محاكاة وحدتي التحكم. بناءً على النتائج المحصلة، تم اكتشاف أن استخدام التحكم الضبابي يساهم في تحقيق نتائج أفضل فيما يتعلق بتتبع مسار الروبوت المتنقل، حيث يتم تقليل الأخطاء وزيادة السرعة.

الكلمات الرئيسية: تتبع المسار، الروبوت المتنقل، تحكم تناسبي تفاضلي، تحكم ضبابي.

## Abstract :

The objective of this work consists in ensuring the trajectory-tracking control of a mobile robot with two methods, the first a conventional PD-type controller. The use of this type of control (PD), in the field of automation, control techniques, depending on the objectives set and the desired performance, has shown its effectiveness for decades. The second stage is devoted to developing a strategy based on fuzzy reasoning as part of the synthesis of a fuzzy controller of the mobile robot. Finally, we conclude with a comparative analysis of the results obtained in the case of simulation of the two types of controllers. It has been discovered that utilizing fuzzy controller contributes to improved results in tracking the trajectory of a mobile robot, as it reduces errors and increases speed.

Key words: trajectory tracking, mobile robot, PD, fuzzy controller .

# SOMMAIRE

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
------------------------------------	----------

## **Chapitre 01 : généralités sur les robots mobiles**

1.1. Introduction .....	3
1.2. Définition sur la robotique .....	3
1.3. Historique.....	3
1.4. Les robots mobiles .....	4
1.5. Les caractéristiques des robots mobiles .....	4
1.6. Classification des robots mobiles .....	5
1.7. Types de robot mobile .....	6
1.8 Robot mobile a deux roues.....	11
1.9 Robot mobile tricycle.....	13
1.10 Robot mobile type voiture.....	13
1.11. Les domaines d'applications des robots mobiles .....	14
1.12. Les avantages des robots mobiles.....	15
1.13. Optimisation des robots mobiles .....	15
1.14. Conclusion.....	16

## **Chapitre 02 : Modélisation des robots mobiles de type tricycle :**

2.1 Introduction .....	17
2.2 Présentation de la position du robot.....	17
2.3 Le modèle du robot.....	18
2.4 Non holonomie de robot .....	19
2.4.1 Aucun glissement latéral.....	19
2.4.2 Roulement sans glissement .....	20
2.5 Modèle de la roue .....	20
2.5.1 Roue standard fixe .....	21
2.5.2 Roue directrice.....	22

2.5.3 Roue non directrice .....	23
2.6 Modélisation cinématique d'un robot mobile unicycle .....	24
2.7 Modélisation dynamique d'un robot mobile unicycle .....	28
2.8 Conclusion.....	32

## **Chapitre 03 : Commande et résultats de simulation :**

3.1 Introduction .....	33
3.2 Objectif de la commande PID .....	33
3.3 Objectif de la commande par logique floue .....	33
3.4 Contrôleur PID .....	33
3.5) Les composants de contrôleur PID .....	34
3.5.1) Proportionnelle P .....	34
3.5.2) Intégrateur I .....	34
3.5.3) Le dérivateur D .....	34
3.6) Régulateur P .....	35
3.7) Régulateur proportionnel intégrateur (PI) .....	35
3.8) Régulateur proportionnel dérivateur (PD) .....	36
3.9) Régulateur proportionnel intégrateur dérivateur (PID) .....	36
3.10) Réglage des coefficients d'un PD par la méthode de Ziegler nichols .....	37
3.11) Résultats de simulation au cas de PD .....	38
3.12) Contrôleur Floue .....	43
3.13) Ensemble floue .....	43
3.14) Les opérations sur les ensembles floues .....	44
3.14.1) La réunion .....	44
3.14.2) L'intersection .....	44
3.14.3) Le complément .....	44
3.15) Modèle floue .....	44

3.16) Structure générale d'un système floue .....	45
3.16.1) Fuzzification .....	45
3.16.2) Base de données .....	45
3.16.3) Logique de décision .....	45
3.16.4) Défuzzification .....	45
3.17) La commande par logique floue .....	46
3.17.1) Base de données .....	46
3.17.2) Base de règles.....	49
3.18) Résultats de simulation au cas de logique floue .....	49
3.19) analyse comparative .....	56
3.20) Conclusion .....	56
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>57</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>58</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>62</b>

# Liste des figures

## **Chapitre 01 : généralités sur les robots mobiles**

Figure (1.1) : Robot de surveillance mobile S5 series.....	7
Figure (1.2) : le robot-chien de Boston Dynamics .....	8
Figure (1.3) :robot mobile atlas de Boston Dynamic .....	8
Figure (1.4) : robot drone Phantom de DJI.....	9
Figure (1.5) : robot sous-marin pour protéger le récif.....	10
Figure (1.6) : robots Sojourner, Spirit et Opportunity de la NASA.....	10
Figure (1.7): robot mobile a 2 roues Pioneer P3-DX.....	11
Figure (1.8) : robot mobile unicycle.....	11
Figure (1.9) : robot mobile tricycle innok-heros.....	12
Figure (1.10) : robot mobile tricycle.....	13
Figure (1.11) : Robot mobile type voiture .....	13

## **Chapitre 02 : Modélisation des robots mobiles de type tricycle :**

<b>Figure (2.1) : Le plan de référence global et le robot local cadre de référence. ....</b>	<b>19</b>
<b>Figure (2.2) : Caractérisation du roulement sans glissement. ....</b>	<b>21</b>
<b>Figure (2.3) : Roue standard fixe.....</b>	<b>23</b>
<b>Figure (2.4) : Roue directrice et Ses paramètre.....</b>	<b>24</b>
<b>Figure (2.5) : Roue non-directrice .....</b>	<b>25</b>
<b>Figure (2.6) : Robot mobile de type unicycle dans les repères fixe .....</b>	<b>26</b>

## **Chapitre 03 : Commande et résultats de simulation :**

Figure (3.1) : Schéma block régulateur proportionnel .....	36
Figure (3.2) : Schéma block régulateur proportionnel intégrateur.....	37
Figure (3.3) : Schéma block régulateur PD .....	38
Figure (3.4) : le schéma bloc pour régulateur PD .....	39
Figure (3.5) : la courbe de x désirée cas de PD.....	39
Figure (3.6) : la courbe de x mesurée cas de PD.....	40

Figure (3.7) : la courbe de y désirée cas de PD.....	40
Figure (3.8) : la courbe de y mesurée cas de PD.....	41
Figure (3.9) : la trajectoire désirée et mesurée cas de PD .....	42
Figure (3.10) : la courbe de l'erreur de x cas de PD .....	42
Figure (3.11) : la courbe de l'erreur de y cas de PD .....	43
Figure (3.12) : la courbe de la vitesse linéaire v cas de PD.....	43
Figure (3.13) : la courbe de la vitesse angulaire w cas de PD .....	44
Figure (3.14) : la différence entre la logique floue et la logique classique .....	45
Figure (3.15) : schéma d'un système flou.....	46
Figure (3.16) : les entrées et la sortie du première bloc de floue .....	48
Figure (3.17) : la fonction d'appartenance de 'ex' .....	48
Figure (3.18) : la fonction d'appartenance de 'dex' .....	48
Figure (3.19) : la fonction d'appartenance de sortie 'to1' .....	48
Figure (3.20) : les entrées et la sortie du deuxième bloc de floue.....	49
Figure (3.21) : la fonction d'appartenance de 'ey' .....	49
Figure (3.22) : la fonction d'appartenance de 'dey' .....	49
Figure (3.23) : la fonction d'appartenance de sortie 'to2' .....	50
Figure (3.24) : schéma bloc représente la commande par logique floue .....	51
Figure (3.25) : la courbe de x désirée cas de logique floue .....	51
Figure (3.26) : la courbe de y désirée cas de logique floue .....	52
Figure (3.27) : la courbe de x mesurée cas de logique floue .....	52
Figure (3.28) : la courbe de y mesurée cas de logique floue .....	53
Figure (3.29) : la trajectoire désirée et mesurée cas de logique floue .....	54
Figure (3.30) : la courbe de l'erreur de x cas de logique floue .....	54
Figure (3.31) : la courbe de l'erreur de y cas de logique floue .....	55
Figure (3.32) : la courbe de la vitesse linéaire v cas de logique floue .....	56
Figure (3.33) : la courbe de la vitesse angulaire w cas de logique floue.....	56

## Liste des tableaux

Tableau (1.1) : Domaine d'application des robots mobiles .....	14
Tableau (3.1) : la base de règle de l'erreur de x.....	50
Tableau (3.2) : la base de règle de l'erreur de y.....	50

## Liste des symboles et abréviations

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

$2L$  : représente la largeur du robot.

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

$A(q)$ : la matrice des contraintes non-holonomes.

$B(q)$  : la matrice de transformation d'entrée.

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

$F$  : Le vecteur de force généralisée ;

$I$ : est l'inertie totale équivalente du système.

$I_c$ : Moment d'inertie de la plate-forme du robot sans les roues, les moteurs, autour de l'axe vertical qui passe par le point C.

$I_m$ : Moment d'inertie de chaque roue avec le moteur par rapport au diamètre de la roue.

$I_\omega$ : Moment d'inertie de chaque roue avec le moteur par rapport à l'axe de la roue.

$k_p$ : le gain proportionnel

$K_d$ : le gain dérivateur

$K_i$ : le gain intégrateur

$L$ : le Lagrangien.

$m$  : est la masse totale du robot.

$m_c$ : la masse de la plate-forme.

$m_\omega$ : la masse de chaque roue plus la masse du moteur.

$M(q)$  : la matrice d'inertie symétrique définie positive de taille  $n \times n$ .

$q_i$ : la coordonnée généralisée

$R$  : est le rayon de la roue.

$T$  : L'énergie cinétique du système ;

$u$  : le vecteur d'entrée

$V$  : L'énergie potentielle du système ;

$v$  : la vitesse linéaire

$v_{PL}$ : la vitesse linéaire de la roue gauche.

$v_{PR}$ : la vitesse linéaire de la roue droite.

$v_{\omega_R}$ : la vitesse linéaire de la roue droite.

$v_{\omega_L}$  : la vitesse linéaire de la roue gauche.

$V(q, \dot{q})$ : la matrice des forces centrifuges et des forces de Coriolis.

$w$  : la vitesse angulaire

$x^i$  et  $y^i$  : les coordonnées cartésiennes

$\theta$  : est l'angle d'orientation du robot.

$\theta^i$  : l'angle de rotation par rapport à l'axe de référence.

$\theta^R$  : l'angle de rotation par rapport à l'axe de référence du repère mobile

$\varphi_r$  et  $\varphi_l$ : représentent respectivement la vitesse de rotation de la roue droite et de la roue gauche.

$\lambda k$  : Le vecteur des multiplicateurs de Lagrange ;

$(\tau_R, \tau_L)$  : est le couple d'entrée exprimé en Newton mètres (N.m).

$\varepsilon(t)$ : erreur statique

## **Introduction générale :**

La robotique mobile est un domaine en constante évolution qui englobe la conception, le développement et l'utilisation de robots autonomes capables de se déplacer dans leur environnement. Ces robots mobiles offrent des perspectives fascinantes dans de nombreux domaines, de l'industrie à la recherche scientifique en passant par les applications domestiques. Ils sont devenus des acteurs clés dans la transformation de notre société et contribuent à résoudre des problèmes complexes, à améliorer l'efficacité et à faciliter notre vie.[1]

Ce mémoire présente une vue d'ensemble des différents aspects de la robotique mobile, en abordant des sujets tels que la définition et l'histoire de la robotique, les caractéristiques et la classification des robots mobiles, les types de robots mobiles selon leur configuration à roues, ainsi que les domaines d'application et les avantages des robots mobiles. De plus, il examine également des aspects spécifiques tels que la modélisation des robots mobiles de type tricycle et la commande et la simulation des robots mobiles.

Dans le chapitre 01, nous introduisons les bases de la robotique mobile, en définissant la robotique et en mettant en évidence son importance croissante dans notre société. Nous explorons l'histoire de la robotique mobile et ses progrès au fil du temps. Ensuite, nous examinons les caractéristiques des robots mobiles, leur classification en fonction de leurs capacités et leurs divers types, notamment les robots à roues.

Dans le chapitre 02, nous approfondissons la modélisation des robots mobiles de type tricycle. Nous discutons de la position du robot, du modèle du robot lui-même et de la notion de non-holonomie qui affecte les mouvements du robot. Nous examinons également le modèle de la roue et les différentes configurations possibles.

Le chapitre 03 se concentre sur la commande et la simulation des robots mobiles. Nous explorons les objectifs de la commande PD (Proportionnelle -Dérivée) et de la commande par logique floue. Nous examinons en détail les composants et les régulateurs PD, ainsi que les méthodes de réglage des coefficients. Nous abordons également la commande floue, en expliquant les ensembles flous, les opérations sur ces ensembles, les modèles flous et la structure générale des systèmes flous.

Ce travail fournit une vue d'ensemble complète de la robotique mobile et de ses différents

aspects. Il sert de base pour approfondir les connaissances sur les robots mobiles, leur modélisation, leur commande et leurs applications spécifiques. La robotique mobile continue d'évoluer rapidement, et l'exploration des sujets présentés dans ce sommaire contribuera à mieux comprendre les avancées actuelles et futures de ce domaine passionnant.

# **Chapitre 1 :**

**Généralités sur les robots mobile**

## **I.1 Introduction :**

La robotique est un domaine fascinant qui a connu des avancées considérables au fil des décennies. Parmi les domaines les plus innovants de la robotique se trouve celui des robots mobiles. Dans ce chapitre, nous explorerons en détail les robots mobiles, leurs définitions et leurs historiques. Nous examinerons également les caractéristiques essentielles des robots mobiles, ainsi que leurs classifications en fonction de leurs capacités et de leurs caractéristiques structurelles.

## **I.2 Définition sur la robotique :**

Le mot robot vient du mot tchèque « robota ». Le robot est un outil intelligent qui peut interagir avec son environnement pour accomplir des tâches spécifiques et ainsi réduire l'effort humain. Bien qu'il existe divers types de systèmes robotiques, la plupart d'entre eux présentent des caractéristiques communes. [2]

## **I.3 Historique :**

L'histoire des robots mobiles remonte aux années 1950, avec l'introduction des premiers robots à roues pour l'exploration spatiale. Les robots Viking de la NASA, lancés en 1976, étaient équipés de roues et pouvaient se déplacer sur la surface de Mars pour effectuer des tâches d'exploration. [3]

Dans les années 1980, les premiers robots mobiles autonomes ont été développés pour des applications militaires, notamment pour la surveillance et la reconnaissance. Ces robots étaient équipés de capteurs pour percevoir leur environnement et pouvaient se déplacer de manière autonome. [3][4]

Dans les années 1990, les robots mobiles ont commencé à être utilisés dans des environnements industriels pour des tâches de transport et de manutention. Étaient équipés de systèmes de navigation pour se déplacer dans des environnements complexes. [3]

Au cours des dernières décennies, les robots mobiles ont continué à évoluer, avec l'introduction de nouveaux types de robots tels que les robots à pattes et les drones terrestres. [3]

## **I.4 les robots mobiles :**

Un robot mobile est un type de robot qui peut se déplacer dans son environnement pour accomplir une tâche ou atteindre un objectif. Les robots mobiles peuvent être équipés de roues, de pattes, de jambes, d'ailes ou de tout autre moyen de déplacement. Les robots mobiles peuvent être autonomes, semi-autonomes ou téléopérés, en fonction du degré de contrôle exercé sur le robot par un opérateur humain. [5]

Les robots mobiles ont évolué au fil du temps avec les avancées technologiques et les progrès de la recherche en robotique. Les robots mobiles actuels sont plus sophistiqués que jamais, avec des capacités améliorées de perception, de planification et de mouvement. [5]

## **I.5 Les caractéristiques des robots mobiles :**

Les robots mobiles ont plusieurs caractéristiques communes, telles que :

**I.5.1. Système de locomotion :** les robots mobiles peuvent se déplacer en utilisant des roues, des chenilles, des jambes ou d'autres types de systèmes de locomotion. [6]

**I.5.2. Capteurs :** les robots mobiles sont équipés de capteurs pour détecter leur environnement et obtenir des informations sur leur position, leur orientation et les obstacles éventuels. [6]

**I.5.3. Systèmes de navigation :** les robots mobiles utilisent souvent des systèmes de navigation tels que le GPS, la cartographie simultanée et la localisation (SLAM) pour se déplacer dans leur environnement. [7]

**I.5.4. Alimentation :** les robots mobiles sont alimentés par des batteries, des panneaux solaires ou d'autres sources d'énergie. [8]

**I.5.5. Intelligence artificielle :** (IA) est utilisée dans les robots mobiles pour améliorer leur performance et leur capacité à réagir aux événements imprévus et aux erreurs comme la logique floue et les réseaux de neurones. [9]

**I.5.6. Manipulation :** certains robots mobiles sont équipés de bras manipulateurs ou de pinces pour effectuer des tâches telles que la collecte d'objets ou la manipulation de matériaux. [10]

**I.5.7. Communication :** Les robots mobiles peuvent être équipés de systèmes de communication pour communiquer avec d'autres robots ou avec les humains. On est besoin de communiquer avec leur environnement extérieur pour fonctionner efficacement des modules de communication sans fil pour communiquer entre eux.[11]

## **I.6 Classification des robots mobiles :**

Il existe plusieurs façons de classer les robots mobiles en fonction de différents critères. Nous tenons à présenter quelques exemples dans ce qui suit :

### **I.6.1 Selon leur mode de déplacement :**

**I.6.1.1 Roues :** Les robots mobiles qui utilisent des roues comme moyen de locomotion sont communément appelés robots à roues. Ce type de robot est souvent utilisé dans des applications telles que les robots aspirateurs, les robots de surveillance et les robots en milieu industriel. Les robots à roues ont une grande maniabilité sur des surfaces horizontales planes, ce qui les rend adaptés à de nombreux environnements domestiques et professionnels. Il peut être contrôlé à distance ou fonctionner de manière autonome grâce à des capteurs intégrés qui détectent et évitent les obstacles. [12]

**I.6.1.2 Pattes :** Certains robots mobiles utilisent des pattes pour se déplacer. Ces robots, connus sous le nom de robots quadrupèdes ou robots insectoïdes, imitent souvent le mouvement des animaux pour traverser différents types de terrains. Les robots quadrupèdes ont quatre pattes, ce qui leur permet de se déplacer de manière stable et agile. Les robots insectoïdes, quant à eux, s'inspirent du mouvement des insectes et peuvent se déplacer de manière rapide et flexible dans des environnements difficiles d'accès.[13]

**I.6.1.3 Jambes :** Les robots mobiles équipés de jambes sont appelés robots bipèdes ou robots humanoïdes. Ces robots sont conçus pour imiter la locomotion humaine et peuvent se déplacer sur deux jambes. Ils sont souvent utilisés dans des applications de recherche et développement, ainsi que dans le domaine du divertissement et de l'interaction homme-robot. Ce modèle des robots sont généralement plus complexes à concevoir et à contrôler en raison de la nécessité de maintenir l'équilibre et de reproduire les mouvements naturels du corps humain.[14]

**I.6.1.4 Vol :** Certains robots mobiles peuvent voler. Les drones et les hélicoptères télécommandés sont des exemples de robots volants. Ces robots sont équipés de moteurs et d'ailes ou de rotors qui leur permettent de se déplacer dans les airs. Les drones en particulier gagnent en popularité pour une variété d'applications telles que la photographie aérienne, la surveillance et la livraison de colis. Ceux-ci sont généralement contrôlés à distance par un opérateur humain, mais peuvent également fonctionner de manière autonome grâce à des algorithmes de navigation avancés et à des capteurs intégrés.

### **I.6.2 Selon l'utilisation :**

**I.6.2.1 Robots de service :** ces robots sont conçus pour aider les humains dans des tâches quotidiennes, comme les robots aspirateurs, les robots de livraison ou les robots de soins. [15]

**I.6.2.2 Robots militaires** : ces sont utilisés par les forces armées pour effectuer des tâches de reconnaissance, de surveillance ou de combat. [15]

**I.6.2.3 Robots de recherche** : ils sont utilisés dans des domaines tels que la recherche scientifique, l'exploration spatiale ou l'océanographie pour collecter des données et effectuer des mesures. [16]

### **I.6.3 Selon l'intelligence :[15]**

L'intelligence fait partie intégrante du domaine de la robotique mobile. Cela permet aux robots de prendre des décisions de manière autonome, de s'adapter à leur environnement et d'interagir intelligemment avec les humains et les autres robots. Dans cette section, nous discutons de deux aspects importants de l'intelligence des robots mobiles :

- Robots télécommandés
- Robots autonomes.

**I.6.3.1 Robots télécommandés** : Un robot télécommandé est une machine commandée à distance par un opérateur humain. L'opérateur envoie des commandes au robot à l'aide d'un dispositif tel qu'un joystick, un joystick ou une interface informatique. Ces robots sont largement utilisés dans des domaines tels que la recherche, la surveillance, l'exploration spatiale ou les zones dangereuses où l'intervention humaine directe est difficile ou risquée. Les robots télécommandés permettent aux opérateurs de réaliser des tâches précises en contrôlant le mouvement et les actions du robot à distance.[17]

**I.6.3.2 Robots autonomes** : Les robots autonomes sont des machines capables de se déplacer et de prendre des décisions de manière autonome, sans l'intervention directe d'un opérateur humain. Ces robots utilisent des capteurs tels que des caméras ou des capteurs infrarouges pour détecter leur environnement. Ils intègrent également des algorithmes avancés tels que la planification de trajectoire, la reconnaissance d'objets et l'apprentissage automatique pour naviguer et interagir intelligemment avec l'environnement.[17]

## **I.7 Les types des robots mobiles :**

Nous pouvons diviser les robots mobiles en plusieurs types, notamment :

### **I.7.1. Robots mobiles à roues : [12]**

Les robots mobiles à roues se déplacent en utilisant des roues comme moyen de locomotion. Ils sont largement utilisés dans différents domaines, tels que :

- Les robots aspirateurs domestiques, comme le Roomba, qui nettoient automatiquement les sols des maisons.

- Les robots de livraison, tels que le robot Starship, qui sont conçus pour transporter des colis dans des environnements urbains.
- Les robots de surveillance, comme le robot de sécurité Knightscope, qui patrouillent et surveillent les zones prédéfinies pour assurer la sécurité.



**Figure (1.1) : Robot de surveillance mobile S5 series [18]**

### **I.7.2. Robots mobiles à pattes : [19]**

Les robots mobiles à pattes sont conçus pour imiter le mouvement des animaux à pattes. Ils peuvent être utilisés dans différents contextes, notamment :

- Les robots quadrupèdes, tels que le robot Spot de Boston Dynamics, qui sont utilisés dans des missions de reconnaissance, de surveillance et d'exploration dans des environnements difficiles d'accès pour les humains.
- Les robots insectoïdes, comme le robot Hexbug, qui s'inspirent du mouvement des insectes et peuvent être utilisés dans des applications de recherche scientifique ou d'exploration.



**Figure (1.2) : le robot-chien de Boston Dynamics [20]**

### **I.7.3. Robots mobiles à jambes : [14]**

Les robots mobiles à jambes sont conçus pour se déplacer en utilisant des jambes, imitant ainsi le mouvement des êtres humains ou des animaux bipèdes. Ils peuvent avoir les objectifs suivants :

- Les robots bipèdes, comme le robot humanoïde Atlas de Boston Dynamics, qui sont développés pour effectuer des tâches complexes dans des environnements variés, allant de l'assistance aux opérations de sauvetage en cas de catastrophe.
- Les robots à quatre jambes, comme le robot Minitaur de GhostRobotics, qui sont conçus pour une locomotion agile et stable dans des environnements difficiles.



**Figure (1.3) : robot mobile atlas de Boston Dynamic [21]**

#### **I.7.4. Robots mobiles volants : [22]**

Les robots mobiles volants sont capables de se déplacer dans les airs. Ils sont souvent utilisés pour des missions de surveillance, de photographie aérienne, de livraison ou de divertissement.

Parmi les exemples de robots mobiles volants, on trouve :

- Les drones, tels que le DJI Phantom, qui sont utilisés dans divers domaines, notamment la photographie aérienne, la cartographie, l'inspection des infrastructures ou le divertissement.
- Les hélicoptères télécommandés, comme le Blade 230S, qui sont utilisés pour des applications de loisirs, de compétition ou d'entraînement.

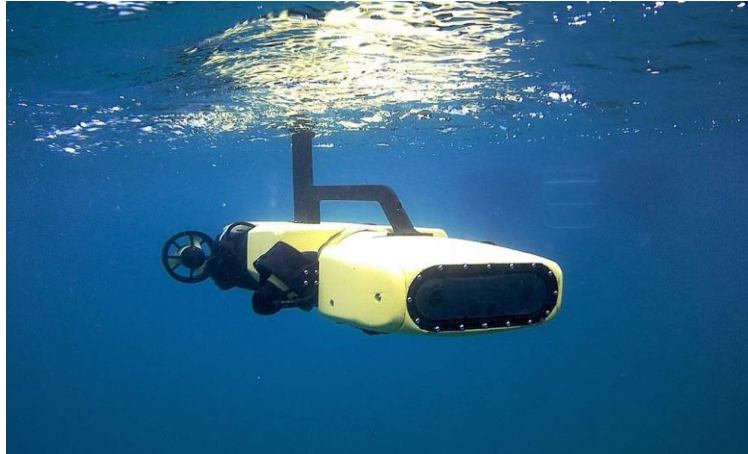


**Figure (1.4) : robot drone Phantom de DJI [23]**

#### **I.7.5. Robots mobiles sous-marins :[24]**

Les robots mobiles sous-marins sont conçus pour se déplacer et opérer dans des environnements subaquatiques. Ils sont utilisés dans diverses applications, notamment :

- Les robots d'exploration océanique, comme le robot sous-marin Nautilus, qui sont utilisés pour explorer les fonds marins, collecter des données océanographiques, étudier la vie marine et rechercher des épaves.
- Les robots de maintenance de plates-formes pétrolières, comme le robot Sub-Atlantic Mohican, qui sont utilisés pour effectuer des tâches de maintenance et d'inspection dans des environnements offshore.



**Figure (1.5) : robot sous-marin pour protéger le récif [25]**

### **I.7.6. Robots mobiles spatiaux : [26]**

Les robots mobiles spatiaux sont utilisés pour explorer l'espace et effectuer des tâches dans des environnements extraterrestres. Parmi eux, on peut citer :

- Les robots d'exploration planétaire, tels que les robots Sojourner, Spirit et Opportunity de la NASA, qui ont été déployés sur Mars pour effectuer des analyses géologiques et rechercher des signes de vie passée ou présente.
- Les robots d'entretien et de réparation de satellites, comme le robot Dextre de l'Agence spatiale canadienne, qui sont conçus pour effectuer des opérations de maintenance et de réparation sur des satellites en orbite.



**Figure (1.6) : robots Sojourner, Spirit et Opportunity de la NASA [27]**

### 1.8) Robot mobile à deux roues :[28]

Les robots mobiles à deux roues sont des robots très maniables et agiles. Ils sont capables de se déplacer dans des espaces restreints et de changer rapidement de direction. Les deux roues indépendantes leur permettent également de se déplacer sur des surfaces inégales ou inclinées, ce qui les rend très polyvalents.

Cependant, comme les robots mobiles à deux roues sont conçus pour se maintenir en équilibre sur deux roues, ils peuvent être plus difficiles à contrôler que les robots mobiles à quatre roues. C'est pourquoi certains modèles de robots mobiles à deux roues utilisent des roues de support supplémentaires pour améliorer leur stabilité. La figure (1.7) représente un robot mobile à roue de type unicycle, Pioneer 3DX



Figure (1.7) : robot mobile a 2 roues Pionner P3-DX [29]

Dans la figure (1.8), le centre de gravité du robot mobile unicycle est situé sur l'axe des coordonnées  $x$  et  $y$ , et l'angle de rotation de ce type de robot est représenté par  $\theta$ .

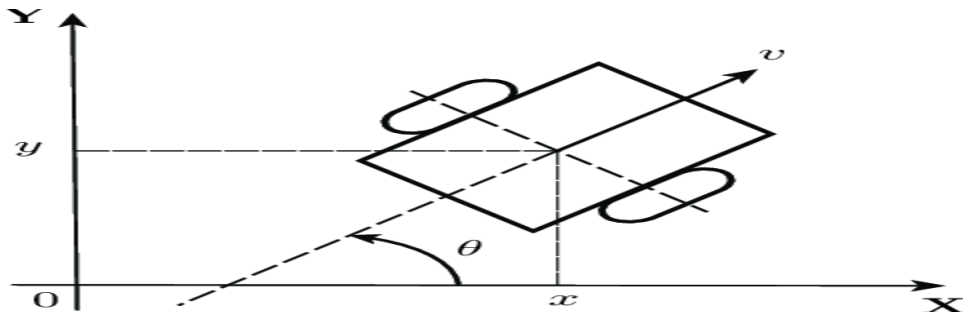


Figure (1.8) : robot mobile unicycle

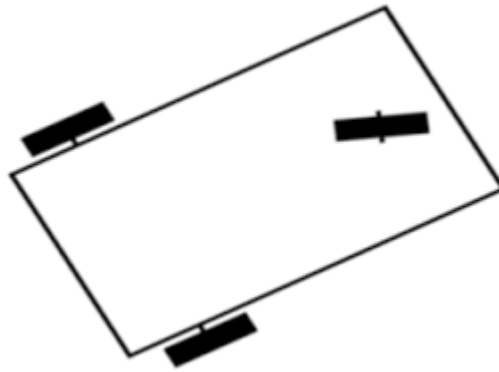
### **1.9) Robot mobile tricycle :[30]**

Robots mobiles tricycles sont utilisés dans une variété d'applications, notamment dans les entrepôts et les centres de distribution pour le transport de marchandises, dans les environnements industriels pour le déplacement de matériaux lourds. Les robots mobiles tricycles sont conçus pour se déplacer sur des surfaces planes ou inégales, et peuvent être équipés de différents types de roues en fonction de leur environnement de travail. Ils sont plus stables que les robots à deux roues, car ils ont une roue supplémentaire pour les soutenir, ce qui leur permet de transporter des charges plus importantes ou de travailler sur des terrains plus accidentés sans risque de basculement. Les robots mobiles tricycles sont également plus maniables que les robots à quatre roues, car ils ont un rayon de braquage plus court. En somme, les robots mobiles tricycles sont des machines polyvalentes et robustes qui peuvent être utilisées dans une variété de contextes industriels et logistiques.



**Figure (1.9) : robot mobile tricycle innok heros [31]**

Un robot de type tricycle est composé de deux roues fixes alignées sur le même axe et d'une roue centrale orientable positionnée le long de l'axe longitudinal du robot (Figure 1.10).



**Figure (1.10) : robot mobile tricycle**

### **1.10) Robot mobile type voiture :[32][33]**

Les robots mobiles de type voiture sont un autre type de robot mobile qui utilise des roues et une structure similaire à celle d'une voiture pour se déplacer. Contrairement aux robots mobiles tricycles, les robots mobiles de type voiture sont souvent conçus pour une utilisation en extérieur. Ils sont utilisés dans une variété d'applications, notamment dans les secteurs de la logistique et de la livraison, où ils peuvent être utilisés pour transporter des marchandises sur de longues distances. Les robots mobiles de type voiture peuvent être équipés de différentes technologies pour améliorer leur autonomie et leur capacité à naviguer dans leur environnement, comme la cartographie et la localisation simultanée (SLAM). Certains modèles peuvent être contrôlés à distance par un opérateur humain. En somme, les robots mobiles de type voiture sont des machines robustes et polyvalentes qui peuvent être utilisées dans une variété de contextes industriels et logistiques.



**Figure (1.11) : Robot mobile type voiture [33]**

### 1.11) Domaine d'application des robots mobiles :

Les domaines d'application des robots mobiles sont vastes. Quelques exemples d'application sont présentés dans le tableau suivant :[34][17]

Industrie	<ul style="list-style-type: none"><li>- le transport de matériaux</li><li>- la manutention de charges lourdes</li><li>-la surveillance de la qualité</li></ul>
Sante	<ul style="list-style-type: none"><li>- le transport de fournitures</li><li>- la livraison de médicaments</li><li>- la désinfection de surfaces</li></ul>
Logistique	<ul style="list-style-type: none"><li>- collecte et la livraison de marchandises</li><li>- la gestion des stocks</li><li>- la surveillance de l'entrepôt</li></ul>
L'agriculture	<ul style="list-style-type: none"><li>- la plantation</li><li>- l'arrosage</li><li>- la récolte</li><li>- le tri des cultures.</li></ul>
Militaire	<ul style="list-style-type: none"><li>- la surveillance</li><li>- la reconnaissance</li><li>-la détection de bombes et la désactivation</li></ul>
Exploration spatiale	<ul style="list-style-type: none"><li>-l'exploration de planètes</li><li>-la collecte d'échantillons</li><li>- la surveillance de l'environnement</li></ul>
Sécurité	<ul style="list-style-type: none"><li>-la surveillance des zones à haut risque</li><li>-la patrouille</li><li>- la reconnaissance</li><li>-la collecte de données</li></ul>
Domestique	<ul style="list-style-type: none"><li>- le nettoyage</li><li>- la tonte de pelouse</li><li>- la livraison de nourriture</li><li>- la surveillance de la maison</li></ul>

**Tableau (1.1) : Domaine d'application des robots mobiles**

## 1.12) Les avantages des robots mobiles : [35][36]

Les robots mobiles offrent de nombreux avantages pour les entreprises et les industries. Voici quelques-uns des avantages des robots mobiles :

- **Automatisation des tâches répétitives** : les robots mobiles peuvent être programmés pour effectuer des tâches répétitives à une vitesse constante et sans se fatiguer.
- **Réduction des coûts** : les robots mobiles peuvent réduire les coûts de main-d'œuvre en effectuant des tâches qui seraient autrement effectuées par des travailleurs.
- **Augmentation de la productivité** : les robots mobiles peuvent travailler plus rapidement et plus efficacement que les humains, augmentant ainsi la productivité de l'entreprise.
- **Amélioration de la sécurité** : les robots mobiles peuvent effectuer des tâches dangereuses ou difficiles pour les humains, améliorant ainsi la sécurité des travailleurs.
- **Flexibilité** : les robots mobiles peuvent être programmés pour effectuer différentes tâches dans différents environnements, offrant ainsi une plus grande flexibilité que les travailleurs humains.
- **Meilleure qualité** : les robots mobiles peuvent effectuer des tâches avec une grande précision et une cohérence élevée, ce qui peut améliorer la qualité des produits ou services.
- **Optimisation de l'espace** : les robots mobiles peuvent se déplacer facilement dans des espaces restreints ou des environnements dangereux, ce qui permet une meilleure utilisation de l'espace disponible.

## 1.13) Optimisation des robots mobiles : [37]

L'optimisation des robots mobiles est un domaine qui vise à augmenter l'efficacité et l'utilisation de ces robots tout en réduisant les coûts associés à leur fonctionnement. Pour atteindre cet objectif, différentes techniques peuvent être mises en œuvre. En voici quelques-uns couramment utilisés :

**1.13.1. Planification de trajectoire** : la planification de trajectoire consiste à utiliser des algorithmes pour déterminer les itinéraires les plus efficaces pour les robots mobiles afin d'atteindre leur destination. Cela peut impliquer la minimisation de la distance parcourue ou du temps de déplacement. En planifiant des trajectoires optimales, les robots peuvent économiser du temps et de l'énergie. [38]

**1.13.2. Allocation de tâches** : les robots mobiles peuvent être affectés à des tâches en fonction de leur capacité et de leur emplacement actuel pour optimiser leur utilisation et maximiser leur contribution à la production ou à la logistique. [39]

**1.13.3. Contrôle d'énergie :** pour maximiser l'autonomie des robots mobiles, les contrôles d'énergie peuvent être utilisés pour minimiser la consommation d'énergie pendant les déplacements, les arrêts et les autres activités.

**1.13.4. Maintenance préventive :** la maintenance préventive peut être utilisée pour minimiser les temps d'arrêt des robots mobiles en effectuant des réparations et des entretiens réguliers pour prévenir les pannes.

**1.13.5. Surveillance en temps réel :** en utilisant des systèmes de surveillance en temps réel, les robots mobiles peuvent être surveillés pour détecter les problèmes et prendre des mesures immédiates pour les corriger.

## **1.14) Conclusion :**

Les robots mobiles représentent une technologie prometteuse avec un large éventail d'applications potentielles. Leur utilisation croissante dans divers secteurs ouvre de nouvelles possibilités pour l'automatisation et l'amélioration des processus. A mesure que les technologies continuent de progresser, les robots mobiles joueront un rôle de plus en plus important dans notre société.

# **Chapitre 02 :**

**Modélisation des robots mobiles  
de type tricycle**

## 2.1) Introduction :

La modélisation des robots mobiles est une étape importante pour comprendre leur comportement et développer des stratégies de contrôle efficaces. Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la modélisation d'un robot mobile de type « tricycle ». Ce modèle particulier est souvent utilisé pour représenter un robot mobile à trois roues. Une roue avant utilisée pour la direction et deux roues arrière assurent la propulsion. [40]

Le but de ce chapitre est d'introduire les bases de la modélisation d'un robot mobile à trois roues et de se concentrer sur les équations et les paramètres les plus importants qui décrivent son mouvement

## 2.2) Présentation de la position du robot :[41]

La position d'un robot mobile peut être définie à l'aide de plusieurs paramètres, qui dépendent du système de coordonnées utilisé. L'une des représentations couramment utilisées est la représentation  $(x, y, \theta)$ , où :

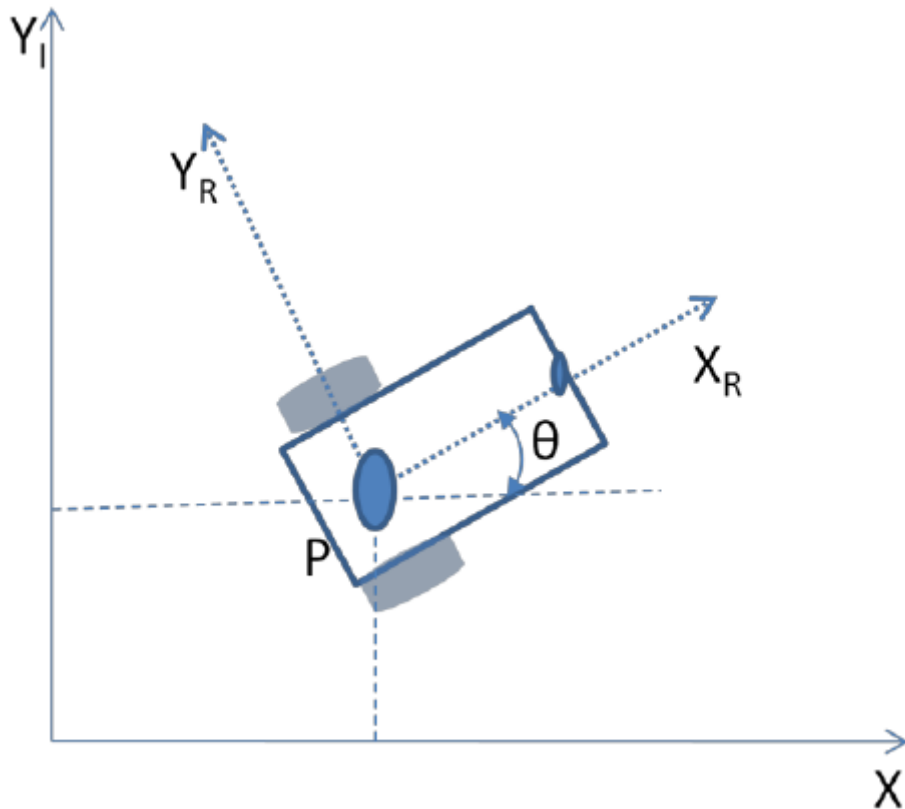
$$q^l = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Les coordonnées  $x$  et  $y$  représentent la position du robot le long des axes horizontaux, tandis que l'angle  $\theta$  représente l'orientation du robot par rapport à un référentiel fixe, généralement mesuré en radians ou en degrés.

Pour décrire le mouvement du robot en termes de mouvements des composants, il sera nécessaire de mapper le mouvement le long des axes du référentiel global au mouvement le long des axes du référentiel local du robot.

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Cette matrice peut être utilisée pour mapper le mouvement dans le référentiel global  $\{X_I, Y_I\}$  au mouvement en termes de référentiel local  $\{X_R, Y_R\}$



**Figure (2.1) : Le plan de référence global et le robot local cadre de référence.[41]**

### **2.3) Le modèle du robot :**

Le modèle de robot mobile tricycle est un robot à roues avec un schéma de mobilité à trois roues. On l'appelle un tricycle parce qu'il ressemble à un tricycle traditionnel utilisé pour le transport humain, avec une grande roue à l'avant et deux roues plus petites à l'arrière.

L'une des caractéristiques distinctives d'un robot mobile tricycle est sa roue avant unique, qui est généralement plus grande que les deux roues arrière. Cette grande roue avant offre une meilleure maniabilité et des virages serrés. Pendant ce temps, les deux roues arrière offrent une stabilité supplémentaire et aident à supporter le poids du robot.

En termes de mécanismes de direction, les robots mobiles tricycles utilisent principalement des systèmes de direction différentiels. Cela signifie que les roues arrière sont alimentées par des moteurs indépendants, tandis que les roues avant sont fixes et non alimentées directement.

La configuration tricycle offre également une meilleure stabilité par rapport aux autres configurations de robots à roues telles que les robots à quatre roues. À l'arrêt, le tricycle robotique s'équilibre sur ses roues avant et ses deux roues arrière, ce qui ajoute de la stabilité lors de la manipulation de charges lourdes.

## 2.4) Non holonomie de robot :[42]

La non-holonomie est un concept utilisé en robotique pour décrire les contraintes de mouvement des robots. Il fait référence à la limitation du mouvement d'un système mécanique dans l'espace, où certains mouvements sont impossibles ou limités en raison de contraintes géométriques ou cinématiques.

Dans le contexte de la robotique mobile, La non-holonomie fait spécifiquement référence aux contraintes de mouvement des véhicules à roues, tels que les voitures ou les robots sur roues. Ces véhicules ne peuvent pas se déplacer latéralement, c'est-à-dire pas directement latéralement. Leur mouvement est limité à une combinaison de translation longitudinale (vers l'avant ou vers l'arrière) et de rotation sur place.

La planification non holonome pose des défis particuliers lors de la planification de trajectoires pour des robots mobiles, puisque les méthodes de planification classiques basées sur la planification holonome (qui ne tiennent pas compte de ces contraintes de mouvement) ne peuvent pas être directement appliquées. Des techniques spécifiques, telles que la planification de trajectoires non holonomes, ont été développées pour tenir compte de ces contraintes et générer des trajectoires réalisables pour les robots mobiles non holonomes.

Le mouvement du robot est caractérisé par deux contraintes non holonomes, qui sont : [27]

**2.4.1. Aucun glissement latéral :** Cela signifie que le robot ne peut pas se déplacer latéralement sans que les roues glissent. Si le robot tente de se déplacer à droite ou à gauche, les roues vont glisser plutôt que de fournir une force de propulsion dans cette direction. Par conséquent, les mouvements latéraux du robot sont restreints.

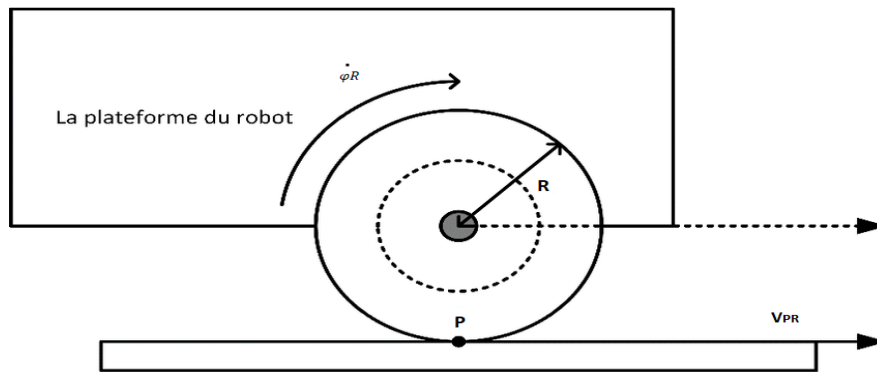
$$\begin{pmatrix} x_A^I \\ y_A^I \\ \theta_A^I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_A^R \\ 0 \\ \theta_A^R \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} x_A^I = x_A^R \cdot \cos\theta \\ y_A^I = x_A^R \cdot \sin\theta \\ \theta_A^I = \theta_A^R \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\Rightarrow -x_A^I \sin\theta + y_A^I \cos\theta = 0 \quad (2.4)$$

### 2.4.2. Roulement sans glissement :

L'hypothèse stipule qu'en se déplaçant vers l'avant ou vers l'arrière, les roues du robot rouleront sans glisser par rapport au sol. Cela signifie que la vitesse de rotation de la roue doit être proportionnelle à son rayon et que le mouvement longitudinal du robot est lié à la rotation de la

roue.



**Figure (2.2) : Caractérisation du roulement sans glissement.**

Chaque roue du robot au point de contact P à la vitesse linéaire :

$$\begin{cases} v_{PL} = R \dot{\varphi}_L \\ v_{PR} = R \dot{\varphi}_R \end{cases} \quad (2.5)$$

Avec :

- $v_{PL}$ : la vitesse linéaire de la roue gauche.
- $v_{PR}$ : la vitesse linéaire de la roue droite.

## 2.5) Modèle de la roue :

Lorsque le robot à roues se déplace, deux contraintes sont appliquées à chaque type de roue pour modéliser sa cinématique.

La première contrainte est basée sur le concept de contact roulant. Cela indique que les roues doivent tourner sans patiner lorsqu'elles se déplacent dans la bonne direction. Cela signifie que la vitesse de rotation des roues doit être proportionnelle à la vitesse de translation du robot dans la direction souhaitée. Par conséquent, lorsque le robot avance ou recule, les roues doivent tourner et maintenir un contact constant avec le sol. La deuxième contrainte est basée sur le concept que le dérapage n'est pas autorisé. Cela indique que la roue ne doit pas glisser perpendiculairement au plan de la roue. En d'autres termes, lorsque le robot essaie de se déplacer latéralement (à droite ou à gauche), les roues doivent rester en contact avec le sol et ne pas glisser latéralement.

Ces deux contraintes sont essentielles pour modéliser la cinématique d'un robot à roues. Ceux-ci permettent de décrire les mouvements individuels des roues en réponse aux mouvements longitudinaux et latéraux du robot. En exprimant ces contraintes pour chaque roue individuelle, nous pouvons combiner les mouvements des roues pour calculer le mouvement global du robot

dans son ensemble.

Nous allons considérer trois types de roues de base :

1. Roue standard fixe.
2. Roue directrice.
3. Roue non-directrice.

### 2.5.1 Roue standard fixe :[41]

Une roue fixe standard est un type de roue qui est fixée à l'axe de rotation du robot et ne peut pas tourner indépendamment. Lorsque le robot se déplace, les roues tournent avec l'axe de rotation, mais elles ne peuvent pas effectuer de mouvement de rotation autonome.

Les roues fixes standard sont couramment utilisées dans les configurations où le robot se déplace en ligne droite ou effectue une rotation par d'autres moyens tels que des roues différentielles ou un système de direction spécifique. Ce type de roue offre une facilité et une stabilité lors du déplacement car la direction du mouvement est déterminée par la rotation de l'ensemble du robot plutôt que par la rotation indépendante des roues.

La figure (2.3) représente une roue standard fixe et montre sa position par rapport au référentiel local du robot. La position du châssis du robot est représentée en coordonnées polaires par la distance  $l$  et l'angle  $\alpha$ . L'angle du plan de roue par rapport au châssis est noté  $\beta$ . Une roue de rayon  $r$  peut tourner dans le temps, sa position de rotation autour de l'axe horizontal est donc fonction du temps  $t$  :  $\varphi(t)$ .

La contrainte de roulement pour cette roue impose que tout mouvement le long de la direction du plan de la roue doit être accompagné de la quantité appropriée de rotation de la roue afin qu'il y ait un roulement pur au point de contact :

$$[\sin(\alpha + \beta) \quad -\cos(\alpha + \beta) \quad -l \cos\beta] R(\theta) \dot{q}_I - r\dot{\varphi} = 0 \quad (2.6)$$

La contrainte de glissement pour cette roue impose que la composante du mouvement de la roue orthogonale au plan de la roue doit être nulle.

$$[\cos(\alpha + \beta) \quad \sin(\alpha + \beta) \quad l \sin\beta] R(\theta) \dot{q}_I = 0 \quad (2.7)$$

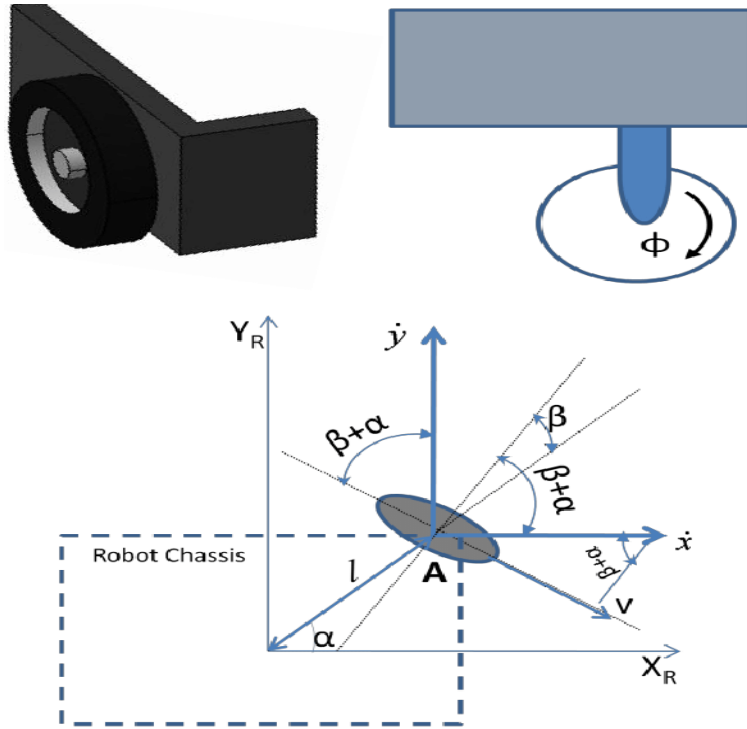


Figure (2.3) : Roue standard fixe [41]

### 2.5.2 Roue directrice :[41] [43]

La roue directrice est une roue qui peut être tournée dans la direction souhaitée. Il est généralement fixé à l'avant du véhicule et actionne la direction en modifiant l'angle de rotation des roues avant. Les volants sont couramment utilisés dans les voitures, camions, chariots élévateurs et autres véhicules similaires. Vous pouvez contrôler la direction du véhicule en faisant tourner les roues avant.

La roue directrice ne diffère d'une roue standard fixe que par un degré de liberté supplémentaire. Cette roue peut tourner autour d'un axe vertical qui passe par le centre de la roue et le point de contact avec le sol.

L'orientation des roues par rapport au châssis du robot n'est plus une seule valeur fixe, elle évolue dans le temps :  $\beta(t)$

$$[\sin(\alpha + \beta(t)) \quad -\cos(\alpha + \beta(t)) \quad -l \cos\beta(t)] R(\theta) * \dot{q}_I - r\dot{\phi} = 0 \quad (2.8)$$

$$[\cos(\alpha + \beta(t)) \quad \sin(\alpha + \beta(t)) \quad l \sin\beta(t)] R(\theta) * \dot{q}_I = 0 \quad (2.9)$$

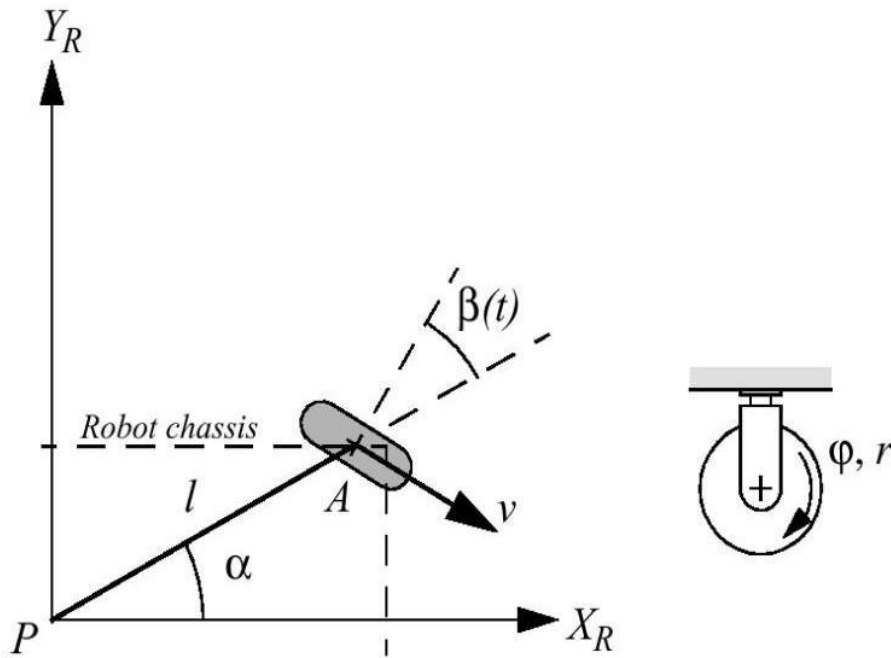


Figure (2.4) : Roue directrice et Ses paramètre [43]

### 2.5.3. Roue non-directrice :[41] [43]

Roue non-directrice, est conçue pour permettre une rotation complète sur son axe vertical. Contrairement à une roue directrice, la roue non-directrice ne peut pas être dirigée. Elle pivote librement et permet au véhicule de se déplacer dans n'importe quelle direction sans changer de trajectoire.

Le point de contact de la roue est maintenant à la position B, qui est reliée par une tige rigide AB de fixe longueur d au point A.

A Fixe l'emplacement de l'axe vertical autour duquel B dirige, et ceci le point A une position spécifiée dans le référentiel du robot comme sur la Fig. (2.5)

Nous supposons que le plan de la roue est aligné avec AB à tout moment. Similaire à la roue standard dirigée, la roulette a deux paramètres qui varient en fonction du temps. Représente la roue tourne au fil du temps comme avant. Désigne l'angle de braquage et l'orientation de AB au fil du temps. Pour la roulette, la contrainte de roulement est identique à avant car l'axe de décalage joue aucun rôle pendant le mouvement aligné avec le plan de la roue

$$[\sin(\alpha + \beta) \quad -\cos(\alpha + \beta) \quad -l \cos\beta] R(\theta) \cdot \dot{q}_I - r\dot{\phi} = 0 \quad (2.10)$$

$$[\cos(\alpha + \beta) \quad \sin(\alpha + \beta) \quad (d + l) \sin\beta] R(\theta) \cdot \dot{q}_I + d\dot{\beta} = 0 \quad (2.11)$$

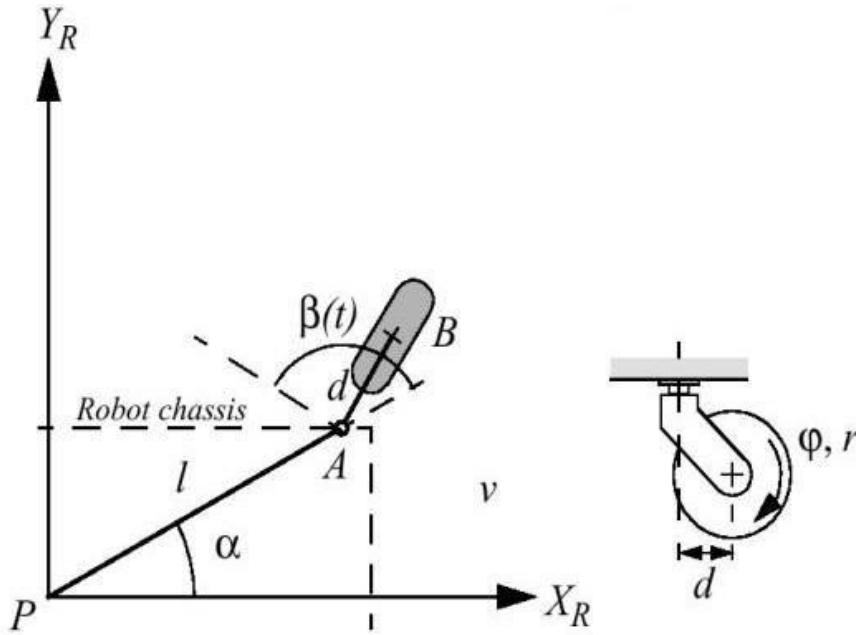


Figure (2.5) : Roue non-directrice [43]

## 2.6) Modélisation Cinématique d'un robot mobile tricycle :[44][45]

La modélisation cinématique d'un robot mobile tricycle est basée sur les mouvements de translation et de rotation des roues arrière du robot.

La relation entre les points  $q^l$  et  $q^r$  peut être exprimée en utilisant la matrice orthogonale  $R(\theta)$ . Cette matrice est utilisée pour effectuer une rotation et représente la transformation entre les coordonnées du repère fixe  $\{X_I, Y_I\}$  et les coordonnées du repère mobile lié au robot  $\{X_R, Y_R\}$ . La position du point  $q^l$  dans le repère fixe peut être représentée par le vecteur  $q^l = [x^l, y^l, \theta^l]^T$ , où  $x^l$  et  $y^l$  représentent les coordonnées cartésiennes et  $\theta^l$  représente l'angle de rotation par rapport à l'axe de référence.

De même, la position du point  $q^r$  dans le repère mobile peut être représentée par le vecteur  $q^r = [x^R, y^R, \theta^R]^T$ , où  $x^R$  et  $y^R$  représentent les coordonnées cartésiennes et  $\theta^R$  représente l'angle de rotation par rapport à l'axe de référence du repère mobile.

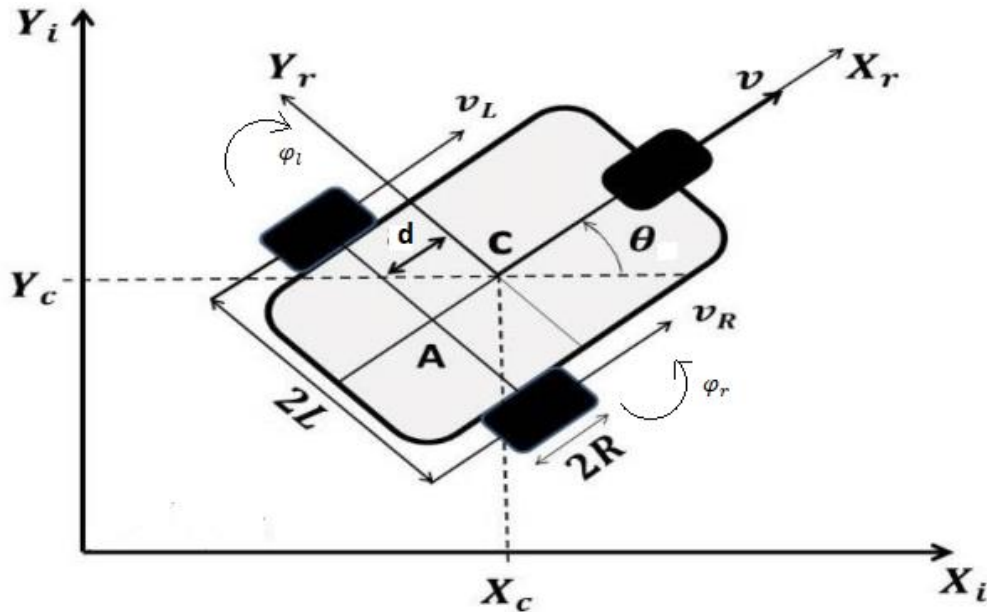
La relation entre les deux repères peut être exprimée comme suit :

$$q^l = R(\theta) q^r \quad (2.12)$$

Où  $R(\theta)$  est la matrice orthogonale représentant la rotation de l'angle  $\theta$ . Cette matrice permet de transformer les coordonnées du repère mobile en coordonnées du repère fixe.

Avec :

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$



**Figure (2.6) : Robot mobile de type unicycle dans les repères fixe**

Avec :

- A : le point milieu de l'axe des roues.
- 2R : représente le diamètre de la roue du robot.
- 2L : représente la largeur du robot.
- $\varphi_r$  et  $\varphi_l$ : représentent respectivement la vitesse de rotation de la roue droite et de la roue gauche.
- $\theta$  : est l'angle d'orientation du robot.
- d : est la distance entre le point A et le point C.

Les expressions généralisées de position et de vitesse dans un repère fixe en fonction des coordonnées du point A sont données par :

- Roue droite :

$$\begin{cases} x_{PR}^l = x_A^l + L \sin\theta \\ y_{PR}^l = y_A^l - L \cos\theta \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_{PR}^l = \dot{x}_A^l + L \dot{\theta} \cos\theta \\ \dot{y}_{PR}^l = \dot{y}_A^l + L \dot{\theta} \sin\theta \end{cases} \quad (2.14)$$

- Roue gauche :

$$\begin{cases} x_{PL}^I = x_A^I - L \sin\theta \\ y_{PL}^I = y_A^I + L \cos\theta \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_{PL}^I = \dot{x}_A^I - L\dot{\theta} \cos\theta \\ \dot{y}_{PL}^I = \dot{y}_A^I - L\dot{\theta} \sin\theta \end{cases} \quad (2.15)$$

En utilisant la matrice de rotation  $R(\theta)$  et en l'appliquant à la roue droite on a :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_{PR}^I \\ \dot{y}_{PR}^I \\ \dot{\theta}^I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_{PR}^r \\ \dot{y}_{PR}^r \\ \dot{\theta}^r \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

Avec :

$\dot{y}_{PR}^r=0$  Signifie que la vitesse au point P de la roue droite est nulle (aucun glissement latéral).

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} \dot{x}_{PR}^I \\ \dot{y}_{PR}^I \\ \dot{\theta}^I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{PR}^r \cos\theta \\ y_{PR}^r \sin\theta \\ \dot{\theta}^R \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

Où :

$$\overrightarrow{v_{PR}^r} = \dot{x}_{PR}^r \vec{i}^r + \dot{y}_{PR}^r \vec{j}^r = R \dot{\phi}_R \vec{i}^r \quad (2.18)$$

$$\Rightarrow v_{PR}^r = \dot{x}_{PR}^r = R \dot{\phi}_R \quad (2.19)$$

$$\dot{x}_{PR}^r \cos\theta + \dot{y}_{PR}^r \sin\theta = R \dot{\phi}_R \quad (2.20)$$

Et le même pour la roue gauche :

$$\dot{x}_{PL}^r \cos\theta + \dot{y}_{PL}^r \sin\theta = R \dot{\phi}_L \quad (2.21)$$

Donc le système d'équation des deux roues se la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_{PR}^r \cos\theta + \dot{y}_{PR}^r \sin\theta = R \dot{\phi}_R \\ \dot{x}_{PL}^r \cos\theta + \dot{y}_{PL}^r \sin\theta = R \dot{\phi}_L \end{cases} \quad (2.22)$$

En introduisant les équations (2.14) et (2.15) dans (2.22) on obtient :

$$\begin{cases} -\dot{x}_{PR}^r \sin\theta + \dot{y}_{PR}^r \cos\theta = 0 \\ \dot{x}_{PR}^r \cos\theta + \dot{y}_{PR}^r \sin\theta = R \dot{\phi}_R \\ \dot{x}_{PL}^r \cos\theta + \dot{y}_{PL}^r \sin\theta = R \dot{\phi}_L \end{cases} \quad (2.23)$$

On peut écrire l'équation (2.23) :

$$A(q)\dot{q}=0 \quad (2.24)$$

$A(q)$  Est la matrice de contraintes non-holonomes donnée par :

$$A(q) = \begin{pmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 & 0 \\ \cos\theta & \sin\theta & L & -R & 0 \\ \cos\theta & \sin\theta & -L & 0 & -R \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

$\dot{q}$  Représente le dérivé de la coordonnée généralisée  $q$ , donnée par :

$$\dot{q} = [x_A, y_A, \theta, \varphi_R, \varphi_L]^T \quad (2.26)$$

On peut obtenir l'expression des vitesses linéaires des roues droite et gauche au point de contact P :

$$\begin{cases} v_{PR} = v_A + L\dot{\theta} \\ v_{PL} = v_A - L\dot{\theta} \end{cases} \quad (2.27)$$

En posant :

$$\begin{cases} v = v_A \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (2.28)$$

On obtient l'expression de la vitesse linéaire  $v$  et la vitesse angulaire  $\omega$  du robot mobile en fonction des vitesses de rotation de la roue gauche  $\dot{\varphi}_L$  et de la roue droite  $\dot{\varphi}_R$  :

$$\begin{cases} v = \frac{(v_{PR} + v_{PL})}{2} = \frac{R(\dot{\varphi}_L + \dot{\varphi}_R)}{2} \\ \omega = \frac{(v_{PR} - v_{PL})}{2L} = \frac{R(\dot{\varphi}_L - \dot{\varphi}_R)}{2L} \end{cases} \quad (2.29)$$

Dans le repère mobile les coordonnées du point A sont :

$$\begin{cases} \dot{x}_A^r = v = \frac{R(\dot{\varphi}_L + \dot{\varphi}_R)}{2} \\ \dot{y}_A^r = 0 \\ \dot{\theta}_A^r = \omega = \frac{R(\dot{\varphi}_L - \dot{\varphi}_R)}{2L} \end{cases} \quad (2.30)$$

on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_A^I \\ \dot{y}_A^I \\ \dot{\theta}_A^I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_A^r \\ \dot{y}_A^r \\ \dot{\theta}_A^r \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

En remplaçant l'équation (2.31) dans (2.32), on obtient :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_A^I \\ \dot{y}_A^I \\ \dot{\theta}_A^I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{R(\dot{\varphi}_L + \dot{\varphi}_R)}{2} \\ 0 \\ \frac{R(\dot{\varphi}_L - \dot{\varphi}_R)}{2L} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{x}_A^I \\ \dot{y}_A^I \\ \dot{\theta}_A^I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} \cos \theta & \frac{R}{2} \cos \theta \\ \frac{R}{2} \sin \theta & \frac{R}{2} \sin \theta \\ \frac{R}{2L} & -\frac{R}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_R \\ \dot{\varphi}_L \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

En combinant les équations (2.29) et (2.33), soit encore à partir de l'équation (2.32), on obtient le modèle cinématique du robot mobile unicycle :

$$\dot{q}_A^I = \begin{bmatrix} \dot{x}_A^I \\ \dot{y}_A^I \\ \dot{\theta}_A^I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

## 2.7) Modélisation Dynamique d'un robot mobile tricycle :[44][45]

La dynamique concerne l'étude du mouvement d'un système mécanique en prenant en compte les forces qui influencent ce mouvement. Contrairement à la cinématique, qui se concentre sur la description des positions, vitesses et accélérations sans considérer les forces, la dynamique analyse comment les forces agissent sur un système et modifient son mouvement.

Les équations du modèle dynamique qui décrivent le mouvement du robot peuvent être obtenues à l'aide de deux approches principales : la méthode d'Euler-Lagrange et la méthode de Newton-Euler. La méthode d'Euler-Lagrange est basée sur une équation différentielle qui peut être utilisée pour décrire le mouvement d'un système mécanique. Cette équation est directement accessible à partir du lagrangien :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = F + A^T(q) \cdot \lambda_k \quad (2.35)$$

Et :

$$L(q, \dot{q}) = T - V \quad (2.36)$$

Avec :

- $L$ : le Lagrangien.
- $T$  : L'énergie cinétique du système ;
- $V$  : L'énergie potentielle du système ;
- $F$  : Le vecteur de force généralisée ;
- $\lambda_k$  : Le vecteur des multiplicateurs de Lagrange ;
- $q_i$ : la coordonnée généralisée et  $q = [x_A, y_A, \theta, \varphi_R, \varphi_L]^T$

L'énergie cinétique  $T$  du système est donnée par :

$$T = T_C + T_{\omega_R} + T_{\omega_L} \quad (2.37)$$

Avec :

- $T_C$ : est l'énergie cinétique de la plateforme.
- $T_{\omega_R}$ : est l'énergie cinétique de la roue droite.
- $T_{\omega_L}$ : est l'énergie cinétique de la roue gauche.

Où :

$$\begin{cases} T_C = \frac{1}{2} m_c v_c^2 + \frac{1}{2} I_c \theta^2 \\ T_{\omega_R} = \frac{1}{2} m_\omega v_{\omega_R}^2 + \frac{1}{2} I_m \theta^2 + \frac{1}{2} I_\omega \varphi_R^2 \\ T_{\omega_L} = \frac{1}{2} m_\omega v_{\omega_L}^2 + \frac{1}{2} I_m \theta^2 + \frac{1}{2} I_\omega \varphi_L^2 \end{cases} \quad (2.38)$$

Avec :

– $m_c$ : la masse de la plate-forme.

– $m_\omega$ : la masse de chaque roue plus la masse du moteur.

– $v_{\omega_R}$ : la vitesse linéaire de la roue droite.

–  $v_{\omega_L}$  : la vitesse linéaire de la roue gauche.

– $I_c$ : Moment d'inertie de la plate-forme du robot sans les roues, les moteurs, autour de l'axe vertical qui passe par le point C.

– $I_m$ : Moment d'inertie de chaque roue avec le moteur par rapport au diamètre de la roue.

–  $I_\omega$ : Moment d'inertie de chaque roue avec le moteur par rapport à l'axe de la roue.

Le point C dans le repère fixe a pour coordonnées :

$$\begin{cases} x_c = x_A + d \cdot \cos\theta \\ y_c = y_A + d \cdot \sin\theta \end{cases} \quad (2.39)$$

A partir de l'équation (2.37) et (2.38) on obtient l'énergie cinétique totale sous la forme suivante :

$$T = \frac{1}{2}m(x_A^2 + y_A^2) - m_c \cdot d \cdot \theta(y_A \cos\theta - x_A \sin\theta) + \frac{1}{2}I_\omega(\varphi_R^2 + \varphi_L^2) + \frac{1}{2}I\theta^2 \quad (2.40)$$

Où :

$$\begin{cases} m = m_c + 2m_\omega \\ I = I_c + m_c \cdot d^2 + 2m_\omega L^2 + 2I_m \end{cases} \quad (2.41)$$

L'énergie potentielle étant nulle car le robot se déplace sur un plan horizontal. Alors on a donc le Lagrangien [44] :

$$L = T \quad (2.42)$$

L'équation (2.35) devient :

$$\begin{cases} m\ddot{x}_A - md\ddot{\theta}\sin\theta - md\dot{\theta}^2\cos\theta = C_1 \\ m\ddot{y}_A - md\ddot{\theta}\cos\theta - md\dot{\theta}^2\sin\theta = C_2 \\ -md\ddot{x}_A\sin\theta + md\ddot{y}_A\cos\theta + I\ddot{\theta} = C_3 \\ I_\omega\ddot{\varphi}_R = \tau_R + C_4 \\ I_\omega\ddot{\varphi}_L = \tau_L + C_5 \end{cases} \quad (2.43)$$

Avec :

– C1, C2, C3, C4 et C5 : sont les coefficients relatifs aux contraintes cinématiques qui peuvent être exprimés en fonction du vecteur de multiplicateurs de Lagrange et de la matrice de contrainte cinématique  $A^T(q)$ .

Le modèle dynamique du robot mobile à roue peut se mettre sous la forme :

$$M(q)\dot{q} + V(q, \dot{q})q = B(q)u - A^T(q) \cdot \lambda \quad (2.44)$$

Où :

$$M(q) = \begin{pmatrix} m & 0 & -md \sin\theta & 0 & 0 \\ 0 & m & md \cos\theta & 0 & 0 \\ -md \sin\theta & md \cos\theta & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_\omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_\omega \end{pmatrix}$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{pmatrix} 0 & -md \dot{\theta} \cos\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -md \dot{\theta} \sin\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \dot{\theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B(q) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A^T(q) \cdot \lambda = \begin{pmatrix} -\sin\theta & -\cos\theta & \cos\theta \\ \cos\theta & \sin\theta & \sin\theta \\ 0 & L & -L \\ 0 & -R & 0 \\ 0 & 0 & -R \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \end{bmatrix}$$

Avec :

- $M(q)$  : la matrice d'inertie symétrique définie positive de taille  $n \times n$ .
- $V(q, \dot{q})$ : la matrice des forces centrifuges et des forces de Coriolis.
- $B(q)$  : la matrice de transformation d'entrée.
- $A(q)$ : la matrice des contraintes non-holonomes.
- $u$  : le vecteur d'entrée,  $u = \begin{bmatrix} \tau_R \\ \tau_L \end{bmatrix}$

En définissant  $\eta = \begin{pmatrix} \dot{\phi}_R \\ \dot{\phi}_L \end{pmatrix}$  comme étant le vecteur de vitesses auxiliaires et en utilisant l'équation (2.34) on peut écrire que :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_A \\ \dot{y}_A \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi}_R \\ \dot{\phi}_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{R}{2} \cos\theta & \frac{R}{2} \cos\theta \\ \frac{R}{2} \sin\theta & \frac{R}{2} \sin\theta \\ \frac{R}{2L} & -\frac{R}{2L} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi}_R \\ \dot{\phi}_L \end{pmatrix} \quad (2.45)$$

$$\Rightarrow \dot{q} = S(q)\eta \quad (2.46)$$

Et :

$$\ddot{q} = \dot{S}(q)\eta + S(q)\eta \quad (2.47)$$

$S(q)$  Est une matrice de rang complet qui satisfait à la condition suivante :

$$S^T(q)A^T(q) = 0 \quad (2.48)$$

En remplaçant (2.47) et (2.48) dans (2.46), on obtient :

$$M(q) = [\dot{S}(q)\eta + S(q)\eta] + V(q, q)S(q)\eta = B(q)u - A^T(q)\lambda \quad (2.49)$$

En multipliant l'équation (2.51) par  $S^T(q)$ , on a :

$$S^T(q)M(q)\dot{S}(q)\eta + S^T(q)M(q)S(q)\eta + S^T(q)V(q, q)S(q)\eta = S^T(q)B(q)u - S^T(q)A^T(q)\lambda \quad (2.50)$$

En posant :

$$\begin{aligned} \bar{M}(q) &= S^T(q)M(q)S(q) \\ \bar{V}(q, q) &= S^T(q)M(q)\dot{S}(q) + S^T(q)V(q, q)S(q) \\ \bar{B}(q) &= S^T(q)B(q) \end{aligned}$$

L'équation (2.51) sous la forme réduite est :

$$\bar{M}(q)\eta + \bar{V}(q, q)\eta = \bar{B}(q)u \quad (2.51)$$

Où :

$$\begin{aligned} \bar{M}(q) &= \begin{bmatrix} I_\omega + \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 + I) & \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 - I) \\ \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 - I) & I_\omega + \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 + I) \end{bmatrix} \\ \bar{V}(q, q) &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{R^2}{2L^2}(m_c d \dot{\theta}) \\ -\frac{R^2}{2L^2}(m_c d \dot{\theta}) & 0 \end{bmatrix} \\ \bar{B}(q) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

En insérant (2.31) dans (2.52) on obtient :

$$\begin{bmatrix} (m + \frac{2I\omega}{R^2}) & 0 \\ 0 & (I + \frac{2L^2}{R^2}I_\omega) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -m_c d \omega \\ m_c d \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R} & 0 \\ 0 & \frac{L}{R} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (2.52)$$

Avec :

$$u = \begin{cases} \tau_R + \tau_L \\ \tau_R - \tau_L \end{cases}$$

Où :

–  $(\tau_R, \tau_L)$  : est le couple d'entrée exprimé en Newton mètres (N.m).

L'équation (2.53) est la forme non linéaire du modèle dynamique du robot mobile soumis à notre étude ; et son expression linéarisée est :

$$\begin{bmatrix} (m + \frac{2I\omega}{R^2}) & 0 \\ 0 & (I + \frac{2L^2}{R^2} I\omega) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R} & 0 \\ 0 & \frac{L}{R} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (2.53)$$

Où :

–  $m$  : est la masse totale du robot.

–  $I$  : est l'inertie totale équivalente du système.

–  $R$  : est le rayon de la roue.

–  $2L$  : est la largeur du robot.

## 2.8) Conclusion :

En conclusion, ce chapitre nous a permis de comprendre les principes de base de la modélisation d'un robot mobile à trois roues. Nous avons pris en compte les équations et paramètres clés qui décrivent le mouvement du tricycle, ainsi que les caractéristiques du modèle de tricycle telles que le système de direction et les contraintes de non-holonomie.

Comprendre la modélisation des robots mobiles à trois roues est essentiel pour développer des stratégies efficaces de planification et de contrôle de trajectoire.

# **Chapitre 03 :**

**Commande et résultats de simulation**

### **3.1) Introduction :**

Dans ce chapitre, nous explorerons deux approches couramment utilisées pour la commande de robots mobiles : le contrôle PD (Proportionnel, Dérivé) et la logique floue.

Le contrôle PD est une méthode classique et largement utilisée qui permet de réguler le mouvement d'un robot en ajustant en temps réel les commandes de vitesse et de direction. Il se base sur le calcul d'une erreur, qui représente la différence entre la trajectoire désirée et la trajectoire réelle du robot.

En revanche, la logique floue offre une approche plus flexible et adaptative pour la commande des robots mobiles. Plutôt que de se baser sur des équations mathématiques précises, la logique floue utilise des règles linguistiques et des fonctions d'appartenance floues pour décrire les relations entre les variables d'entrée et de sortie.

### **3.2) Objectif de la commande PD :**

Le contrôle PD (proportionnel-dérivé) vise à atteindre les objectifs suivants : une réponse rapide et précise du système contrôlé, la stabilisation du système en réduisant les oscillations et les dépassements indésirables, le rejet des perturbations externes et le suivi précis de référence ou de consigne donnée.

### **3.3) Objectif de la commande par logique floue :**

L'objectif global de la commande par logique floue est de fournir une méthode de contrôle flexible, tolérante aux erreurs et adaptative, capable de gérer l'incertitude et de prendre des décisions sur la base de règles linguistiques plutôt que de valeurs numériques précises.

### **3.4) Contrôleur PID :**

Les robots mobiles utilisent souvent des contrôleurs PID pour contrôler la vitesse des roues du robot. Le contrôleur PID tient compte de la différence entre la vitesse cible du robot et la vitesse réelle mesurée et ajuste la puissance fournie aux moteurs de roue pour compenser cette différence.

De plus, un contrôleur PID peut être utilisé pour contrôler l'orientation du robot. Par exemple, si le robot doit suivre une trajectoire courbe, le contrôleur PID considère la différence entre la position réelle du robot et la position souhaitée sur la trajectoire et ajuste les sorties du moteur

pour que le robot suive la trajectoire courbe.

Les contrôleurs PID peuvent également être utilisés en conjonction avec d'autres capteurs. Par exemple, un robot peut suivre une trajectoire en fonction de son environnement, par exemple en évitant des obstacles tout en suivant une trajectoire prédéfinie à l'aide des capteurs de proximité.

### **3.5) Les composants de contrôleur PID :**

Un contrôleur proportionnel-intégral-dérivé (PID) est un mécanisme de rétroaction utilisé dans les boucles de contrôle. Comme son nom l'indique, l'algorithme PID est composé de trois coefficients de base :

#### **3.5.1) Proportionnelle P :[24]**

Dans le contexte des robots mobiles, la composante proportionnelle (P) du contrôleur PID est utilisée pour ajuster la vitesse ou la direction du robot proportionnellement à l'erreur actuelle entre la position ou l'orientation actuelle du robot et la position ou l'orientation souhaitée.

#### **3.5.2) Intégrateur I :[24]**

La composante intégrale du contrôleur PID prend en compte l'intégrale de l'erreur entre la position actuelle et la position souhaitée sur une période de temps donnée. Plus l'erreur est grande et plus elle persiste longtemps, plus la composante intégrale est importante pour corriger l'erreur.

Cependant, il est important de noter que l'utilisation d'une composante intégrale peut également entraîner des oscillations indésirables si elle est mal réglée ou si elle est utilisée avec une composante proportionnelle excessive.

#### **3.5.3) Le dérivateur D :[24]**

La composante dérivée prend en compte la dérivée de l'erreur entre la position actuelle et la position souhaitée, ce qui permet d'ajuster la vitesse ou la direction du robot en fonction de la vitesse à laquelle l'erreur évolue. Cette composante est souvent utilisée pour réduire les oscillations indésirables qui peuvent survenir lorsque la composante proportionnelle est utilisée seule ou lorsque la composante intégrale est mal réglée.

Il est important de noter que l'utilisation d'une composante dérivée peut également entraîner des oscillations indésirables si elle est mal réglée ou si elle est utilisée avec une composante proportionnelle excessive. En outre, la composante dérivée peut également être sensible aux bruits ou aux perturbations dans les capteurs de mesure de la position ou de l'orientation, il est donc important de disposer de capteurs de haute qualité et bien calibrés.

### 3.6) Régulateur P :[6]

L'asservissement de type P sont les plus simples. C'est pour corriger Il est proportionnel à l'erreur et corrige immédiatement les écarts par rapport aux grandeurs régulées.

$$U(t) = k_p * \varepsilon(t) \quad (3.1)$$

Avec :

$\varepsilon(t)$ : erreur statique

$k_p$ : le gain proportionnel

Pour la transformé de Laplace :

$$U(p) = k_p * \varepsilon(p) \quad (3.2)$$

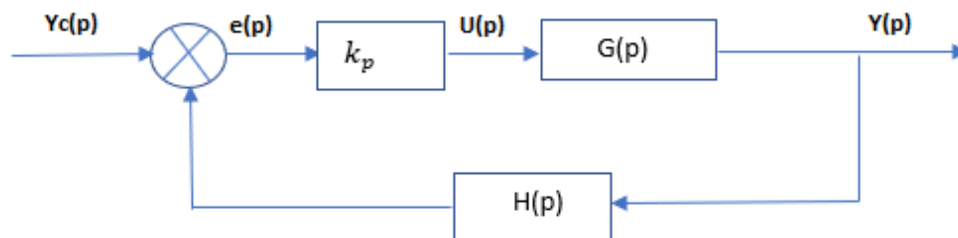


Figure (3.1) : Schéma block régulateur proportionnel

### 3.7) Régulateur proportionnel intégrateur (PI) :[6]

Le terme intégral complète l'action proportionnelle. Parce que ça compense Réduisez les erreurs statiques et améliorez la précision en régime permanent. L'idée est d'intégrer Détectez l'erreur depuis le début et ajoutez cette erreur à la valeur cible : L'erreur devient de plus en plus petite en fonction de la valeur cible. L'intégration agit comme un filtre pour le signal intégré. Peut être réduit Il réduit l'influence des perturbations (bruit, interférences), résultant en un système plus stable. Malheureusement, un débordement peut se produire si le terme entier est trop grand. Il y a des baisses de consigne, des retards de stabilisation ou encore des écarts de vibration.

L'asservissement de type PI est un asservissement de type P auquel on a ajouté un terme intégral:

$$U(t) = k_p \cdot \varepsilon(t) + k_i \cdot \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau \quad (3.3)$$

En utilisant la transformée de Laplace :

$$U(p) = k_p \cdot \varepsilon(p) + k_i \cdot \frac{\varepsilon(p)}{p} = \varepsilon(p) \cdot \left[ k_p + \frac{k_i}{p} \right] \quad (3.4)$$

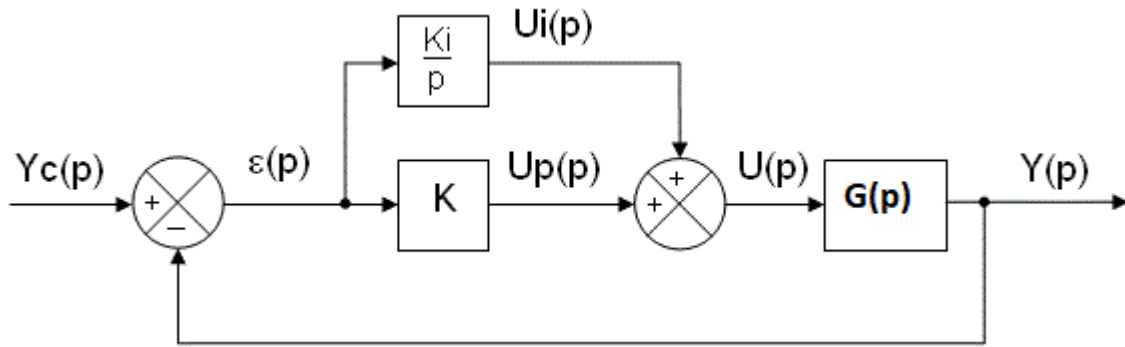


Figure (3.2) : Schéma block régulateur proportionnel intégrateur

### 3.8) Régulateur proportionnel dérivateur (PD) : [24]

Il s'agit d'un type de contrôleur proportionnel-dérivé continu utilisé dans l'ingénierie des systèmes de contrôle. Il combine un contrôleur proportionnel (qui émet un signal de commande proportionnel à l'erreur entre les valeurs souhaitées et réelles) avec un contrôleur dérivé (qui émet un signal de commande proportionnel au taux de variation de l'erreur). L'objectif du contrôleur PD est d'améliorer la stabilité et le temps de réponse du système en anticipant et en corrigeant les modifications du signal d'erreur.

Voici la loi de commande de régulateur PD :

$$U(t) = k_p \cdot \varepsilon(t) + k_d \cdot \frac{d}{dt} \varepsilon(t) \quad (3.5)$$

En utilisant la transformée de Laplace :

$$U(p) = k_p \cdot \varepsilon(p) + k_d \cdot p \cdot \varepsilon(p) \quad (3.6)$$

### 3.9) Régulateur proportionnel intégrateur dérivateur (PID) : [6]

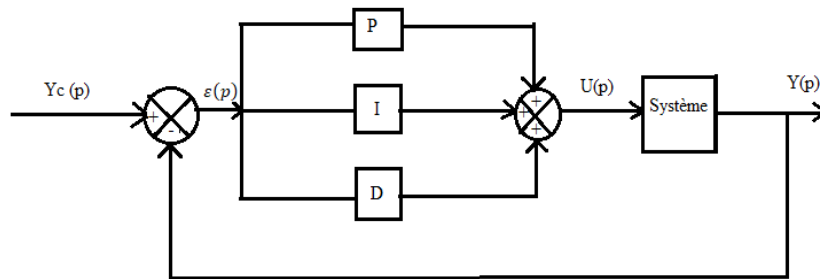
Les composantes proportionnelle et intégrale peuvent provoquer un dépassement et une oscillation de la consigne. Pour supprimer ce phénomène indésirable, une troisième composante, le terme dérivé, est introduite.

Son action dépend du signe et du taux de variation de l'erreur et est à l'opposé de l'action proportionnelle. Cela signifie que le système ralentit, limite les dépassements et accélère le temps de stabilisation.

$$U(t) = k_p \cdot \varepsilon(t) + k_i \cdot \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + k_d \cdot \frac{d}{dt} \varepsilon(t) \quad (3.7)$$

En utilisant la transformée de Laplace :

$$U(p) = k_p \cdot \varepsilon(p) + k_i \cdot \frac{\varepsilon(p)}{p} + k_d \cdot p \cdot \varepsilon(p) = \varepsilon(p) \cdot \left[ k_p + \frac{k_i}{p} + k_d \cdot p \right] \quad (3.8)$$



**Figure (3.3) : Schéma block régulateur PID**

### **3.10) Réglage des coefficients d'un PD par la méthode de Ziegler nichols :**

La méthode de Ziegler-Nichols est une méthode empirique utilisée pour régler les paramètres de rétroaction proportionnelle ( $K_p$ ) et de rétroaction dérivée ( $K_d$ ) d'un régulateur PD (Proportionnel, Dérivé) pour un système de contrôle. Cette méthode se base sur les réponses en boucle ouverte du système.

Voici les étapes pour calculer les gains  $K_p$  et  $K_d$  à l'aide de la méthode de Ziegler-Nichols :

- Réglez le régulateur PD en mode proportionnel uniquement ( $K_p$ ) en désactivant le terme dérivé ( $K_d$ ).
- Augmentez progressivement la valeur de  $K_p$  jusqu'à atteindre la valeur critique ( $K_{p\_critique}$ ) pour laquelle le système oscille avec une amplitude constante.
- Mesurez la période de l'oscillation ( $T_{critique}$ ) correspondante.
- Utilisez les valeurs de  $K_{p\_critique}$  et  $T_{critique}$  pour calculer les gains  $K_p$  et  $K_d$  selon les règles suivantes :

Pour un contrôleur PD (sans terme intégral) :

$$K_p = 0.8 * K_{p\_critique}$$

$$K_d = 0.15 * T_{critique}$$

Dans ce cas  $K_{p\_critique} = 200$  et  $T_{critique} = 6.2$  donc :

$$K_p = 0.8 * 200 = 160$$

$$K_d = 0.15 * 6.2 = 0.93$$

### 3.11) Résultats de simulation :

Voici le schéma bloc pour le régulateur PD de ma simulation dans logiciel MATLAB/SIMULINK :

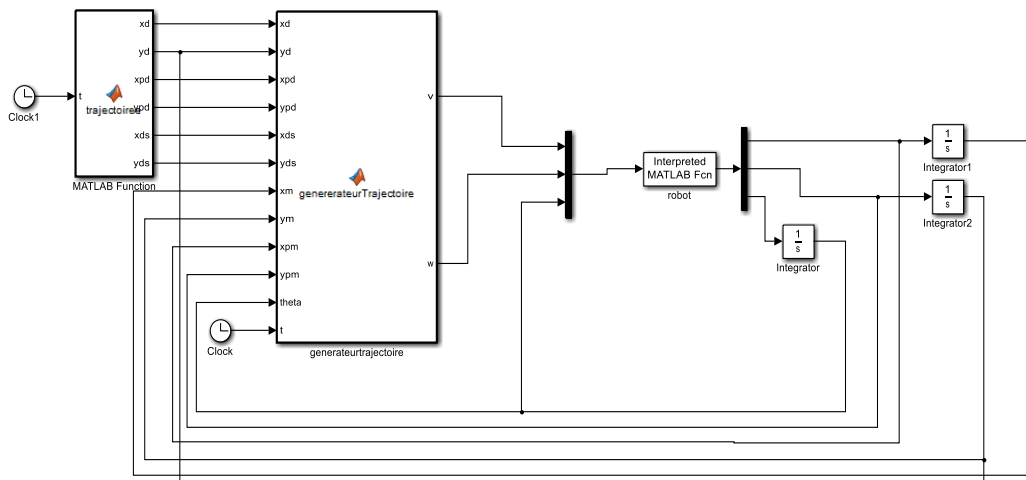


Figure (3.4) : schéma bloc pour régulateur PD

La trajectoire de travail :

$$X(t) = 2 * \cos(t) + 1$$

$$Y(t) = 4 * \sin(t) - 3$$

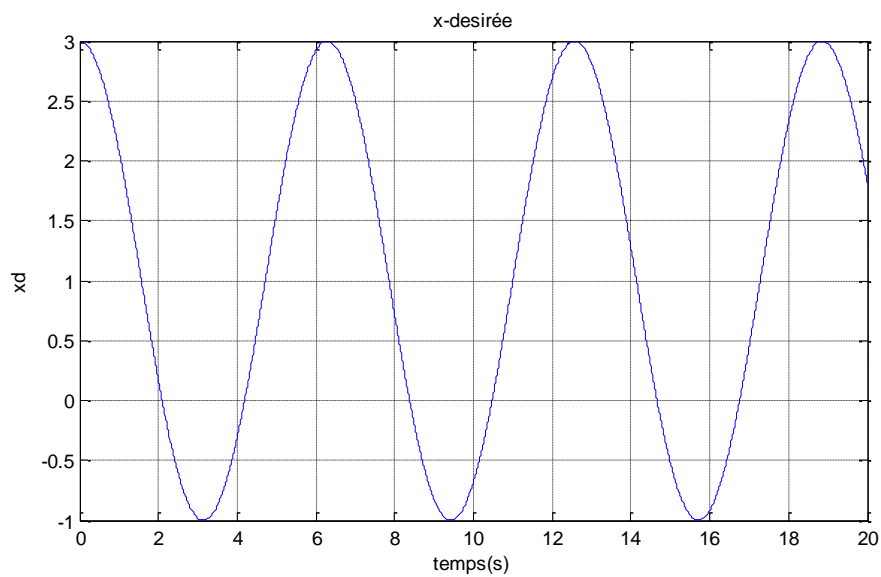
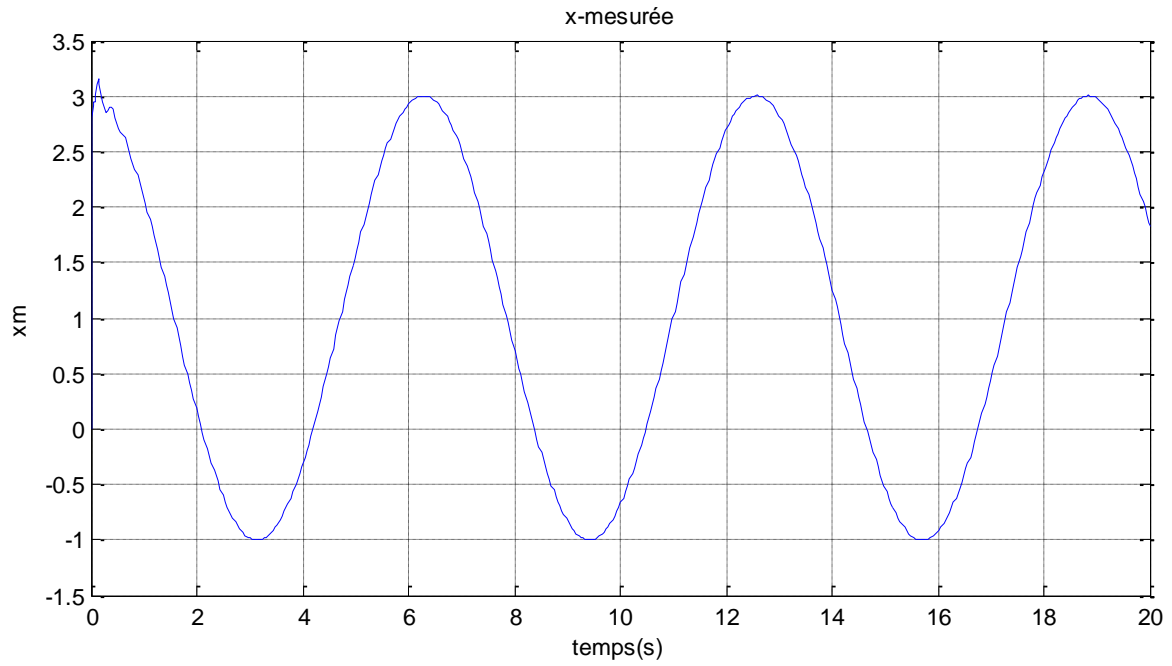
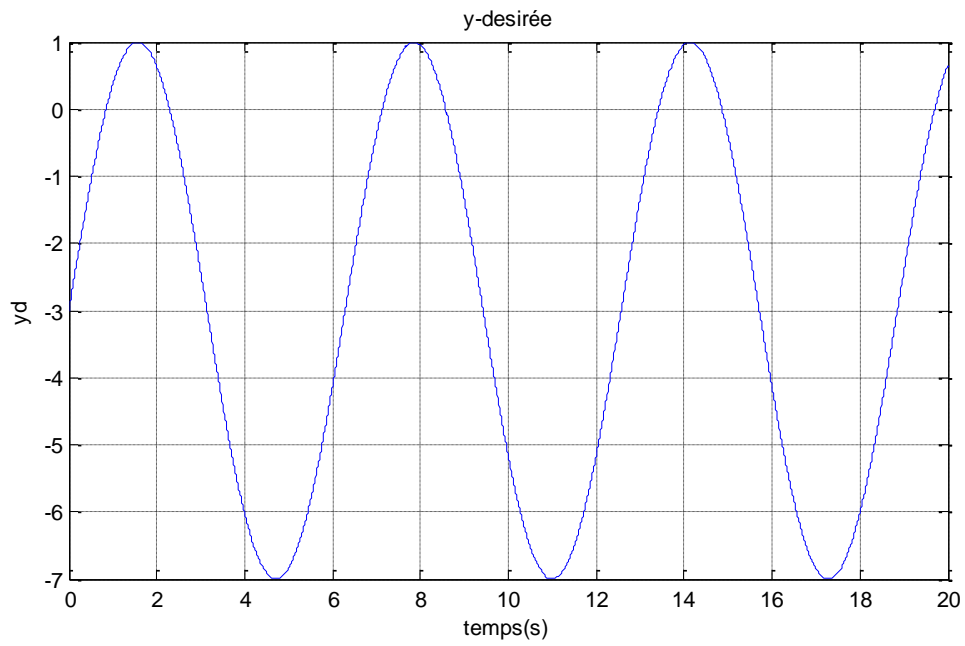


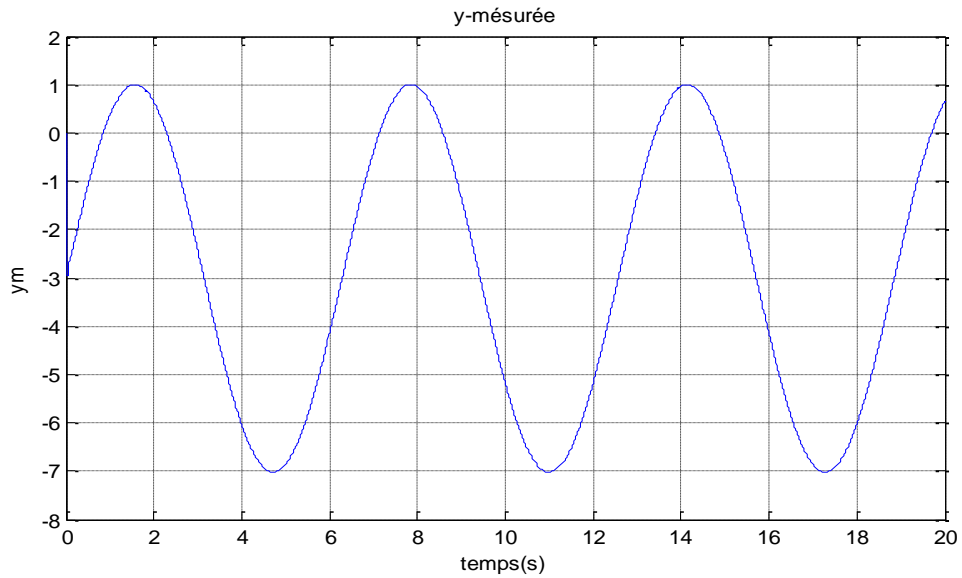
Figure (3.5) : la courbe de x désirée cas de PD



**Figure (3.6) : la courbe de x mesurée cas de PD**



**Figure (3.7) : la courbe de y désirée cas de PD**



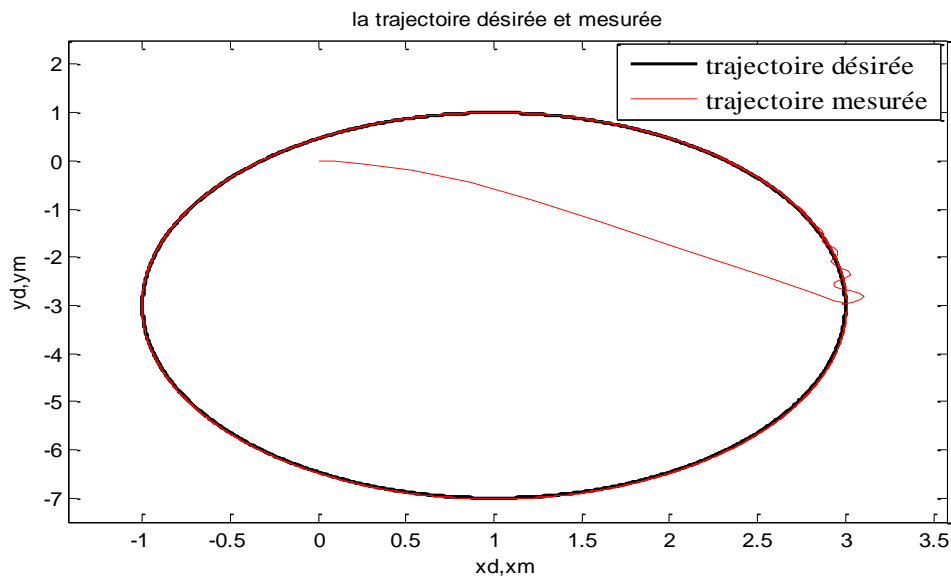
**Figure (3.8) : la courbe de y mesurée cas de PD**

**Interprétation sur la position au cas de PD :**

La figure (3.5) illustre la courbe désirée pour la variable x, qui oscille entre les valeurs de 3 et -1, en commençant à 3. La figure (3.7) représente la courbe désirée pour la variable y, oscillant entre les valeurs de 1 et -7, avec un point de départ à -3. Ces courbes permettent d'atteindre la trajectoire désirée.

D'un autre côté, la courbe représentée dans la figure (3.6) illustre la mesure de la variable x, qui oscille entre les valeurs de 3 et -1. La figure (3.8), quant à elle, représente la mesure de la variable y, qui oscille entre les valeurs de 1 et -7. Ces courbes permettent de parvenir à la trajectoire mesurée.

**Trajectoire :**

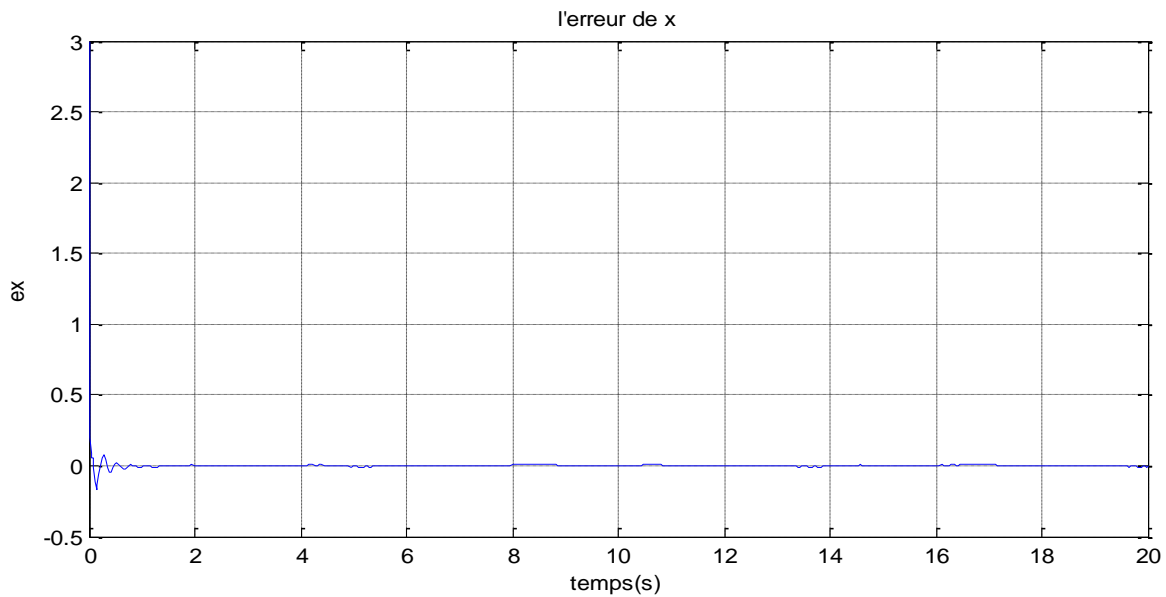


**Figure (3.9) : la trajectoire désirée et mesurée cas de PD**

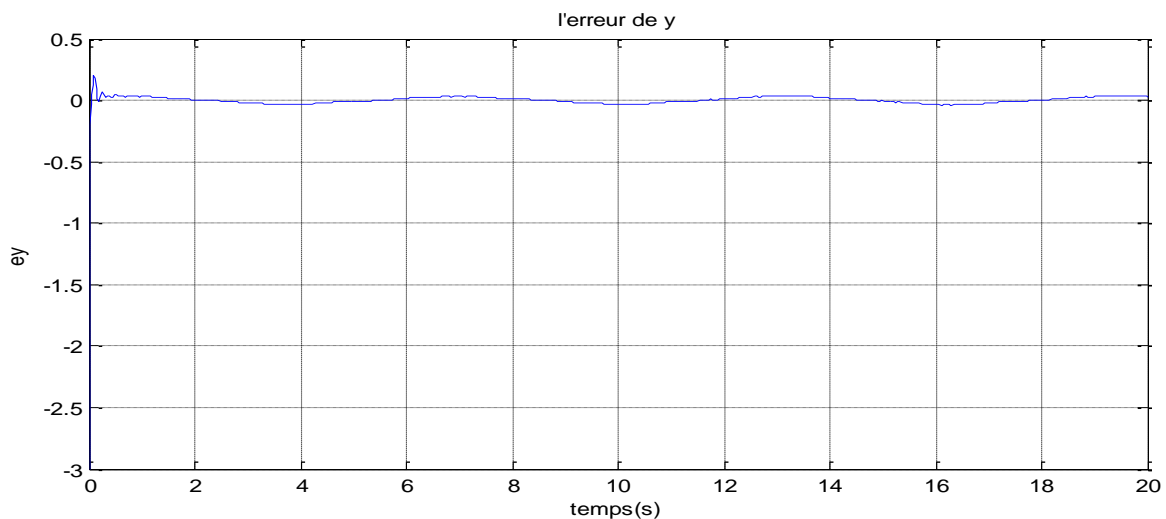
### Interprétation sur les trajectoires au cas de PD :

La figure (3.9) présente à la fois la trajectoire désirée et la trajectoire mesurée. La trajectoire mesurée débute au point  $[0,0]$  et se dirige directement vers le point de départ de la trajectoire désirée,  $[3,-3]$ . Elle oscille ensuite pour se rapprocher de la trajectoire désirée et finit par atteindre exactement la même trajectoire.

### L'erreur :



**Figure (3.10) : la courbe de l'erreur de x cas de PD**



**Figure (3.11) : la courbe de l'erreur de y cas de PD**

### Interprétation sur l'erreur au cas de PD :

La figure (3.10) affiche la courbe de l'erreur de la variable  $x$ . Elle débute à la valeur 3 et décroît jusqu'à atteindre -0.18. À partir de l'instant  $t=0.15s$ , elle oscille régulièrement entre les valeurs de 0.005 et -0.005.

De même, la figure (3.11) représente la courbe de l'erreur de la variable  $Y$ . Elle commence à -3, puis atteint la valeur de 0.2. À partir de l'instant  $t=1s$ , elle oscille systématiquement entre les valeurs de 0.03 et -0.03.

### La vitesse linéaire :

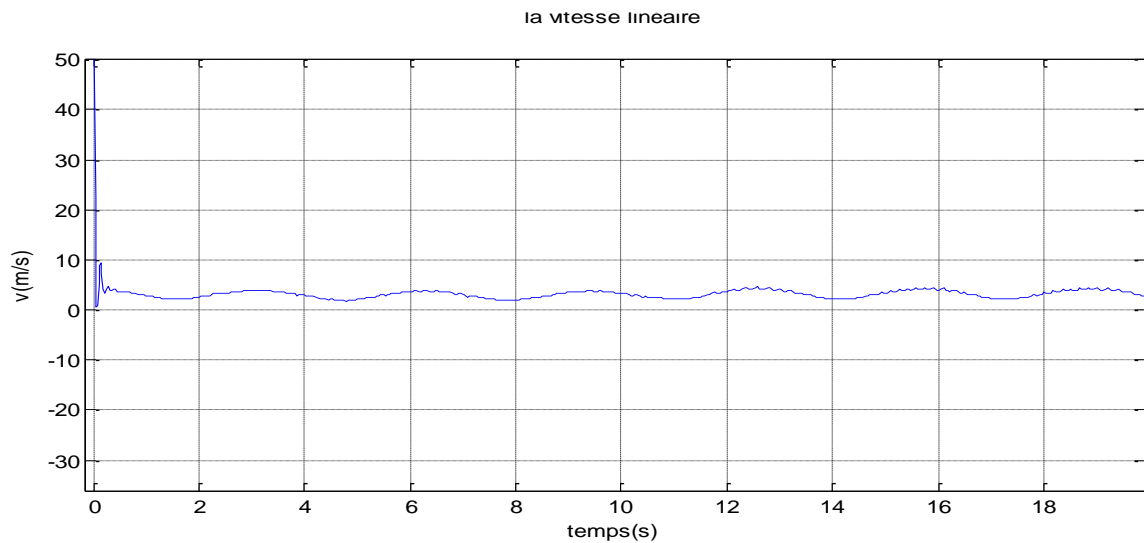


Figure (3.12) : la courbe de la vitesse linéaire  $v$  cas de PD

### La vitesse angulaire :

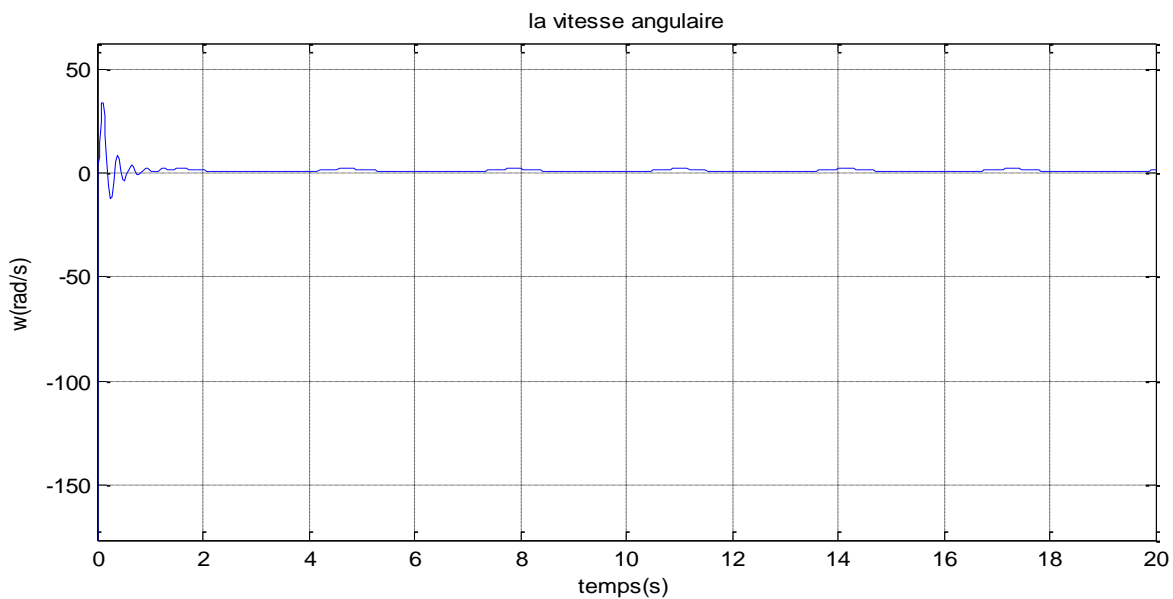


Figure (3.13) : la courbe de la vitesse angulaire  $w$  cas de PD

### **Interprétation sur la vitesse au cas de PD :**

Dans la figure (3.11), la courbe représente la vitesse linéaire. la vitesse est diminuée progressivement jusqu'à atteindre 0 m/s. Ensuite, elle oscille décroissante entre  $t=0.06$  et  $t=0.4$ , pour finalement osciller régulièrement entre les valeurs de 4 m/s et 2 m/s.

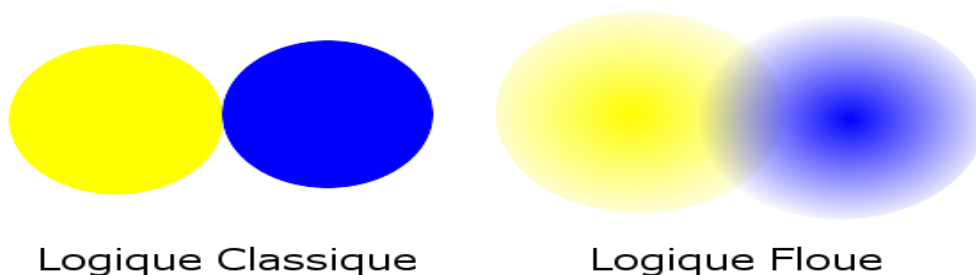
Quant à la figure (3.12), elle représente la vitesse angulaire. À l'instant  $t=0$ , la vitesse est oscillée décroissante entre  $t=0.1$  et  $t=1s$ , pour finalement osciller régulièrement entre les valeurs de 2 rad/s et 0.5 rad/s.

### **3.12) Contrôleur Floue : [46]**

La logique floue a été développée par le professeur Lutfi Zadeh en 1965 dans le but d'étudier les systèmes pour lesquels il est difficile de fournir une description précise. Contrairement à une approche quantitative qui se concentre sur des valeurs précises, la logique floue adopte une approche qualitative. Elle permet de gérer des concepts vagues et de représenter des connaissances approximatives, offrant ainsi une méthode plus souple pour traiter les problèmes complexes. Dans la logique floue, une variable linguistique est utilisée pour représenter des concepts vagues tels que "petit" ou "grand". Contrairement aux variables traditionnelles qui prennent des valeurs numériques précises, les variables linguistiques peuvent prendre des valeurs floues.

### **3.13) Ensemble floue : [34]**

Un ensemble flou est un concept de la théorie des ensembles qui permet de modéliser l'incertitude et l'imprécision. Contrairement à un ensemble classique, où chaque élément appartient ou n'appartient pas à l'ensemble, un ensemble flou permet à chaque élément d'appartenir à l'ensemble avec un certain degré d'appartenance, qui peut varier entre 0 (n'appartient pas à l'ensemble) et 1 (appartient complètement à l'ensemble).



**Figure (3.14) : la différence entre la logique floue et la logique classique**

### **3.14) Les opérations sur les ensembles flous :[47]**

Les opérations sur les ensembles flous sont des opérations qui manipulent et combinent des ensembles flous dans le cadre de la logique floue. Les principales opérations utilisées sont :

#### **3.14.1) La réunion :**

L'union floue permet de combiner deux ensembles flous en conservant les degrés d'appartenance respectifs des éléments. Pour chaque élément, le degré d'appartenance à l'ensemble flou résultant est généralement le maximum des degrés d'appartenance des ensembles flous d'origine. En utilisant l'opérateur "OU" pour représenter l'union, la fonction d'appartenance de l'ensemble flou résultant peut être calculée de la manière suivante :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

#### **3.14.2) L'intersection :**

L'intersection floue permet de trouver les éléments qui appartiennent à la fois aux ensembles flous d'origine. Le degré d'appartenance à l'ensemble flou résultant est généralement le minimum des degrés d'appartenance des ensembles flous d'origine. En utilisant l'opérateur "ET" pour représenter l'intersection, La fonction d'appartenance à l'ensemble flou résultante peut être calculée comme suit :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

#### **3.14.3) Le complément :**

Le complément flou représente la non-appartenance d'un élément à l'ensemble flou et est généralement calculé en soustrayant de 1 le degré d'appartenance à l'ensemble flou. Ainsi, si le degré d'appartenance d'un élément dans un ensemble flou est de 0,8, alors son complément aura un degré de 0,2.

### **3.15) Modèle floue :[46]**

Un modèle flou est une représentation des relations entrée-sortie d'un système à l'aide de règles floues. Les règles sont généralement exprimées sous forme de phrases décrivant les conditions et les actions associées. Par exemple, "Si condition 1 et condition 2 ou condition 3, alors effectuer l'action". Plus précisément, un modèle flou peut être vu comme une combinaison de règles floues. Si un modèle flou contient n règles floues notées R1, R2, R3, ..., Rn, le modèle flou peut être représenté comme l'union de ces règles.[46]

On peut distinguer deux formes de modèle flou :

1. Entrées floues – Sorties floues

## 2. Entrées numériques – Sorties numériques

Dans la deuxième forme on utilise deux types :

- Le modèle flou de MAMDANI : les règles de cette type (les conditions et la conséquence sont des variables linguistique).
- Le modèle flou de Takagi-sugeno : les règles de cette type (les conditions est variables linguistiques et la conséquence est une valeur numérique).

### 3.16) Structure générale d'un système flou :

Le système flou peut être représenté par le schéma suivant :

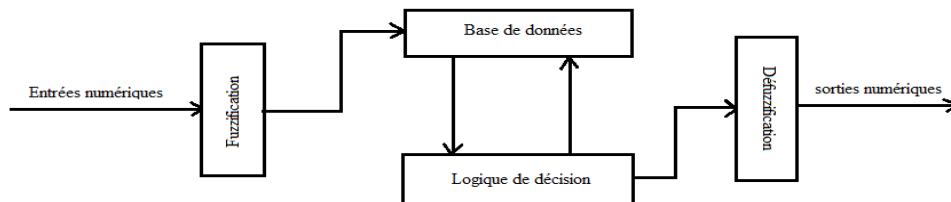


Figure (3.15) : schéma d'un système flou [46]

**3.16.1) Fuzzification :** C'est la première étape de la construction d'un modèle logique flou. Il s'agit de transformer des valeurs numériques en degrés d'appartenance à différents ensembles flous de la partition. Cette étape est nécessaire car la logique floue traite des données imprécises ou incertaines, et les ensembles flous permettent une représentation plus flexible de ce type de données.

**3.16.2) Base de données :** Dans le contexte de la logique floue, une base de données fait référence à l'ensemble de règles et de connaissances utilisées pour prendre des décisions en fonction des données d'entrée. Cette base de données est généralement fournie par un expert dans le domaine modélisé.

**3.16.3) Logique de décision :** Il s'agit du processus d'utilisation des règles de logique floue et des connaissances de la base de données pour prendre des décisions en fonction des données d'entrée. La logique de décision implique d'appliquer les règles aux ensembles flous générés lors de l'étape de fuzzification pour déterminer la sortie appropriée.

**3.16.4) Défuzzification :** C'est la dernière étape du processus de logique floue, où la sortie floue générée par la logique de décision est transformée en une sortie nette qui peut être utilisée

à des fins de contrôle. Cette étape consiste à agréger les valeurs de sortie floues et à les mapper sur une valeur de sortie nette à l'aide d'une méthode de défuzzification.

### 3.17) La commande par logique floue :

Dans cette simulation, nous allons explorer l'utilisation de la logique floue pour gérer les erreurs en x et en y. Nous allons analyser les blocs de logique floue mis en place, décrire les ensembles linguistiques utilisés pour représenter les variables d'entrée et de sortie, ainsi que les plages de valeurs correspondantes. Voici les étapes pour commander un robot mobile par contrôleur flou :

#### 3.17.1) Base de données :

Dans le cadre de ma simulation, nous allons mettre en place deux blocs de logique floue pour traiter les erreurs en x et en y.

Pour le premier bloc :

Entrées :  $ex = \{(\text{Négative 'N'}, \text{Zéro 'Z'}, \text{Positive 'P'}), (-100,100)\}$

$dex = \{(\text{Négative 'N'}, \text{Zéro 'Z'}, \text{Positive 'P'}), (-100,100)\}$

Sortie :  $to1 = \{(\text{Plus Lent 'PL'}, \text{Lent 'L'}, \text{Moyen 'M'}, \text{Rapide 'R'}, \text{Plus Rapide 'PR'}), (-10,10)\}$

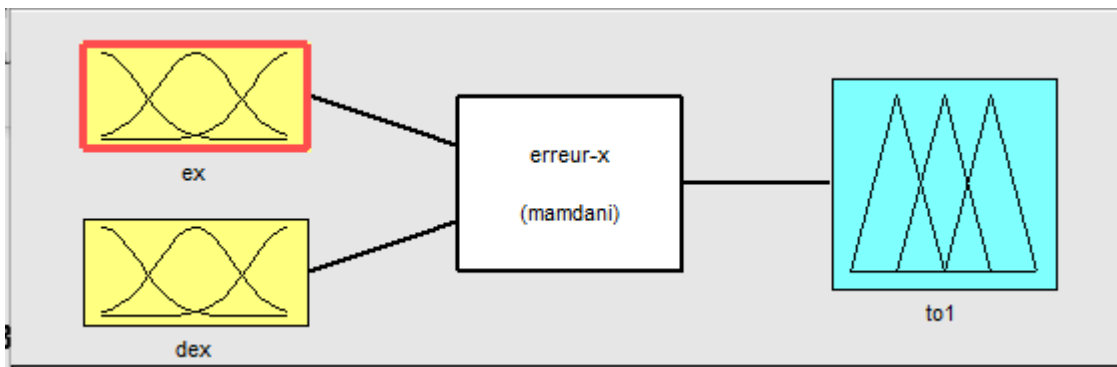


Figure (3.16) : les entrées et la sortie du première bloc de floue

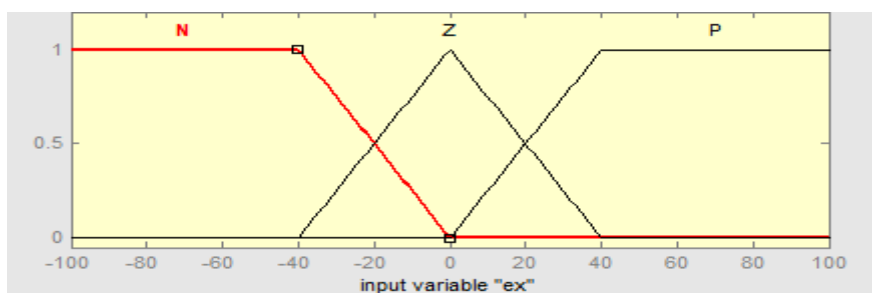


Figure (3.17) : la fonction d'appartenance de 'ex'

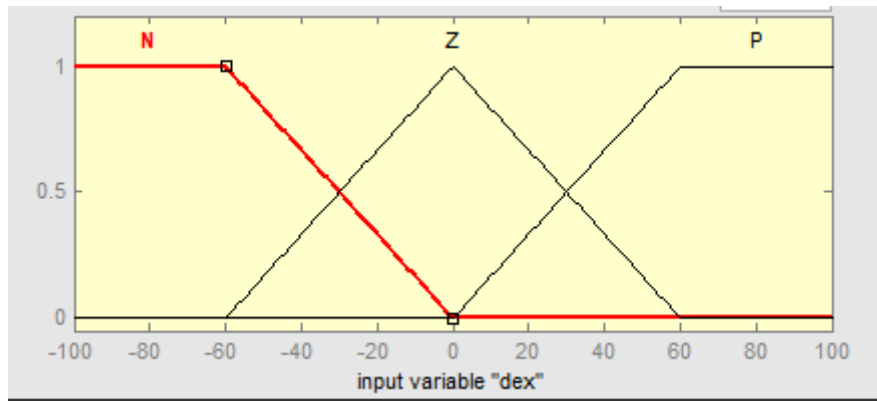


Figure (3.18) : la fonction d'appartenance de 'dex'

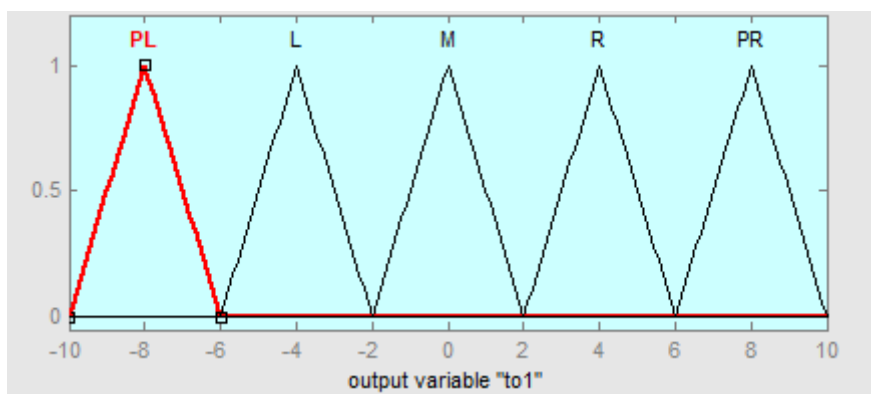


Figure (3.19) : la fonction d'appartenance de sortie 'to1'

Pour le deuxième bloc :

Entrées :  $ey = \{(Négative 'N', Zéro 'Z', Positive 'P'), (-100,100)\}$

$dey = \{(Négative 'N', Zéro 'Z', Positive 'P'), (-100,100)\}$

Sortie :  $to2 = \{(Plus Lent 'PL', Lent 'L', Moyen 'M', Rapide 'R', Plus Rapide 'PR'), (-10,10)\}$

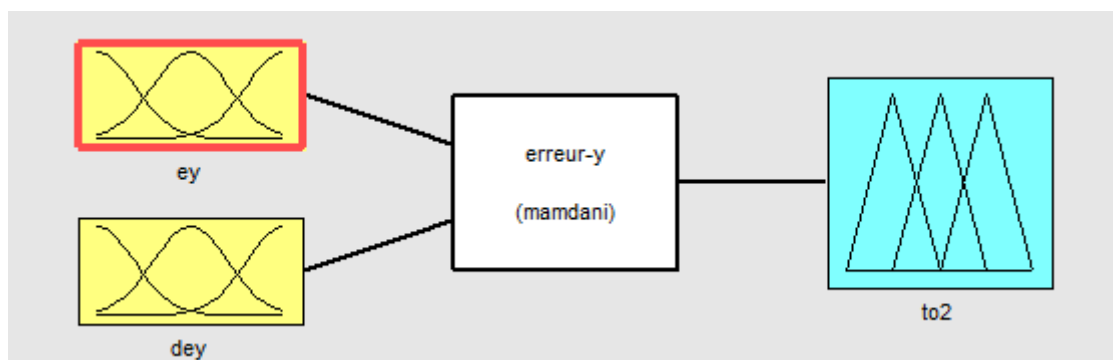
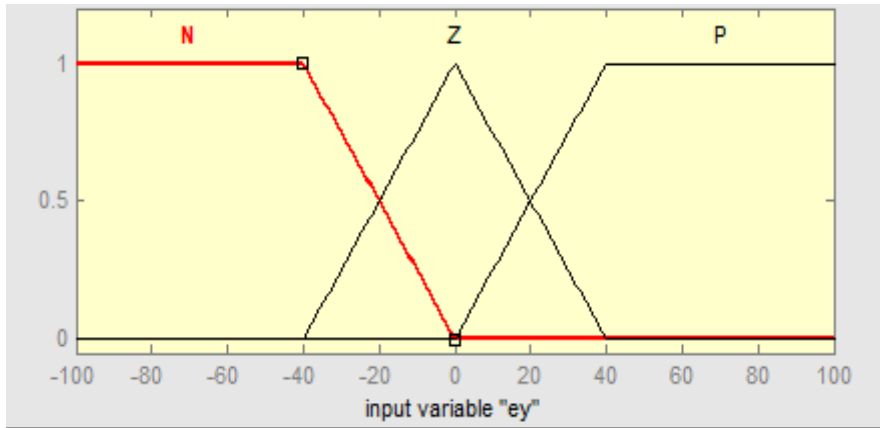
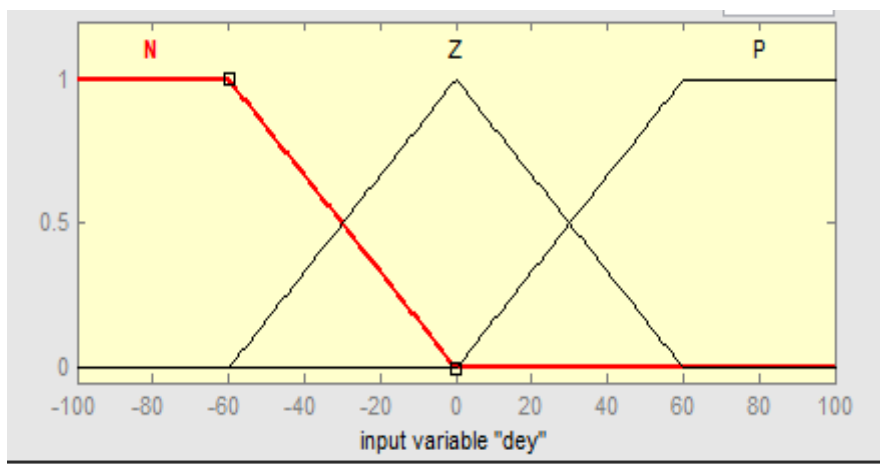


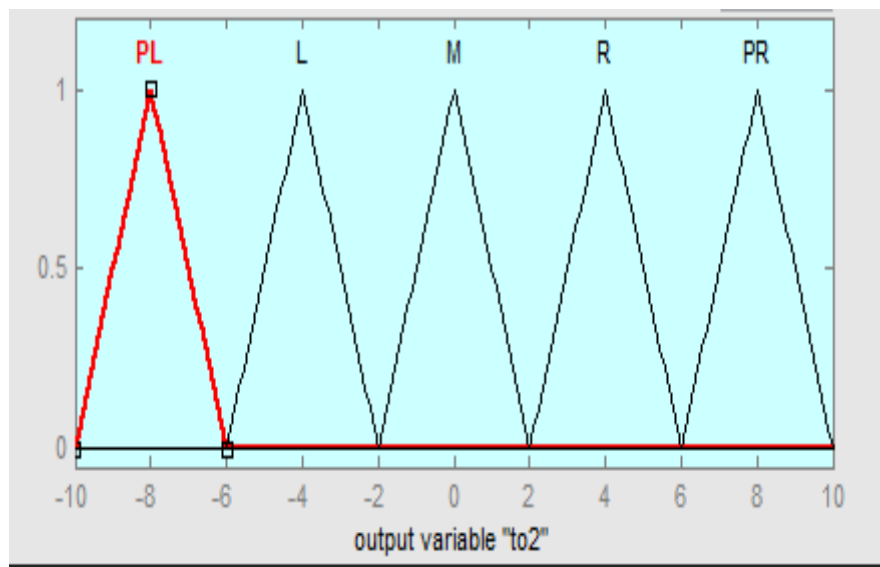
Figure (3.20) : les entrées et la sortie du deuxième bloc de floue



**Figure (3.21) : la fonction d'appartenance de 'ey'**



**Figure (3.22) : la fonction d'appartenance de 'dey'**



**Figure (3.23) : la fonction d'appartenance de sortie 'to2'**

### 3.17.2) Base de règles :

Pour l'erreur de x :

ex \ dex	N	Z	P
N	PL	L	M
Z	L	M	R
P	M	R	PR

**Tableau (3.1) : la base de règle de l'erreur de x**

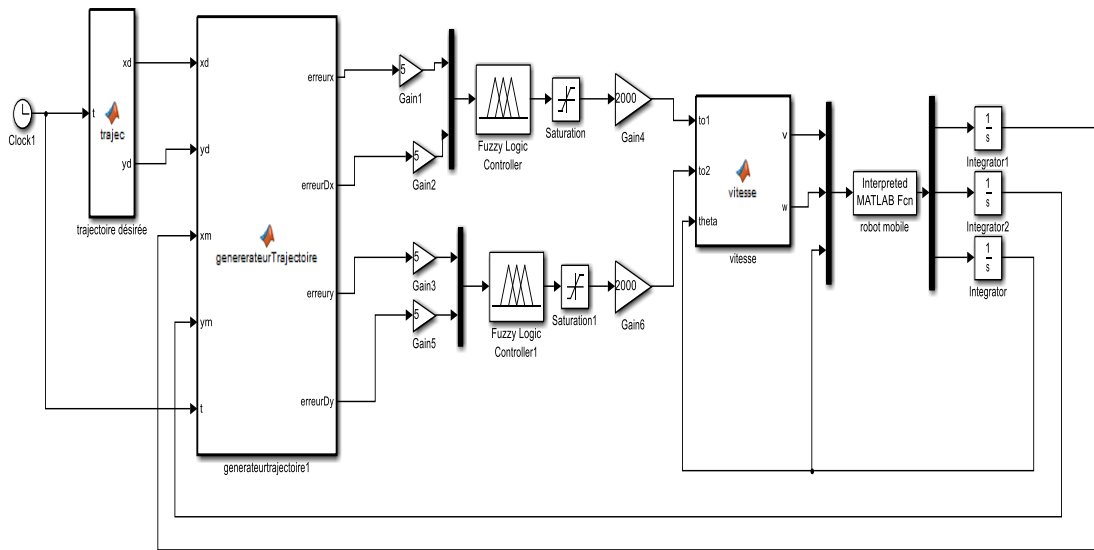
Pour l'erreur de y :

ey \ dey	N	Z	P
N	PL	L	M
Z	L	M	R
P	M	R	PR

**Tableau (3.2) : la base de règle de l'erreur de y**

### 3.18) Résultats de simulation :

Voici le schéma bloc pour le contrôleur flou de ma simulation dans logiciel MATLAB/SIMULINK :

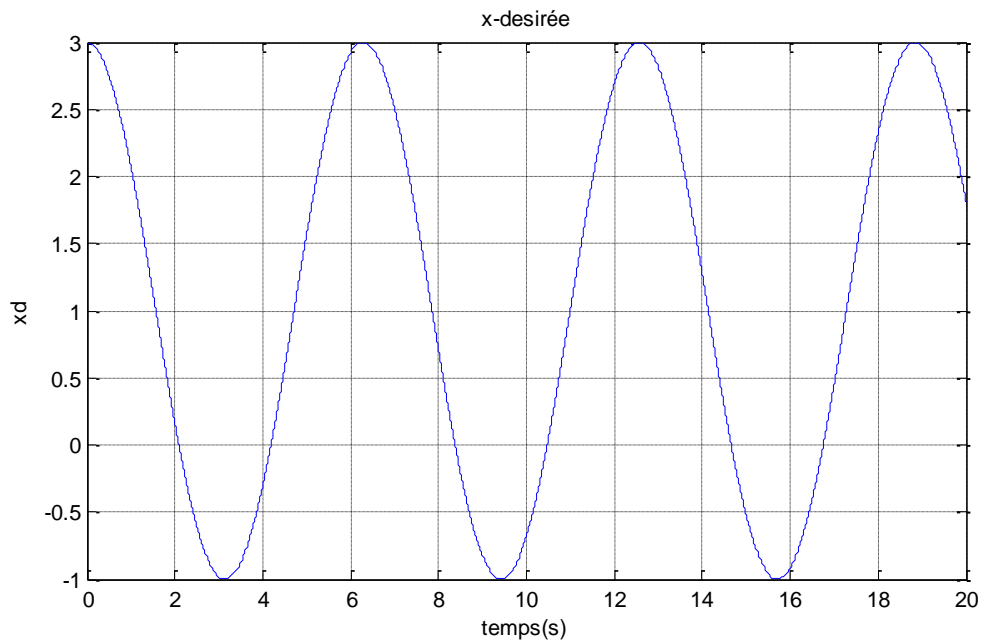


**Figure (3.23) : schéma bloc représente la commande par logique floue**

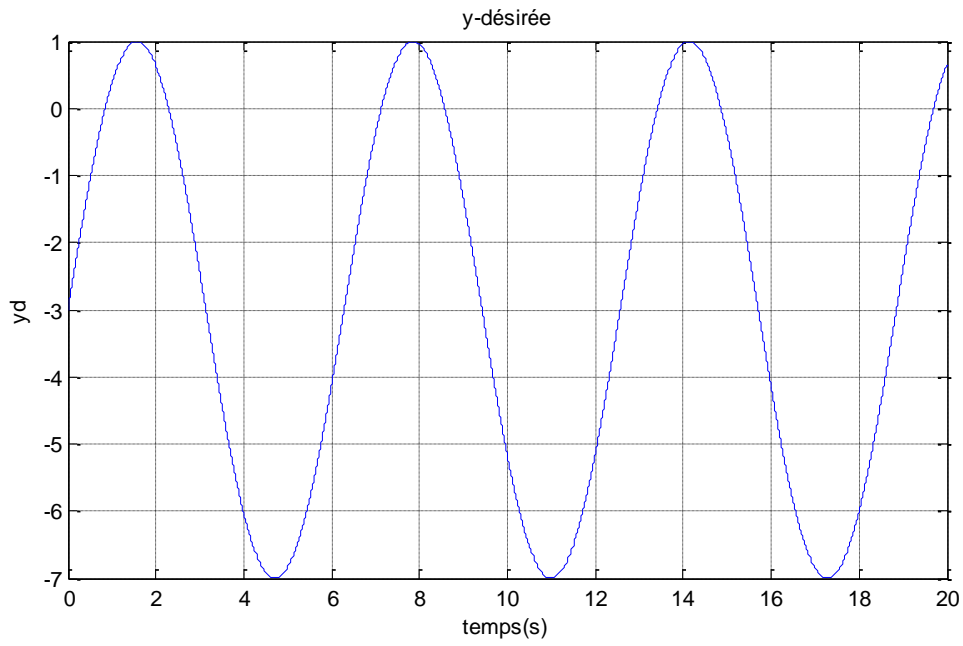
j'ai choisi cette trajectoire circulaire pour faire ma simulation :

$$X(t) = 2 * \cos(t) + 1$$

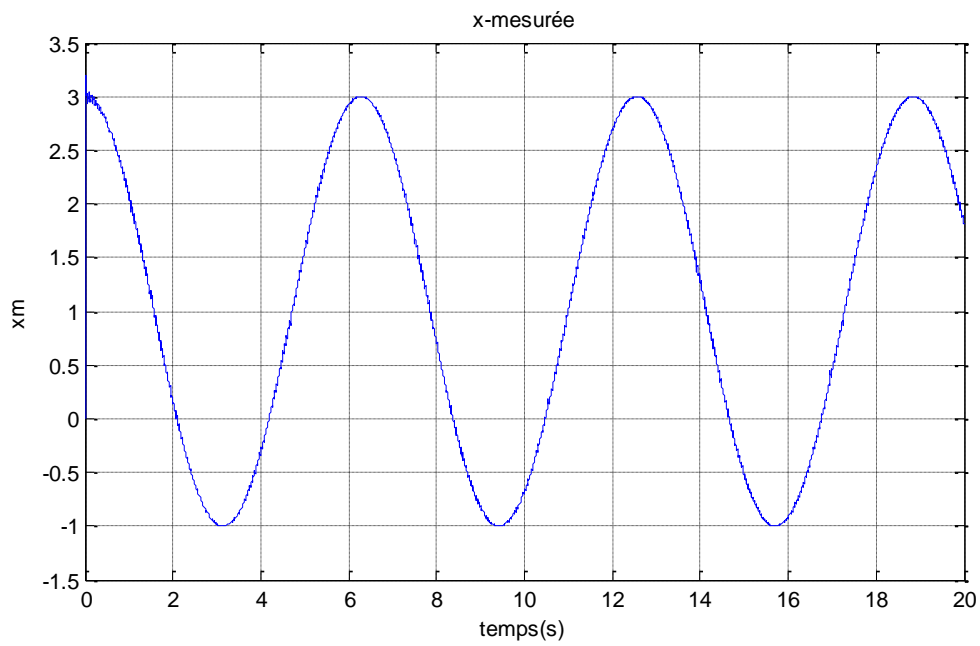
$$Y(t) = 4 * \sin(t) - 3$$



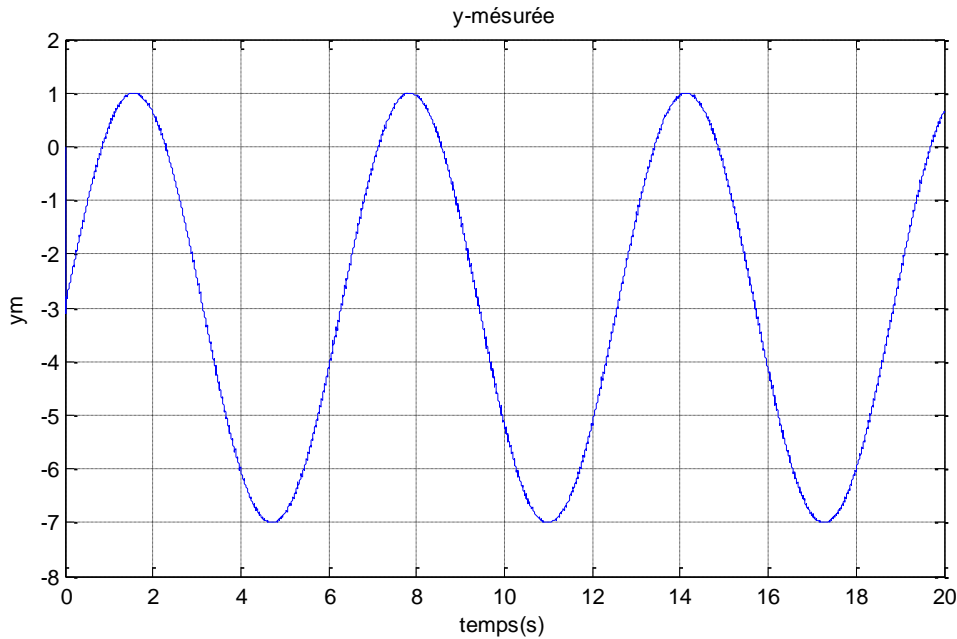
**Figure (3.24) : la courbe de x désirée cas de logique floue**



**Figure (3.25) : la courbe de  $y$  désirée cas de logique floue**



**Figure (3.26) : la courbe de  $x$  mesurée cas de logique floue**



**Figure (3.27) : la courbe de y mesurée cas de logique floue**

**Interprétation :**

La courbe indiquée dans la figure (3.24) représente la trajectoire souhaitée de la variable x, qui oscille entre les valeurs de 3 et -1, avec un point de départ à 3. De même, la figure (3.25) illustre la trajectoire désirée de la variable y, qui oscille entre les valeurs de 1 et -7, en commençant à -3. Ces courbes décrivent les trajectoires cibles que l'on souhaite atteindre.

En revanche, la courbe présentée dans la figure (3.26) représente la mesure réelle de la variable x, qui oscille également entre les valeurs de 3 et -1. Au départ, à  $t=0$ , la valeur est de 0, puis elle atteint la valeur de 3 à  $t=0.01s$ , suivie d'une diminution progressive qui suit approximativement la courbe souhaitée jusqu'à atteindre presque les valeurs désirées à  $t=1s$ . De manière similaire, la figure (3.27) représente la mesure réelle de la variable y, qui oscille entre les valeurs de 1 et -7. Au départ, à  $t=0$ , la valeur est de 0, puis elle atteint la valeur de -3 à  $t=0.01s$ , suivie d'une diminution progressive qui suit approximativement la courbe souhaitée jusqu'à presque atteindre les valeurs désirées à  $t=1s$ . Ces courbes reflètent les mesures réelles de la trajectoire.

En somme, les courbes dans les figures (3.24) et (3.25) décrivent les trajectoires cibles souhaitées pour les variables x et y, tandis que les courbes dans les figures (3.26) et (3.27) représentent les mesures réelles qui s'approchent des trajectoires cibles.

### Trajectoire :

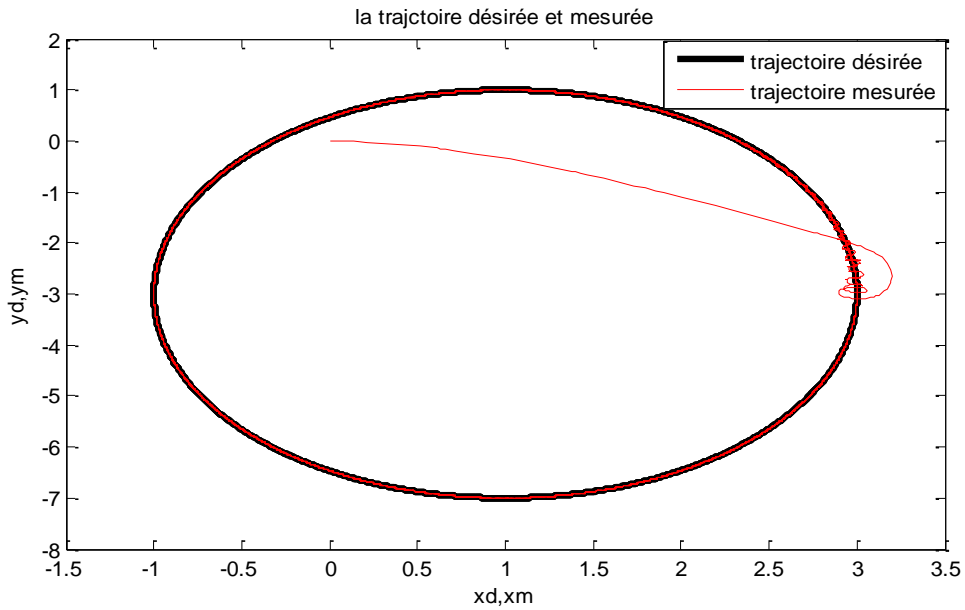


Figure (3.28) : la trajectoire désirée et mesurée cas de logique floue

### Interprétation :

Dans la figure (3.28), nous pouvons observer à la fois la trajectoire désirée et la trajectoire mesurée. La trajectoire mesurée commence au point  $[0,0]$  et se dirige directement vers le point de départ de la trajectoire désirée, qui est  $[3,-3]$ . Ensuite, elle oscille autour de cette trajectoire pour se rapprocher progressivement de la trajectoire désirée, et finalement atteindre exactement la même trajectoire.

### L'erreur de x :

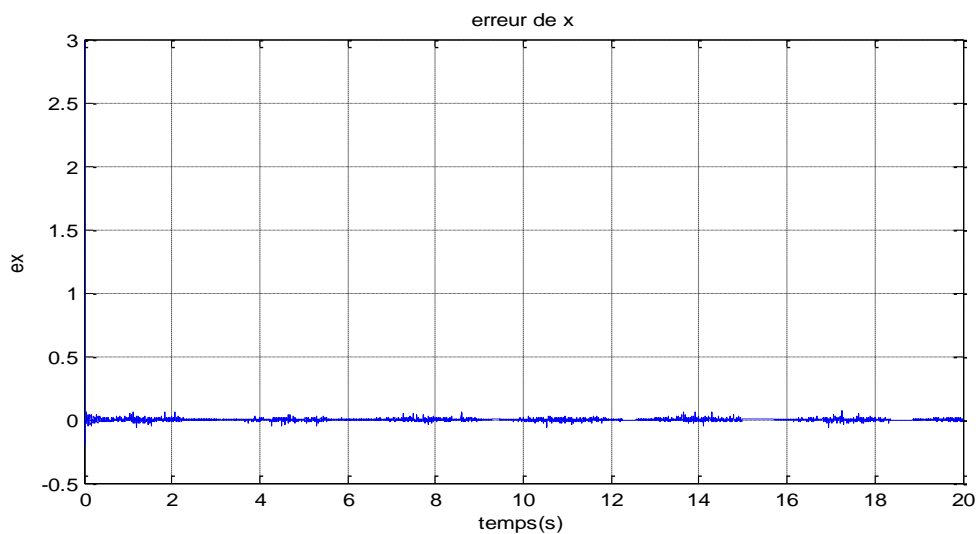
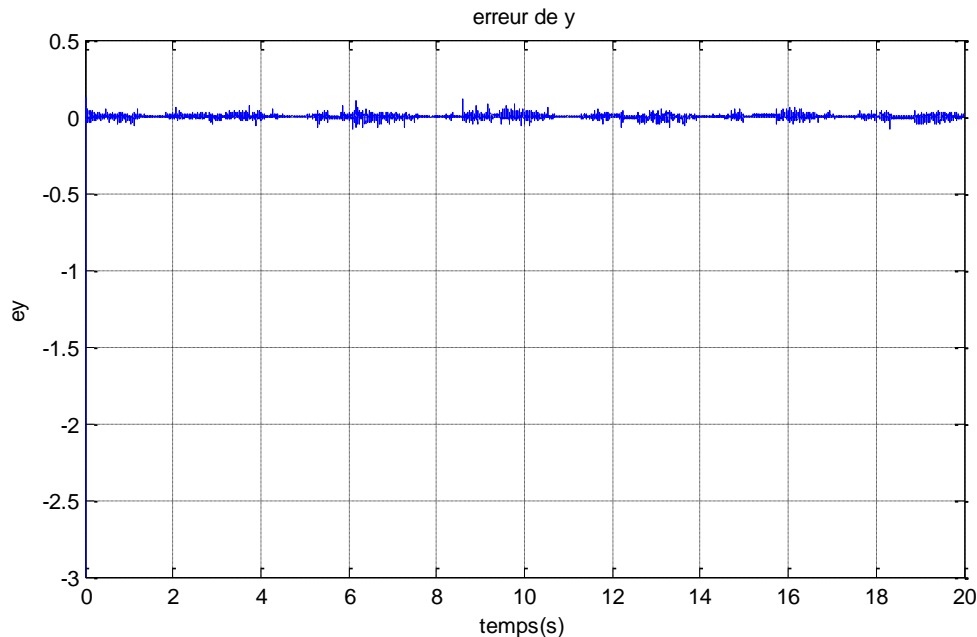


Figure (3.29) : la courbe de l'erreur de x cas de logique floue

## L'erreur de y :



**Figure (3.30) : la courbe de l'erreur de x cas de logique floue**

## Interprétation :

La figure (3.29) présente la courbe de l'erreur de la variable x. Elle débute à la valeur 3 et diminue progressivement jusqu'à atteindre -0.2. À partir de l'instant  $t=0.4s$ , l'erreur oscille entre les valeurs de 0.01 et -0.01, et parfois entre les valeurs de 0.001 et -0.001. Finalement, elle converge vers la valeur  $-4 * 10^{-4}$ .

De manière similaire, la figure (3.30) représente la courbe de l'erreur de la variable y. Elle commence à -3, puis atteint la valeur de 0.12 à l'instant  $t=0.007s$ . À partir de l'instant  $t=0.2s$ , l'erreur oscille entre les valeurs de 0.01 et -0.01, et parfois entre les valeurs de 0.001 et -0.001. Enfin, elle converge vers la valeur de  $8 * 10^{-5}$ .

Les figures (3.29) et (3.30) illustrent respectivement les courbes d'erreur de la variable x et de la variable y. Ces courbes montrent l'évolution de l'erreur au cours du temps, avec des oscillations autour de zéro et une convergence vers des valeurs très proches de zéro à la fin.

### La vitesse linéaire :

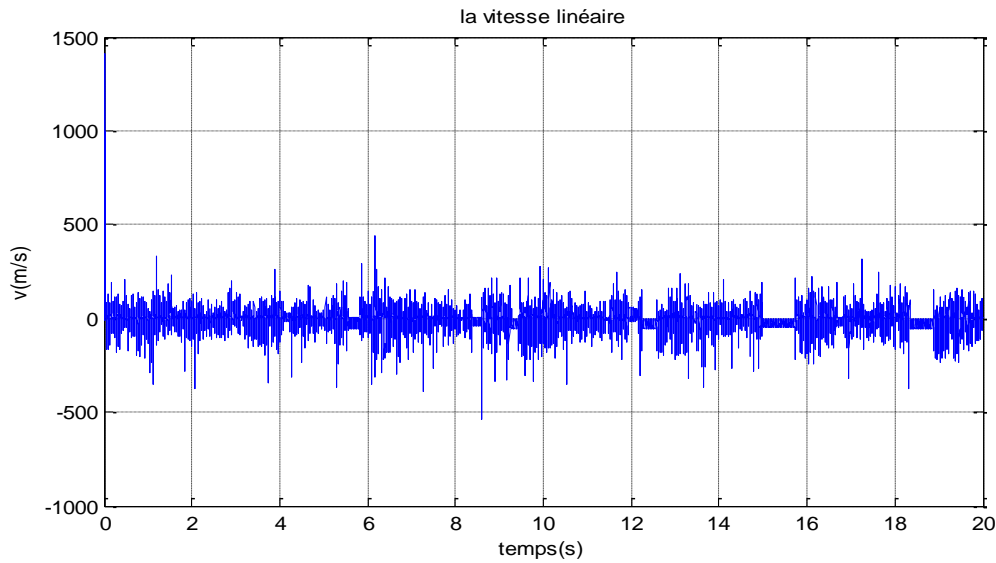


Figure (3.31) : la courbe de la vitesse linéaire  $v$  cas de logique floue

### La Vitesse angulaire :

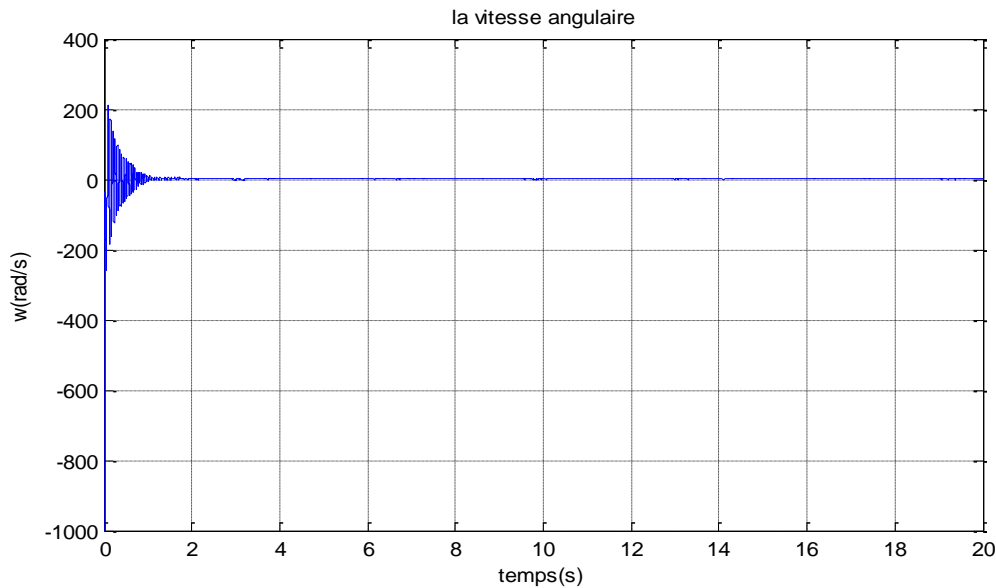


Figure (3.32) : la courbe de la vitesse angulaire  $w$  cas de logique floue

### Interprétation :

La figure (3.31) présente la courbe de la vitesse linéaire. Au début, à l'instant  $t=0$ , la vitesse est diminuée progressivement. Ensuite, elle oscille entre des valeurs régulièrement.

D'autre part, la figure (3.32) représente la vitesse angulaire. Au départ, à  $t=0$ , la vitesse elle est diminué dans l'intervalle  $t=0.1$  et  $t=0.8$ , puis elle oscille décroissante dans  $t=0.8$  et  $t=2.2$ s. À partir de ce point, la vitesse angulaire varie entre 1 rad/s et 0.2 rad/s.

La figure (3.31) décrit la variation de la vitesse linéaire, avec une diminution progressive suivie

d'oscillations autour d'une plage de valeurs. La figure (3.32), quant à elle, illustre l'évolution de la vitesse angulaire, avec des variations initiales, des oscillations décroissantes et finalement une plage de valeurs oscillant entre 1 rad/s et 0.2 rad/s.

### **3.19) Analyse comparative :**

- Les deux méthodes montrent une diminution initiale de l'erreur, bien que les valeurs initiales et les taux de décroissance puissent varier.
- Les oscillations sont présentes dans les deux méthodes, mais les valeurs et les plages d'oscillation peuvent différer.
- La logique floue semble avoir des oscillations plus complexes avec des variations de magnitude supplémentaires (0.001 et -0.001).
- Les résultats finaux des deux méthodes semblent converger vers des valeurs très proches de zéro pour les erreurs.
- En ce qui concerne les vitesses linéaire et angulaire, les comportements sont également différents entre les deux méthodes, avec des variations distinctes dans les valeurs et les plages d'oscillation.

### **3.20) Conclusion :**

Ce chapitre nous a permis de comprendre deux approches de commande différentes, à savoir la commande PD et la commande par logique floue. Chacune de ces approches présente ses avantages et ses limites, et leur choix dépend des caractéristiques spécifiques du système à contrôler. La commande PD offre une régulation précise et rapide, tandis que la commande par logique floue est adaptée aux situations où les paramètres sont vagues ou incertains. La simulation des deux approches a démontré leur efficacité respective dans la commande d'un robot mobile.

## **Conclusion générale :**

Ce mémoire offre une vue d'ensemble des différents aspects de la robotique mobile, couvrant des sujets tels que la définition et l'histoire de la robotique, les caractéristiques et la classification des robots mobiles, ainsi que la modélisation, la commande et la simulation des robots mobiles.

Dans le chapitre 01, nous avons exploré les fondements de la robotique mobile, mettant en évidence son importance croissante dans notre société. Nous avons examiné les caractéristiques clés des robots mobiles et leur classification en fonction de leurs capacités et de leur configuration à roues. De plus, nous avons également abordé les différents types de robots mobiles, tels que les robots à deux roues, les robots tricycles et les robots de type voiture. Enfin, nous avons souligné les domaines d'application des robots mobiles et leurs nombreux avantages.

Le chapitre 02 s'est concentré sur la modélisation des robots mobiles de type tricycle, en discutant de la position du robot, du modèle du robot lui-même et de la notion de non-holonomie qui influence ses mouvements. Nous avons également examiné différents modèles de roues, y compris les roues standard fixes, les roues directrices et les roues non directrices. Enfin, nous avons abordé la modélisation cinématique et dynamique d'un robot mobile unicycle.

Le chapitre 03 a exploré la commande et la simulation des robots mobiles, en se concentrant sur les approches de commande PD (Proportionnelle -Dérivée) et par logique floue. Nous avons examiné les composants du contrôleur PID, les régulateurs PID, ainsi que les méthodes de réglage des coefficients. Ensuite, nous avons plongé dans les concepts de commande floue, y compris les ensembles flous, les opérations sur ces ensembles, les modèles flous et la structure générale des systèmes flous, avec la simulation de ces contrôleurs dans logiciel MATLAB/SIMULINK. Et fait une étude comparative dans les résultats obtenue. Et nous avons observé que la logique floue produit de meilleurs résultats par rapport à la méthode classique, selon nos constatations.

En conclusion, ce travail a fourni une vision de la robotique mobile et de ses différents aspects, allant des concepts fondamentaux à la modélisation, la commande et la simulation.

## Bibliographie :

- [1] - Rubio, Francisco, Francisco Valero, and Carlos Llopis-Albert. "A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications." *International Journal of Advanced Robotic Systems* 16.2 (2019): 1729881419839596.
- [2]- Wail ikenache, ‘‘Autonomous Mobile Robot’’, Université de Biskra, 07/07/ 2019, mémoire de master .
- [3]- Lena Sophie Franke, ‘‘une brève histoire de la robotique – robots modernes’’, Une brève histoire de la robotique - Robots modernes - MoreThanDigital,15 janvier 2021.
- [4]- Ravi raj et Andrzej kos,’’ A Comprehensive Study of Mobile Robot: History, Developments, Applications, and Future Research Perspectives’’, Faculty of Computer Science, Electronics and Telecommunications, AGH University of Science and Technology, Poland, 08/07/2022
- [5] - Siegwart, Roland, Illah R. Nourbakhsh, and Davide Scaramuzza. "Autonomous mobile robots." *A Bradford Book* 15 (2011).
- [6] - Merbah amina et berkane yacine,’’commande des mouvements d’un robot mobile par logique floue’’, Université SAAD Dahleb blida, 2016/2017 , mémoire de master.
- [7]- BELKHIRAT Ayoub, Amira HADJIDJ, Redha KARA. ‘‘Localisation et guidage GPS d’un robot mobile dans une serre agricole’’, université Fares Yahia Médéa (2020). Mémoire de master
- [8] - ‘Connexion des alimentations pour robot mobile’ extrait du pobot <http://www.pobot.org>  
Date de mise en ligne : jeudi 24 mai 2012
- [9] - Boufera, Fatma. "Contribution Des Outils de l’Intelligence Artificielle dans la robotique Mobile." *PhDthesis, Université d’Oran Ahmed ben bella* (2014).
- [10] - Ananiev et anani et vladimirov,’’Lightweight reconfigurable robot arm for mobile robots’’,Bulgarian academie of sciences, 11/10/2001

- [11] - Achour Islam. "Coopération des robots mobiles autonomes.", université Larbi Ben M'hidi Oum El-Bouaghi ,13/07/2019 , mémoire de master.
- [12] - Morette Nicolas. "Contribution à la Navigation de robots mobiles: approche par modèle direct et commande prédictive". Université d'Orléans, 18/09/2009. Thèse de doctorat.
- [13] – Zidani Ghania. "Commande Robuste d'un Robot Mobile à Roues". Université Mustapha Ben Boulaid Batna 2, Département d'électronique, 2017. Thèse de doctorat.
- [14] - AMIRI Ahmed Faris, ABDOURAHMAN Mahamat Djerou. "Robot mobile autonome." Université 8 Mai 1945 guelma,(2020). Mémoire de master.
- [15] - ABAIDI Hakim. "RÉALISATION D'UN ROBOT MOBILE AVEC ÉVITEMENT D'OBSTACLE ET TRAJECTOIRE PROGRAMMÉ". Université Mohamed Khider Biskra, 06 Juin 2012, mémoire de master.
- [16] – C Collectif "Éthique de la recherche en robotique", commission de réflexion sur l'Éthique de la Recherche en sciences et technologies du Numérique d'Allistene , 2014. Rapport n° 1 de la CERNA.
- [17] - Redjradj djillali et kacimi fares, " suivi de trajectoires d'un robot mobile par la logique floue", université abderahmane mira de Bejaia,2013/2014, mémoire de master.
- [18] - Mobile surveillance robot - S5 series - SMP Robotics Systems Corp. - autonomous / exterior / with acoustic device (directindustry.com)
- [19] - Krut, Sébastien, Cédric Baradat, et François Pierrot. "Conception de robots à pattes dans un objectif d'applications industrielles." , 20ème Congrès Français de Mécanique. Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie, 2011. Article.
- [20] - Jennifer mertens," le chien robot de boston dynamics", La firme Boston Dynamics va proposer quelques modèles de son chien-robot à la vente (20minutes.fr), 26/09/2019.
- [21] - Olivier lascar , "le robot atlas de boston dynamics fait du parkour qu'en pense un roboticien", [https://www.sciencesetavenir.fr/Le\\_robot\\_Atlas\\_de\\_Boston\\_Dynamics\\_fait\\_du\\_parkour](https://www.sciencesetavenir.fr/Le_robot_Atlas_de_Boston_Dynamics_fait_du_parkour) - Sciences et Avenir , 20/08/2021. Site web.
- [22] – Fabio Morbidi. "perception avancée et robotique mobile", cours université de picardie, 2017/2018.

- [23] - Jessica palakovich , ‘‘drone technology soars ’’ , Drone technology soars – FHS Press (fhs-press.com), 30/09/2016
- [24] - OULED SSSAID Manel et Hadjer RECIQUI. ‘‘Conception et réalisation d'un robot suiveur de ligne’’. université Ghardaia, 2021.these de doctorat.
- [25] - Le Dauphiné Libéré , ‘‘un robot sous-marin pour protéger le récif ’’, <https://www.ledauphine.com/france-monde>, 31/08/2018, site web.
- [26] - BOUR Djilali, CHERIEF Makhoulf. "Commande d'un robot mobile Khepera IV.",université djillali bounaama khemis meliana (2017). mémoire de master.
- [27] – Brian Dunbar , ‘‘ Spirit and Opportunity’’, [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/mer/](https://www.nasa.gov/mission_pages/mer/), 12/10/2018, site web.
- [28] - Stéphane Lens. "Locomotion d'un robot mobile." , université de liège,(2008). Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade d'Ingénieur Civil Informaticien.
- [29] - Dan mihai, ‘‘Telepresence Robots Reviewed-part2’’, <https://www.smashingrobotics.com/> , 29/08/2012,site web.
- [30] - BENMAKHOULF, Abdeslam. ‘‘Contrôleur flou pour la navigation d'un robot mobile d'intérieur’’. 2006. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [31] - Sabrina heerklotz, ‘‘robots/innok-heros’’, Robots/Innok-Heros - ROS Wiki, 13/07/2017
- [32] - Bayle, Bernard. "Robotique mobile." Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg Université Louis Pasteur 2007 (2008).cours universitaire.
- [33] – ABAIDI, H. RÉALISATION D'UN ROBOT MOBILE AVEC ÉVITEMENT D'OBSTACLE ET TRAJECTOIRE PROGRAMMÉ (Master's thesis),2012
- [34] - Mazioua toufik et Zegrou abdelhakim, ‘‘ Etude et réalisation d'un robot a base mobile de type unicycle’’, université abderahmane mira de Bejaia,2019/2020, mémoire de master.
- [35] – ‘‘ robots mobiles autonomes (RMA) : comment ils fonctionnent et comment ils peuvent être intègres dans l'entrepôt ’’, <https://www.modula.eu/fr>, 18/01/2022. Site web.
- [36] – Kévin , ‘‘ quels sont les avantages à utiliser un robot IA pour votre entreprise’’, Quels sont les avantages à utiliser un Robot IA pour votre entreprise ? (indicerh.net), 16/05/2023.
- [37] - JALEL, Sawssen. ‘‘Optimisation de la navigation robotique’’. Université de Toulouse 2016. Thèse de doctorat.

- [38] - Sanchez-Ibanez, Jose Ricardo, Carlos J. Perez-del-Pulgar, and Alfonso García-Cerezo. "Path planning for autonomous mobile robots: A review." *Sensors* 21.23 (2021): 7898.
- [39] - GAM Marwa. "Optimisation de la surveillance des sites industriels à risque par des robots mobiles". 2022. Thèse de doctorat. Normandie.
- [40] - Larkin, Eugene V., Maxim A. Antonov, and Alexander N. Privalov. "The tricycle mobile robot movement simulation." *MATEC Web of Conferences*. Vol. 220. EDP Sciences, 2018.
- [41] - Dayal R. Parhl et B.B.V.L.Deepak , "kinematic model of three wheeled mobile robot",department of mechanical engineering, National institute of technology-Rourkela,india,11/07/2011, article.
- [42] - Fierro, Rafael, and Frank L. Lewis. "Control of a nonholonomic mobile robot using neural networks." *IEEE transactions on neural networks* 9.4 (1998): 589-600.
- [43] - Mohamed amine Yakoubi," Modélisation et simulation d'un robot aspirateur domestique dans un environnement dynamique",université Badji Mokhtar Annaba, 2017, thèse de doctorat.
- [44] - Mohssen Mabrouk Abdulljabbar," Conception d'un contrôleur basé sur les réseaux de neurones pour le suivi de trajectoire d'un robot mobile", Université ABBES LAGHROUR Khenchela, 2021,mémoire de master.
- [45] - Belobo Mevo, Benoit. *Contribution à la commande adaptative et robuste d'un robot mobile de type unicycle avec modèle non-linéaire*. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2019. Thèse de doctorat.
- [46] - Himour yacine," cours commande intelligente", Université Djillali Bounaama Khemis Meliana. Cours universitaire.
- [47] - Akka Khaled. "Contribution à l'optimisation de trajectoires des robots mobiles". université Sétif . 2019. Thèse de doctorat.

## Annexes

### Fuzzification :

#### Pour le premier bloc de floue

#### Pour l'entrée ex :

##### "Négative" :

- Pour les valeurs inférieures à -40, la valeur d'appartenance est de 1.
- Pour les valeurs entre -40 et 0, la valeur d'appartenance diminue linéairement de 1 à 0.
- Pour les valeurs supérieures à 0, la valeur d'appartenance est de 0.

##### "Zéro" :

- Pour les valeurs entre -40 et 0, la valeur d'appartenance est augmentée linéairement de 0 à 1.
- Pour les valeurs entre 0 et 40, la valeur d'appartenance est diminuée linéairement de 1 à 0.

##### "Positive" :

- Pour les valeurs inférieures à 0, la valeur d'appartenance est de 0.
- Pour les valeurs entre 0 et 40, la valeur d'appartenance augmente linéairement de 0 à 1.
- Pour les valeurs supérieures à 40, la valeur d'appartenance est de 1.

#### Pour l'entrée dex :

##### "Négative" :

- Pour les valeurs inférieures à -60, la valeur d'appartenance est de 1.
- Pour les valeurs entre -60 et 0, la valeur d'appartenance diminue linéairement de 1 à 0.
- Pour les valeurs supérieures à 0, la valeur d'appartenance est de 0.

"Zéro" :

- Pour les valeurs entre -60 et 0, la valeur d'appartenance est augmentée linéairement de 0 à 1.
- Pour les valeurs entre 0 et 60, la valeur d'appartenance est diminuée linéairement de 1 à 0.

"Positive" :

- Pour les valeurs inférieures à 0, la valeur d'appartenance est de 0.
- Pour les valeurs entre 0 et 60, la valeur d'appartenance augmente linéairement de 0 à 1.
- Pour les valeurs supérieures à 60, la valeur d'appartenance est de 1.

### **Pour la deuxième bloc floue**

**Pour l'entrée ey :**

"Négative" :

- Pour les valeurs inférieures à -40, la valeur d'appartenance est de 1.
- Pour les valeurs entre -40 et 0, la valeur d'appartenance diminue linéairement de 1 à 0.
- Pour les valeurs supérieures à 0, la valeur d'appartenance est de 0.

"Zéro" :

- Pour les valeurs entre -40 et 0, la valeur d'appartenance est augmentée linéairement de 0 à 1.
- Pour les valeurs entre 0 et 40, la valeur d'appartenance est diminuée linéairement de 1 à 0.

"Positive" :

- Pour les valeurs inférieures à 0, la valeur d'appartenance est de 0.
- Pour les valeurs entre 0 et 40, la valeur d'appartenance augmente linéairement de 0 à 1.
- Pour les valeurs supérieures à 40, la valeur d'appartenance est de 1.

**Pour l'entrée dey :**

"Négative" :

- Pour les valeurs inférieures à -60, la valeur d'appartenance est de 1.
- Pour les valeurs entre -60 et 0, la valeur d'appartenance diminue linéairement de 1 à 0.

- Pour les valeurs supérieures à 0, la valeur d'appartenance est de 0.

"Zéro" :

- Pour les valeurs entre -60 et 0, la valeur d'appartenance est augmentée linéairement de 0 à 1.
- Pour les valeurs entre 0 et 60, la valeur d'appartenance est diminuée linéairement de 1 à 0.

"Positive" :

- Pour les valeurs inférieures à 0, la valeur d'appartenance est de 0.
- Pour les valeurs entre 0 et 60, la valeur d'appartenance augmente linéairement de 0 à 1.
- Pour les valeurs supérieures à 60, la valeur d'appartenance est de 1.