

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Faculté de Technologie

Département ATE

Mémoire de Fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle,

Automatique et système

Thème

**Commande et poursuite de trajectoire pour un robot
mobile**

Préparé par :

M^{lle}. BENADJAOUD Leticia

M^{lle}. HAMITI Melissa

Encadré et dirigé par :

M^r. TIGHZERT Lyes

Devant le jury composé de

M^r. LEHOUCHE Hocine

M^r. HADDAR Hocine

Soutenu Le :26 /06/2023

Année universitaire: 2022/2023

Remerciement

Au rythme de nos mots, nous souhaitons exprimer, Notre gratitude sincère envers vous, cher Mr TIGHZERT Lyes. Votre soutien précieux a été une source d'inspiration, Guidant nos pas avec patience et éclairant nos ambitions.

À vous, membres du jury, Mr LEHOUCHE Hocine et Mr HADDAR Hocine, Votre expertise a illuminé notre travail, notre chemin. Vos commentaires éclairés, vos avis érudits, Ont contribué à notre croissance et à notre épanouissement.

À l'ensemble pédagogique de l'université de Bejaia et l'ensemble de nos enseignants qui ont contribué à notre apprentissage. Nous adressons nos plus doux remerciements, pour votre impact précieux, gravé éternellement.

Dédicace

À nos parents, étoiles qui guident notre chemin, Votre amour inconditionnel est notre soutien.

Vos encouragements et votre bienveillance, Sont les piliers de notre persévérance.

À nos frères, complices de chaque aventure, Vos sourires et vos rires, source de pure nature.

Vous êtes nos épaules solides, nos alliés, Dans vos présences, nous trouvons la paix.

À nos proches, amis, et âmes chères, Vous êtes les trésors qui font notre atmosphère. Votre

soutien bienveillant, vos mots sincères, Illuminent nos vies, créant des univers.

À tous ceux qui sont près de nos cœurs, Vous êtes les liens, les instants de bonheur. Que notre

gratitude résonne en harmonie, Pour votre présence, votre amour infini.

À vous tous, nous dédions ces mots sincères, Gratitude et amour, nos voix se sont révélées,

Que notre amitié et notre lien perdurent.

Table des matières

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

Chapitre I: Généralité sur les robots mobiles

I.1 Introduction	2
I.2 Historique	2
I.2.1 Dates marquantes de la robotique.....	2
I.2.2 premier robot mobile	3
I.3 La robotique	3
I.4 La robotique mobile	3
I.4.1 Définition	4
I.4.2 Classification des robots mobiles	4
I.4.2.1 Les robots terrestres (ou domestiques).....	4
I.4.2.2 Les robots aériens.....	5
I.4.2.3 Les robots sous-marins autonomes.....	5
I.4.2.4 Les robots polaire	6
I.4.3 Robot à roues	7
I.4.3.1 Robot unicycle.....	7
I.4.3.2 Robots tricycle.....	7
I.4.2.3 Robots voiture.....	8
I.5 Conclusion	9

Chapitre II: Modélisation du robot mobile différentielle

II.1 Introduction	10
II.2 Mise en place des repères	10
II.2.1 La correspondance entre les deux systèmes de coordonnées	11
II.3 Contraintes cinématiques du robot mobile à entraînement différentiel	12
II.3.1 Modèle cinématique	14
II.4 Modèle dynamiques	16
II.4.1 Modélisation dynamique du robot mobile	16
II.5 Equations d'Euler-Lagrange pour un robot mobile à roues	16
II.6 Modélisation des actionneurs	23
II.7 Modélisation, commande et simulation	24

II.7.1 Modélisation	24
II.7.1.1 Modélisation cinématique	26
II.7.1.1 Modélisation dynamique	26
II.7.1.1 Modélisation des actionneurs	27
II.7.2 Commande	28
II.7.2.1 Commande du mouvement.....	28
II.7.2.2 Commande par modèle cinématique inverse.....	29
II.7.2.3 Commande des courants des moteurs en utilisant un PID.....	29
II.7.3 Poursuite de trajectoire	31
II.7.3.1 Génération d'une trajectoire.....	31
II.7.3.2 Génération d'une trajectoire.....	32
II.8 Conclusion	35

Chapitre III: Planification de trajectoires guidées par champs potentiels

III.1 Introduction	36
III.2 Champ de potentiel en robotique	36
III.2.1 Définition	36
III.2.2 Historique	36
III.2.3 Principe de la méthode	37
III.2.4 Avantage de la méthode du champ de potentiel	37
III.2.5 Inconvénient de la méthode du champ de potentiel.....	38
III.2.6 Pseudo code de l'algorithme du champ de potentiel	38
III.2.7 Résultats et discussion.....	39
II.2.7.1 Analyse du premier scénario.....	39
II.2.7.2 Analyse du deuxième scénario.....	41
II.2.7.3 Analyse du troisième scénario.....	42
II.2.7.4 Analyse du quatrième scénario.....	43
II.2.7.5 Analyse du cinquième scénario.....	45
III.3 planification de trajectoire et commande du robot	47
III.3.1 Résultats de simulation et discussions	49
III.4 Conclusion	56
Conclusion générale	58
Bibliographie	59
Annexes	60

Liste des tableaux

CHAPITRE II : Modélisation du robot mobile différentielle

Tableau II. 1 Paramètre du robot différentielle.....	11
--	----

CHAPITRE III : Planification de trajectoire guidée par le champ de potentiel

Tableau III. 1 Paramètre du premier scénario.....	39
Tableau III. 2 Paramètre du deuxième scénario	41
Tableau III. 3 Paramètre du troisième scénario.....	42
Tableau III. 4 Paramètre du quatrième scénario	34
Tableau III. 5 Paramètre du cinquième scénario	45
Tableau III. 6 Paramètre des simulations.....	48

Liste des Figures

CHAPITRE I : Généralité sur les robots mobiles

Figure I. 1 Classification des robots	4
Figure I. 2 Robot terrestre	5
Figure I. 3 Robots aériens	5
Figure I. 4 Robot sous-marins	6
Figure I. 5 Robot polaire.....	6
Figure I. 6 Robot de type unicycle	7
Figure I. 7 Robot de type tricycle	7
Figure I. 8 Robot de type voiture	8
Figure I. 9 Robot de type omnidirectionnel	8

CHAPITRE II : Modélisation du robot mobile différentielle

Figure II. 1 Robot mobile différentielle	11
Figure II. 2 Exemple d'une contrainte non holonome	12
Figure II. 3 Contrainte de mouvement de roulement pur	13
Figure II. 4 Schéma bloc du système	25
Figure II. 5 Schéma bloc du modèle cinématique	26
Figure II. 6 Schéma bloc du modèle dynamique	27
Figure II. 7 Schéma bloc du moteur	28
Figure II. 8 Schéma bloc du régulateur PID	30
Figure II. 9 Poursuite de trajectoire	31
Figure II. 10 Schéma de poursuite de trajectoire.....	32
Figure II. 11 Variation des vitesses linéaire et angulaire	33
Figure II. 12 Variation des vitesses des roues droite et gauche	33
Figure II. 13 Variation des courants des roues droit et gauche	34

CHAPITRE III : Planification de trajectoire guidée par le champ de potentiel

Figure III. 1 Trajectoire du premier scénario	39
Figure III. 2 Trajectoire du robot du premier scénario après ajustement	40
Figure III. 3 Trajectoire du robot du deuxième scénario	41
Figure III. 4 Trajectoire du robot du troisième scénario	42
Figure III. 5 Trajectoire du robot du quatrième scénario	43
Figure III. 6 Trajectoire du robot du quatrième scénario après ajustement.....	44

Figure III. 7 La norme du champ de potentiel pour tous les points de l'espace	45
Figure III. 8 Poursuite de trajectoire du cinquième scénario	46
Figure III. 9 Zoom sur l'approche d'obstacle du cinquième scénario	46
Figure III. 10 Le schéma complet de la commande	47
Figure III. 11 Poursuite de trajectoire	49
Figure III. 12 Courant et tension appliqué aux moteurs	50
Figure III. 13 Zoom sur l'approche de la tension de la roue droite	50
Figure III. 14 Graphes des erreurs de tension des moteurs	51
Figure III. 15 Les couples moteurs	51
Figure III. 16 Vitesses linéaire et angulaire.....	52
Figure III. 17 Vitesse angulaire des roues.....	52
Figure III. 18 Graphes des variations de x, y, theta, xd, yd et l'angle	53
Figure III. 19 Constantes de proportionnalité pour les forces attractives et répulsives	54
Figure III. 20 Graphe des forces de répulsion, attraction et résultantes	54
Figure III. 21 Erreur de poursuite entre la trajectoire désirée et la trajectoire réelle	55

Liste des symboles

RM : Robot Mobile.

R : Rayon des roues.

L : distance entre les deux roues.

v_r : vitesse de la roue droite.

v_l : vitesse de la roue gauche.

ϑ_{pr} : Vitesse du point de contact entre le châssis et la roue droite.

ϑ_{pl} : Vitesse du point de contact entre le châssis et la roue gauche.

$\dot{\phi}_r$: vitesse de rotation de la roue droite.

$\dot{\phi}_l$: vitesse de rotation de la roue gauche.

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

$V(q, \dot{q})$: Matrice de Coriolis.

$F(\dot{q})$: Matrice de frottement impliquant la viscosité et le frottement dynamique.

$G(q)$: le vecteur gravitationnel.

τ_d : Le vecteur de perturbations incluant la dynamique non-modélisée.

$B(q)$: la matrice de transformation.

τ : le vecteur couple.

$\Lambda^T(q)$: La matrice associée aux contraintes cinématiques.

λ : le vecteur des multiplicateurs de Lagrange

L : Est la fonction lagrangienne.

T : l'énergie cinétique du système.

V : l'énergie potentielle du système.

q_i : Coordonnées généralisées.

F : Le vecteur de force généralisé.

Λ : Est la matrice des contraintes.

m_c : La masse du robot mobile sans les roues motrices et les actionneurs (moteurs à courant continu).

m_w : La masse de chaque roue motrice (avec actionneur).

i_c : Le moment d'inertie du robot mobile autour de l'axe vertical passant par le centre de masse.

i_w : Le moment d'inertie de chaque roue motrice avec un moteur autour de l'axe de la roue.

i_m : Est le moment d'inertie de chaque roue motrice avec un moteur autour du diamètre de la roue.

V_a : Tension appliqué à l'induit.

i_a : Le courant circulaire dans le circuit d'induit.

L, R : Inductance et résistance d'induit respectivement.

e_a : Force électromotrice.

τ_m : Couple moteur.

K_b : Constante de force contre-électromotrice.

K_t : Constante de couple.

τ : Couple de sortie appliqué à la roue.

w_m : Vitesse angulaire du rotor.

Introduction générale

Ce mémoire, met en évidence l'étude de la planification de trajectoire et de la commande d'un robot mobile différentiel en utilisant la méthode du champ de potentiel.

La problématique abordée dans ce manuscrite est de développer un système permettant aux robots mobiles d'éviter les obstacles et de se déplacer de manière autonome. Cette problématique soulève des questions essentielles concernant la planification de trajectoire et la commande de ces robots dans des environnements dynamiques.

L'objectif de cette étude, est de présenter une solution basée sur la méthode du champ potentiel pour permettre aux robots mobiles d'éviter les obstacles. L'approche choisie consiste à utiliser un potentiel virtuel pour guider le robot vers l'objectif tout en l'éloignant des obstacles détectés.

Le problème soulevé a été résolu grâce au développement d'un système basé sur plusieurs éléments. Un modèle cinématique a été utilisée pour décrire les mouvements du système étudié, tandis qu'un modèle dynamique a été employé pour prendre en compte les forces et les interactions physiques agissant sur le système. Les actions du système sont régulées en fonction des erreurs de position ou d'orientation grâce à l'utilisation de contrôleurs PID. De plus, la méthode du champ de potentiel a été utilisée de manière dynamique, en temps réel.

Le travail est structuré en trois chapitres, le premier aborde une généralité sur la robotique mobile, en mettant en évidence son historique ainsi que ses classifications.

Le deuxième chapitre, présente la modélisation dynamique et cinématique du robot mobile, ainsi une commande automatique à été développé pour planifier la trajectoire du robot.

Le troisième chapitre a été consacré à la présentation détaillée de la méthode du champ potentiel. Des scénarios différents ont été présentés afin de mettre en évidence l'efficacité de la méthode dans l'évitement d'obstacles, la poursuite de trajectoire et l'atteinte de l'objectif.

La conclusion vient présenter une brève synthèse du travail réalisé en récapitulant les principaux fondements.

Chapitre I

Généralité sur les robots mobiles

I.1 Introduction

Le premier chapitre explore l'évolution, la définition et les différentes catégories de robots mobiles, qui sont des robots capables de se déplacer de manière autonome. Au fil des décennies, ces robots ont gagné en intelligence et en polyvalence, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives d'utilisation. Les robots mobiles sont adaptés à divers besoins, tels que l'exploration ou les tâches de service.

I.2 Historique

Ce n'est qu'au tout début du XXe siècle que les robots firent leur apparition, suite aux travaux d'ingénieurs qui voulaient tester des hypothèses émises par des biologistes et des psychologues.[1]

I.2.1 Dates marquantes de la robotique [2]

- 1947 : Premier manipulateur électrique télé opéré.
- 1948 : Grey Walter invente le premier robot mobile autonome, une tortue se dirigeant vers les sources de lumière qu'elle perçoit. Cependant, ce robot n'est pas programmable.
- 1954 : Premier robot programmable.
- 1961 : Premier robot industriel mis en place dans une usine de General Motors. Qui a fait premier robot avec contrôle en effort.
- 1963 : Utilisation de la vision pour commander un robot.
- 1972 : Nissan ouvre la première chaîne de production complètement robotisée.
- 1980-1990 : développement important de l'intelligence artificielle et de la robotique.
- 2000 : Lancement d'Asimo, Utilisation de drones en situation réelle (Irak ...)
- 2003 : Projet « Mars Exploration Rover » .
- 2006 : Le projet Aibo n'est plus rentable, sin de la production
- 2009 : Projet « Mars Science Laboratory » succédant au projet Rover

I.2.2 Premier robot mobile [3]

- 1960-1964 : ouverture des laboratoires d'intelligence artificielle au M.I.T. Stanford Research Intitute(SRI),stanford University,University of Edinburgh.
- Fin des années 60 : mise en place de « shakey » premier robot mobile intégrant perception, planification et exécution.
- 1970 : Stanford Cart , premier robot mobile à roues.
- 1977 : premier robot mobile français HILARE au LAAS (CNRS Toulouse).
- 1997 : Premier robot mobile extra planétaire sur Mars.
- 2011 : Robonaut (R2B) premier robot humanoïde envoyé dans l'espace, conçu et construit par la NASA au Johnson Space Center (JSC) à Houston (Texas), en collaboration avec General Motors (GM) et Oceaneering.

I.3 La robotique

Le mot robotique est inventé en 1942 par Isaac Asimov qui est écrivain et scientifique, pour l'utiliser dans un roman (intitulé Runaround).[3]

La robotique est une branche de la technologie spécialisée dans la conception, la construction et l'utilisation des robots. L'étendue de la robotique réside dans l'intersection de la mécanique, de l'électronique de traitement des signaux et du génie de contrôle, capable de se substituer à l'homme dans ses fonctions motrices, sensorielles et intellectuelles. [4]

I.4 La robotique mobile

Les robots sont apparus dans le domaine artistique de la science-fiction en écrivant. Le nom réel de robot est né de son utilisation par le dramaturge Karel Capek dans la pièce Rossul's Universal Robots 1920.[3]

Actuellement, les robots peuvent être classés en fonction de leurs attributs de mobilité comme indiqué sur la **Figure I.1** :

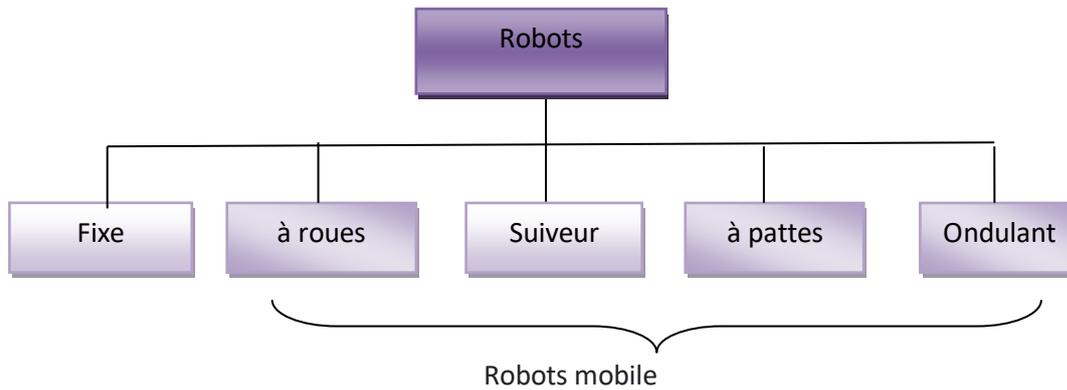


Figure I. 1 Classification des robots [5]

La robotique mobile est une discipline qui s'intéresse à la conception du matériel et logiciels, en général elle regroupe l'ensemble des robots à base mobile, mais elle désigne le plus souvent par ce terme les robots mobiles à roues, les autres robots étant généralement appelés par leur nom de catégorie correspondant à leur fonctionnalité.

I.4.1 Définition

Les robots mobiles autonomes sont des systèmes mécaniques, électroniques et informatiques capables de se déplacer de manière autonome pour atteindre un objectif donné. Ils sont équipés de capteurs, de capacités de prise de décision et d'action, leur permettant d'interagir avec leur environnement. Ces robots sont utilisés dans divers domaines, tels que l'industrie, le transport, l'exploration et la manipulation, offrant des solutions efficaces et polyvalentes. [3]

I.4.2 Classification des robots mobiles

La classification des robots mobiles se fait suivant plusieurs critères (degré d'autonomie, système de locomotion, énergie utilisée ...).

I.4.2.1 Les robots terrestres (ou domestiques)

Les robots terrestres à roues ou à chenilles sont généralement contrôlés à distance et ont une autonomie limitée. Ils peuvent être pilotés en temps réel ou programmés à l'avance. Ces robots sont conçus pour se déplacer facilement et fonctionner sur différents types de terrains. Ils permettent de se concentrer sur les tâches sans être gênés par des informations compliquées. Leur capacité à se déplacer et à s'adapter en fait des outils pratiques pour de nombreuses utilisations.[6](**Figure I.2**)



Figure I. 2 Robot terrestre

I.4.2.2 Les robots aériens

Sont des véhicules autonomes sans pilote à bord, qui réalisent des missions de manière plus sûre et efficace que les engins pilotés par des humains.[7]

Actuellement, ils sont contrôlés à distance par des opérateurs, mais les progrès technologiques et l'intelligence artificielle pourraient conduire à l'apparition de robots militaires entièrement autonomes. Cela soulève des préoccupations quant à leur capacité à prendre des décisions de manière autonome, notamment dans le contexte de l'utilisation de drones aériens de combat qui sont en cours de développement.[7](**Figure I.3**)



Figure I. 3 Robots aériens

I.4.2.3 Les robots sous-marins autonomes

Les véhicules sous-marins autonomes (VSA) sont des robots qui peuvent fonctionner tout seuls sous l'eau. Ils utilisent des capteurs spéciaux pour collecter des informations et accomplir différentes tâches. Les VSA se déplacent en utilisant des systèmes de navigation précis et peuvent s'adapter aux changements dans l'eau. Ils sont utilisés pour explorer les fonds marins et faire des recherches sur l'océan. [8](**Figure I.4**)



Figure I. 4 Robot sous-marins

I.4.2.4 Robots polaires

Les robots polaires sont spécialement conçus pour travailler dans les régions polaires, comme l'Arctique et l'Antarctique. Ils sont équipés de capteurs spéciaux et peuvent se déplacer sur des surfaces glissantes et dans des conditions météorologiques extrêmes. Ces robots sont utilisés pour collecter des données scientifiques et explorer les régions polaires, ce qui permet de mieux comprendre les changements climatiques et les écosystèmes polaires. Leur utilisation contribue à réduire les risques pour les chercheurs et à préserver ces environnements fragiles. (**Figure I.5**)



Figure I. 5 Robot polaire

I.4.3 Robot à roues

Les robots à roues sont des robots qui se déplacent en utilisant des roues comme moyen de locomotion. Ils sont souvent utilisés dans des applications qui nécessitent une mobilité rapide et efficace. Ces robots sont capables de se déplacer sur différents types de surfaces, comme le sol ou le bitume, en utilisant leurs roues pour avancer et tourner. Leur conception

simple et leur capacité à se déplacer rapidement en font des outils polyvalents pour diverses tâches et applications.

I.4.3.1 Robot unicycle

Un robot unicycle est composé de deux roues indépendantes et peut avoir des roues supplémentaires pour la stabilité. Il ne peut pas se déplacer latéralement par rapport à ses roues, ce qui le rend non-holonyme. Sa commande est simple, avec des rotations et des déplacements droits pour se déplacer d'un endroit à un autre. [9](**Figure I.6**)

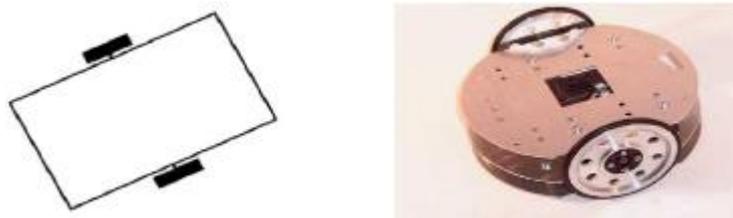


Figure I. 6 Robot de type unicycle

I.4.3.2 Robot tricycle

Un robot de type tricycle est constitué de deux roues fixes placées sur un même axe et d'une roue centrée orientable placée sur l'axe longitudinal. Le mouvement du robot est donné par la vitesse des deux roues fixes et par l'orientation de la roue orientable. Son centre de rotation est situé à l'intersection de l'axe contenant les roues fixes et de l'axe de la roue orientable. C'est un robot non-holonyme. En effet, il est impossible de le déplacer dans une direction perpendiculaire aux roues fixes. Sa commande est plus compliquée. Il est en général impossible d'effectuer des rotations simples à cause d'un rayon de braquage limité de la roue orientable. (**Figure I.7**)

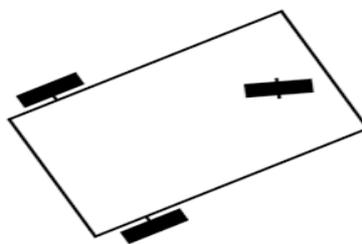


Figure I. 7 Robot de type tricycle

I.4.3.3 Robot voiture

Un robot de type voiture ressemble à un tricycle. Il est constitué de deux roues fixes et de deux roues orientables placées sur un même axe. Le robot voiture est plus stable que le tricycle car il a un point d'appui supplémentaire. Mis à part cela, les autres caractéristiques du robot voiture sont identiques à celles du tricycle. On peut considérer le tricycle comme une version simplifiée du robot voiture, où les deux roues avant sont remplacées par une seule roue centrée sur l'axe, tout en conservant le même point de rotation. [10](Figure I.8)



Figure I. 8 Robot de type voiture

I.4.3.4 Robot omnidirectionnel

Le robot omnidirectionnel est conçu pour se déplacer librement dans toutes les directions. Il est composé de trois roues décentrées et orientables, placées en forme de triangle équilatéral. Ce type de robot offre l'avantage de pouvoir se déplacer dans n'importe quelle direction. Cependant, sa conception mécanique est plus complexe. (Figure I.9)



Figure I. 9 Robot de type omnidirectionnel

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, la robotique a été abordée de manière générale, avec une définition du concept, une mise en perspective historique et une présentation des différents types de robots. Il a été constaté que la robotique occupe une place centrale dans de nombreuses applications, telles que l'automatisation de tâches, l'exploration d'environnements dangereux ou difficiles d'accès, ainsi que la facilitation de la recherche scientifique. Dans le prochain chapitre, l'attention sera portée sur la modélisation mathématique des robots différentie

Chapitre II

Modélisation du robot mobile différentielle

II.1 Introduction

La modélisation des robots mobiles permet de simuler leurs déplacements, planifier des trajectoires et les contrôler en temps réel. Ce chapitre présente les bases pour un contrôle efficace des robots mobiles autonomes à deux roues. Il explore les modèles dynamiques, cinématiques et d'actionneurs, ainsi que la mise en place d'un système de commande global avec des contrôleurs PID. L'objectif est d'assurer des mouvements précis et adaptés à l'environnement du robot.

II.2 Mise en place des repères [11]

Il est nécessaire de définir deux systèmes de coordonnées différents, pour décrire la position d'un robot mobile. Le premier système est appelé système de coordonnées inertielles il représente un repère global fixé dans le plan qui sert de référence, il est noté $\{x_l, y_l\}$ qui permet de déterminer la position absolue du robot.

Le deuxième système est le système de coordonnées du robot qui représente un repère égocentrique fixé sur le robot, il est noté $\{X_r, Y_r\}$. Ce système de coordonnées est utilisé pour déterminer la position relative du robot par rapport à son propre système de référence.

Les deux systèmes de coordonnées sont représentés dans la **Figure II.1**. Cette approche est essentielle pour le contrôle et la navigation du robot, car elle permet de déterminer sa position exacte dans l'environnement dans lequel il évolue.

Pour réaliser une navigation dans la référence inertielle l'état du robot est défini par le vecteur suivant :

$$q^l = \begin{pmatrix} X_a \\ Y_a \\ \theta \end{pmatrix} \quad (\text{II.1})$$

II.2.1 La correspondance entre les deux systèmes de coordonnées [11]

La position de n'importe quel point sur le robot peut être définie dans le repère du robot et le repère inertiel.

Les coordonnées du point donné dans les deux repères :

Coordonnées du robot : $X^r = \begin{bmatrix} x^r \\ y^r \\ \theta^r \end{bmatrix}$ coordonnées inertiel : $X^l = \begin{bmatrix} x^l \\ y^l \\ \theta^l \end{bmatrix}$

Les deux coordonnées sont liées par la transformation suivante :

$$X^l = R(\theta)X^r \tag{II.2}$$

Où $R(\theta)$ est une matrice orthogonale :

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{II.3}$$

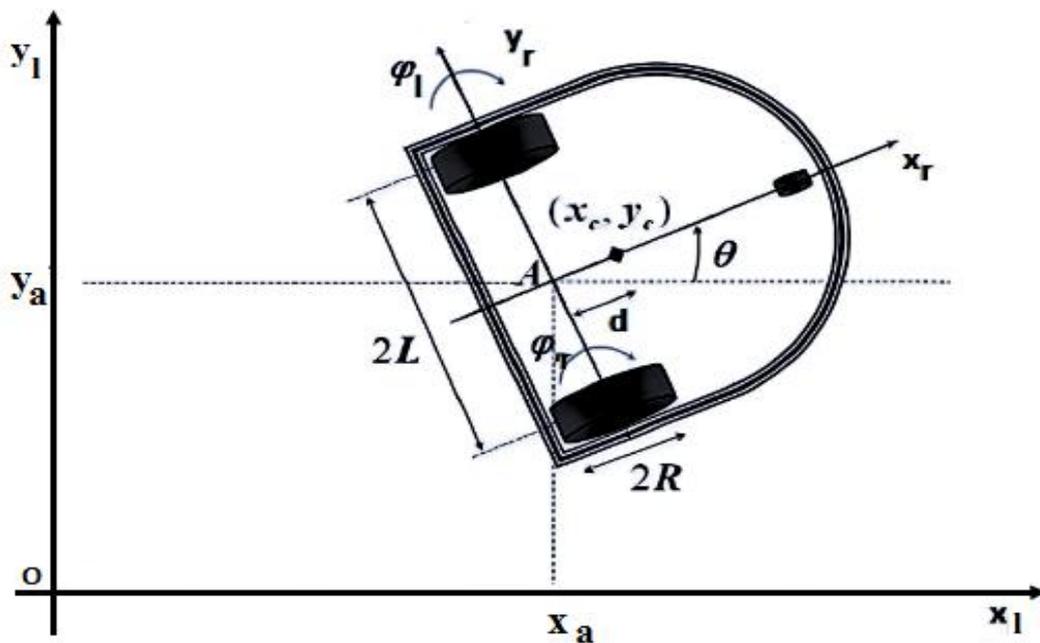


Figure II.1 Robot mobile différentielle [11]

Tableau II. 1 Paramètre du robot différentielle

Symboles	Unités	Paramètres
(x^l, y^l)	m	Position du robot dans le repère global
(y_a, x_a)	m	Position du centre du robot dans le repère global
(x^r, y^r)	m	Position du robot dans le repère fixe
(x_c, y_c)	m	Position du centre du robot dans le repère fixe
(ϕ_l, ϕ_r)	rad	L'angle de rotation des roues gauche et droite
θ	rad	Orientation du robot dans le plan
R	m	Rayon des roues droite et gauche
L	m	Distance entre les deux roues
d	m	Distance entre le centre gravitationnel et l'axe du repère fixe
A	/	Point centre du robot

II.3 Contraintes cinématiques du robot mobile à entraînement différentiel

Si le robot peut instantanément avancer et reculer mais ne peut pas se déplacer latéralement, sans que les roues glissent, on dit qu'il possède une contrainte non holonome. Par contre, s'il peut se déplacer dans toutes les directions, y compris sur le côté, alors on dit qu'il a un comportement holonome. [12]

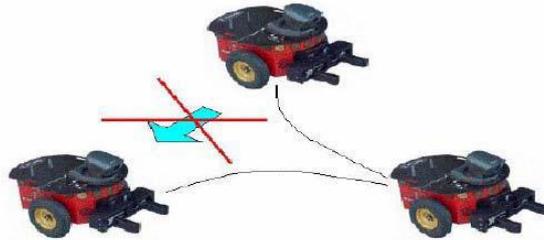


Figure II.2 Exemple d'une contrainte non holonome [12]

Le mouvement d'un robot mobile différentiel est caractérisé par deux équations de contraintes non holonomes qui sont obtenues par deux principales hypothèses :

Hypothèse 1 : sans glissement latéral : le robot se déplace dans un mouvement courbe (avant / arrière) mais pas latéralement.

Cette condition signifie que la vitesse du point central A est nulle le long de l'axe latérale

$$y_a^r = 0 \quad (\text{II.4})$$

En utilisant la matrice de rotation orthogonale $R(\theta)$ la vitesse dans le référentiel inertiel donne :

$$- \dot{x}_a \sin \theta + \dot{y}_a \cos \theta = 0 \quad (\text{II.5})$$

Hypothèse 2 : Contrainte de roulement pur : cette contrainte représente le fait que chaque roue conserve un point de contact P avec le sol comme le montre la **Figure II.3**

Il n'y a pas de glissement de la roue dans son axe longitudinal (x_r) et pas de dérapage dans son axe orthogonal (y_r).

Les vitesses des points de contact dans le châssis du robot sont liées aux vitesses des roues par :

$$\begin{cases} \vartheta_{pr} = R\dot{\phi}_r \\ \vartheta_{pl} = R\dot{\phi}_l \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$\dot{\phi}_r, \dot{\phi}_l$: vitesse des roues droite et gauche.

$\vartheta_{pr}, \vartheta_{pl}$: Vitesse du point de contact entre le châssis et les roues droite et gauche.

- Dans le repère inertiel, ces vitesses peuvent être calculées en fonction des vitesses du centre du robot A :

$$\begin{cases} \dot{x}_{pr} = \dot{x}_a + L\dot{\theta} \cos\theta \\ \dot{y}_{pr} = \dot{y}_a + L\dot{\theta} \sin\theta \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

$$\begin{cases} \dot{x}_{pl} = \dot{x}_a - L\dot{\theta} \cos\theta \\ \dot{y}_{pl} = \dot{y}_a - L\dot{\theta} \sin\theta \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

- En utilisant la matrice de rotation $R(\theta)$, les équations de contrainte de roulement sont formulées comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}_{pr} \cos\theta + \dot{y}_{pr} \sin\theta = R\dot{\phi}_r \\ \dot{x}_{pl} \cos\theta + \dot{y}_{pl} \sin\theta = R\dot{\phi}_l \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

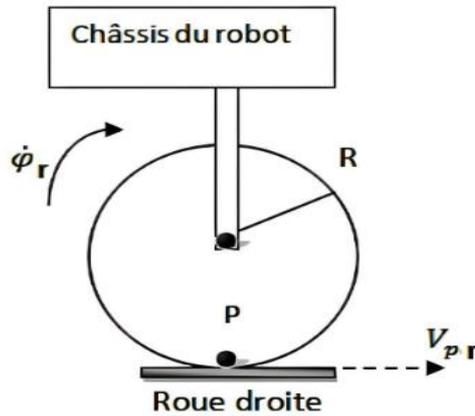


Figure II.3 Contrainte de mouvement de roulement pur

En substituant dans (x, y), les trois équations de contraintes peuvent s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$A(q)\dot{q} = 0 \quad (\text{II.10})$$

Où :

$$\Lambda(q) = \begin{pmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 & 0 \\ \cos\theta & \sin\theta & L & -R & 0 \\ \cos\theta & \sin\theta & -L & 0 & -R \end{pmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Et :

$$\dot{q} = [\dot{x}_a \quad \dot{y}_a \quad \dot{\theta} \quad \dot{\phi}_r \quad \dot{\phi}_l]$$

$$\begin{cases} V_r = R \dot{\phi}_r \\ v_l = R \dot{\phi}_l \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

La matrice de contrainte $\Lambda(q)$ sera utilisé dans la section suivante pour la modélisation dynamique.

II.3.1 Modèle cinématique

La modélisation cinématique se concentre sur l'analyse du mouvement des systèmes mécaniques sans tenir compte des forces qui peuvent affecter ce mouvement. Dans le cas du RM, l'objectif principal de la modélisation cinématique est de représenter les vitesses du robot en fonction des vitesses des roues motrices ainsi que les paramètres géométriques du robot.

II.3.1.1 Équations différentielle du modèle cinématique du robot mobile [11]

Le modèle cinématique de ce type de robot est souvent décrit à l'aide de deux équations différentielles, qui dégradent la vitesse de rotation de chaque roue en fonction de la vitesse linéaire et angulaire du robot. Ces équations sont généralement exprimées comme suite :

- La vitesse linéaire :

$$v = \frac{v_r + v_l}{2} = \frac{R}{2} (\dot{\phi}_r + \dot{\phi}_l) \quad (\text{II.13})$$

- La vitesse angulaire :

$$\omega = \frac{v_r - v_l}{2L} = \frac{R}{2L} (\dot{\phi}_r - \dot{\phi}_l) \quad (\text{II.14})$$

Avec :

R, L : Rayon et distance des roues.

$\dot{\phi}_r, \dot{\phi}_l$: vitesse de rotation des roues droite et gauche.

- Les vitesses du RM peuvent être représentées en termes de vitesses du point central A dans le repère du robot comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}_a^r = R \frac{(\dot{\phi}_r + \dot{\phi}_l)}{2} \\ \dot{y}_a^r = 0 \\ \dot{\theta} = \omega = R \frac{(\dot{\phi}_r - \dot{\phi}_l)}{2L} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a^r \\ \dot{y}_a^r \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} & \frac{R}{2} \\ 0 & 0 \\ \frac{R}{2L} & -\frac{R}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

- Les vitesses du RM peuvent également être obtenues dans le référentiel inertiel comme suit :

$$\dot{q}^I = \begin{bmatrix} \dot{x}_a^r \\ \dot{y}_a^r \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} & \frac{R}{2} \\ 0 & 0 \\ \frac{R}{2L} & -\frac{R}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

- La forme du modèle cinématique en représentant des vitesses linéaires et angulaires dans le référentiel Robot :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a^r \\ \dot{y}_a^r \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \frac{R}{2} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \theta \\ \sin \theta & \sin \theta \\ \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

II.4 Modèle dynamiques

II.4.1 Modélisation dynamique du robot mobile

La dynamique consiste à examiner le mouvement d'un système mécanique en tenant compte des forces qui l'affectent. Le modèle dynamique est essentiel pour l'analyse et la simulation du mouvement des robots mobiles, ainsi que la conception d'algorithmes de commande de mouvement.

Un système mécanique qui n'est pas holonome avec n coordonnées généralisées (q_1, q_2, \dots, q_n) est soumis à m contraintes peut être décrit par l'équation du mouvement suivante :

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_d = B(q)\tau - \Lambda^T(q)\lambda \quad [13], [14] \quad (\text{II.19})$$

II.5 Equations d'Euler-Lagrange pour un robot mobile à roues

L'équation d'Euler-Lagrange est une technique pour formuler les équations de mouvement des systèmes mécaniques. Cette méthode, qui a été introduite par Lagrange, est utilisée pour dériver systématiquement les équations du mouvement en considérant les énergies cinétique et potentielle du système donné.

Définition : Lagrangien d'un système mécanique, est un scalaire noté $L(q, \dot{q})$ sa position est repérée par le vecteur de coordonnées généralisées q . soit $T(q, \dot{q})$ l'énergie cinétique de ce système et $V(q)$ l'énergie potentielle. Son lagrangien est alors définie par : [13]

$$L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - V(q) \quad (\text{II.20})$$

Théorème : Equation d'Euler-Lagrange : Soit un système mécanique, repérée par un vecteur de coordonnées généralisées q , $L(q, \dot{q})$ son Lagrangien, et F un vecteur correspond à la sommes des forces extérieur généralisées agissant sur ce système mécanique. Lors de tous les déplacements de ce système le vecteur q , satisfait au système d'équations suivantes, l'équation de Lagrange pour un système non-holonome peut être formulée comme suit : [13]

$$\frac{d}{dt} \times \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = F - \Lambda^T(q)\lambda \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$$F = E(q) \cdot \tau \quad , \quad L = T - V \quad , \quad q_i = [x_a \quad x_a \quad \theta \quad \varphi_r \quad \varphi_l]^T$$

Ou :

λ : Le vecteur des multiplicateurs de Lagrange

L : La fonction lagrangienne.

T : L'énergie cinétique du système.

V : L'énergie potentielle du système.

q_i : Coordonnées généralisées.

F : Le vecteur de force généralisé.

$E(q)$: représente la matrice Jacobéenne de l'expression des contraintes cinématiques du système.

La première étape pour trouver le modèle dynamique en utilisant l'approche de Lagrange est de calculer les énergies cinétiques et potentielles qui régissent le mouvement du robot mobile.

Puisqu'il est supposé que les robots mobiles sont rigides et se déplacent sur un sol horizontal, ces systèmes ne sont soumis à aucun effort élastique ou force de traction.

Par conséquent, l'énergie potentielle $V(q)$ est nulle, ce qui implique que les énergies cinétiques totales du robot mobile sont la somme de l'énergie cinétique du châssis du robot sans roues et des énergies cinétiques des roues et des actionneurs

$$L = T = T_{\text{rot}} + T_{\text{tr}} \quad (\text{II.22})$$

- **L'énergie cinétique de translation du robot est :**

$$T_{\text{tr}} = \frac{1}{2} m_c v_c^2 + \frac{1}{2} m_w v_{wR}^2 + \frac{1}{2} m_w v_{wL}^2 \quad (\text{II.23})$$

- **L'énergie cinétique de rotation du robot est :**

$$T_{rot} = \frac{1}{2}I_c\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}I_m\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}I_w\dot{\phi}_R^2 + \frac{1}{2}I_m\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}I_w\dot{\phi}_L^2 \quad (\text{II.24})$$

Avec :

m_c : la masse du robot mobile sans les roues motrices et les actionneurs (moteurs à courant continu).

m_w : la masse de chaque roue motrice (avec actionneur).

v_c : La vitesse linéaire du centre de gravité

v_w : La vitesse linéaire par rapport au centre de la roue

I_c : le moment d'inertie du robot mobile autour de l'axe vertical passant par le centre de masse.

I_w : le moment d'inertie de chaque roue motrice avec un moteur autour de l'axe de la roue.

I_m : est le moment d'inertie de chaque roue motrice avec un moteur autour du diamètre de la roue.

w_m : vitesse angulaire du rotor.

- **Le lagrangien :**

Tout calcul fait le Lagrangien du système est égale :

$$L = T = \frac{1}{2}m(\dot{x}_a^2 + \dot{y}_a^2) - m_c d \dot{\theta} (\dot{x}_a \sin(\theta) - \dot{y}_a \cos(\theta)) + \frac{1}{2}I_w(\dot{\phi}_R^2 + \dot{\phi}_L^2) + \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2 \quad (\text{II.25})$$

Où les nouveaux paramètres suivants sont introduits :

Avec :

$m = m_c + 2m_w$ (la masse total du robot)

$I = I_c + m_c d^2 + 2m_w L^2 + 2I_m$ (l'inertie équivalente totale)

• Les équations du mouvement :

En utilisant l'équation (II.21) avec la fonction lagrangienne $L=T$ les équations de mouvement du robot mobile sont données par :

$$m\ddot{x}_a - m_c d\ddot{\theta} \sin \theta - m_c d\dot{\theta}^2 \cos \theta = C_1 \quad (\text{II.26})$$

$$m\ddot{y}_a + m_c d\ddot{\theta} \cos \theta - m_c d\dot{\theta}^2 \sin \theta = C_2 \quad (\text{II.27})$$

$$I\ddot{\theta} - m_c d\ddot{x}_a \sin \theta + m_c d\ddot{y}_a \cos \theta = C_3 \quad (\text{II.28})$$

$$I_w \ddot{\phi}_r = \tau_r + C_4 \quad (\text{II.29})$$

$$I_w \ddot{\phi}_L = \tau_L + C_5 \quad (\text{II.30})$$

Ou (C1, C2, C3, C4, C5), sont des coefficients liés aux contraintes cinématiques, qui peuvent s'écrire en termes de vecteur de multiplicateurs Lagrange λ et de matrice de contraintes cinématiques Λ introduits dans la modélisation cinématique. [11]

$$\Lambda^T(q) = \begin{pmatrix} C1 \\ C2 \\ C3 \\ C4 \\ C5 \end{pmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Maintenant, les équations de mouvement obtenues (II.26) ,(II.30) peuvent être représentées sous la forme générale donnée par l'équation (II.19) comme :

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} = B(q)\tau - \Lambda^T(q)\lambda \quad (\text{II.32})$$

Où :

$$M(q) = \begin{pmatrix} m & 0 & -m_c d \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & m & m_c d \cos \theta & 0 & 0 \\ -m_c d \sin \theta & m_c d \cos \theta & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_w \end{pmatrix}$$

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

$$B(q) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{ et } \Lambda^T(q)\lambda = \begin{pmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & \cos \theta \\ \cos \theta & \sin \theta & \sin \theta \\ 0 & L & -L \\ 0 & -R & 0 \\ 0 & 0 & -R \end{pmatrix}^T \times \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \end{pmatrix}$$

Avec :

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

$V(q, \dot{q})$: Matrice de Coriolis.

$B(q)$: la matrice de transformation.

$\Lambda^T(q)$: La matrice associée aux contraintes cinématiques.

Ensuite, le système décrit par l'équation (II.32) est transformé en une forme alternative qui est plus pratique à des fins de contrôle et de simulation. L'objectif principal est d'éliminer la contrainte.

Terme $\Lambda^T(q)\lambda$ apparait dans l'équation (II.32) en raison des multiplicateurs de Lagrange λ_i sont inconnus. Afin de faciliter les calculs le vecteur réduit est défini par l'équation suivante :

$$\zeta = \begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \end{bmatrix} \tag{II.33}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a^r \\ \dot{y}_a^r \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} \cos \theta & \frac{R}{2} \cos \theta \\ \frac{R}{2} \sin \theta & \frac{R}{2} \sin \theta \\ \frac{R}{2L} & -\frac{R}{2L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \end{bmatrix} \tag{II.34}$$

Ce qui donne :

$$\dot{q} = S(q)\zeta \quad (\text{II.35})$$

La matrice de transformation $S(q)$ est dans l'espace nul de la matrice de contrainte $\Lambda(q)$. Par conséquent :

$$S^T(q)\Lambda^T(q) = 0 \quad (\text{II.36})$$

L'application de l'opérateur de dérivation temporelle à l'équation (II.35), donne la relation suivante :

$$\ddot{q} = \dot{S}(q)\zeta + S(q)\dot{\zeta} \quad (\text{II.37})$$

Après avoir remplacé les équations (II.35) et (II.37) dans l'équation principale (II.32), la relation suivante est obtenue :

$$M(q)[\dot{S}(q)\zeta + S(q)\dot{\zeta}] + V(q, \dot{q})[S(q)\zeta] = B(q)\tau - \Lambda^T(q)\lambda \quad (\text{II.38})$$

En réarrangeant l'équation (II.43) et multipliant les deux côtés par $S^T(q)$:

$$S^T(q)M(q)S(q)\dot{\zeta} + S^T(q)[M(q)\dot{S}(q) + V(q, \dot{q})S(q)]\zeta = S^T(q)B(q)\tau - S^T(q)\Lambda^T(q)\lambda \quad (\text{II.39})$$

Les nouvelles matrices sont :

$$H(q) = S^T(q)M(q)S(q) \quad (\text{II.40})$$

$$N(q, \dot{q}) = S^T(q)M(q)\dot{S}(q) + S^T(q)V(q, \dot{q})S(q) \quad (\text{II.41})$$

$$G(q) = S^T(q)B(q) \quad (\text{II.42})$$

Les équations dynamiques sont réduites à la forme :

$$H(q)\dot{\zeta} + N(q, \dot{q})\zeta = G(q)\tau \quad (\text{II.43})$$

Où:

$$H(q) = \begin{bmatrix} I_w + \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 + I) & \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 - I) \\ \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 - I) & I_w + \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 + I) \end{bmatrix} \quad N(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{R^2}{2L}(m_c d \dot{\theta}) \\ -\frac{R^2}{2L}(m_c d \dot{\theta}) & 0 \end{bmatrix}$$

Un changement de variable est appliqué aux matrice $H(q)$ et $N(q, \dot{q})$:

$$H(q) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}, \quad N(q) = \begin{bmatrix} 0 & v_{12}\dot{\theta} \\ v_{21}\dot{\theta} & 0 \end{bmatrix}, \quad G(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Les matrices obtenues après le changement de variable sont remplacées dans l'équation (II.48) cela donne :

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_r \\ \ddot{\phi}_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & v_{12}\dot{\theta} \\ v_{21}\dot{\theta} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.44})$$

Après tout calcul les équations de la dynamique :

$$\begin{cases} \ddot{\phi}_r = \frac{1}{m_{11}} [\tau_1 - m_{12}\ddot{\phi}_l - v_{12}\dot{\phi}_l] \\ \ddot{\phi}_l = \frac{1}{m_{22}} [\tau_2 - m_{21}\ddot{\phi}_r - v_{12}\dot{\phi}_r] \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

II.6 Modélisation des actionneurs [11]

Dans un robot mobile, les moteurs à courant continu sont utilisés pour entraîner les roues du robot. Ces moteurs sont des servo-actionneurs, ce qui signifie qu'ils peuvent fournir un couple élevé à des vitesses faibles et sont faciles à contrôler.

Ce type de moteur utilise la tension d'induit V_a comme entrée de commande, tout en maintenant les conditions dans le circuit de champ constantes.

Dans le cas particulier d'un moteur à courant continu à aimant permanent, les équations qui régissent le circuit d'induit peuvent être exprimées comme suit :

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (\text{II.46})$$

Avec $e_a = K_b \omega_m$, $\tau_m = k_t i_a$ et $\tau = k_m N$

Avec :

$R_a L_a$: Inductance et résistance d'induit respectivement.

V_a : Tension appliqué a l'induit.

e_a : Force électromotrice.

τ_m : Couple moteur.

K_b : Constante de force contre-électromotrice.

K_t : Constante de couple.

τ : Couple de sortie appliqué a la roue.

II.7 Modélisation, commande et simulation

II.7.1 Modélisation

La **Figure II.4** représente le schéma bloc global du système, obtenue après l'implémentation des équations mathématique des modèles dynamique (II.45), cinématique (II.18) et moteurs(II.46) sur Simulink. Ce système est guidé par une commande du mouvement qui permet de donner les nouvelles variations désirées qui seront utilisées par le modèle cinématique inverse. Les PID sont utilisé pour régulariser les tensions fournis aux moteurs (de la roue droite et la roue gauche).

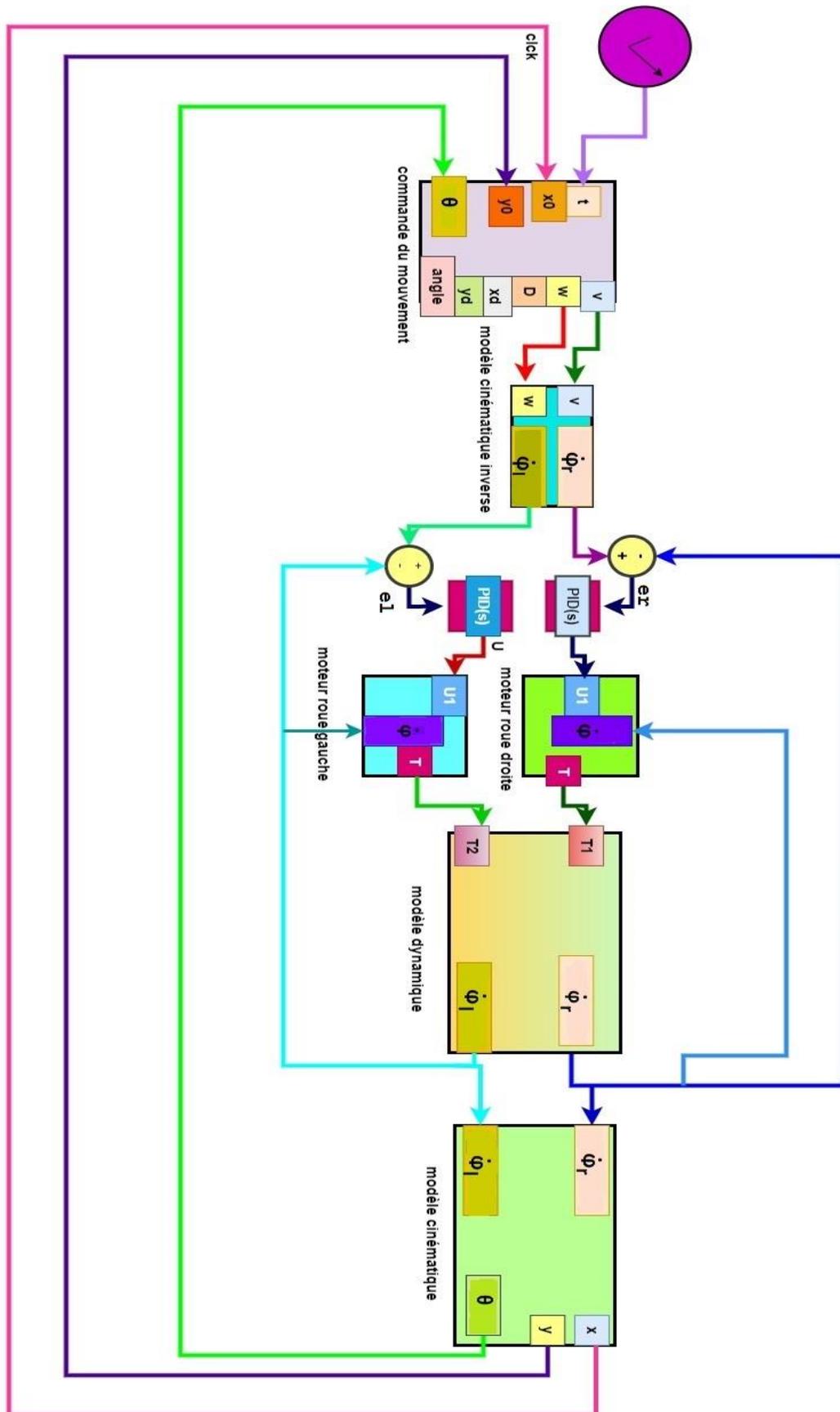


Figure II.4 Schéma bloc du système

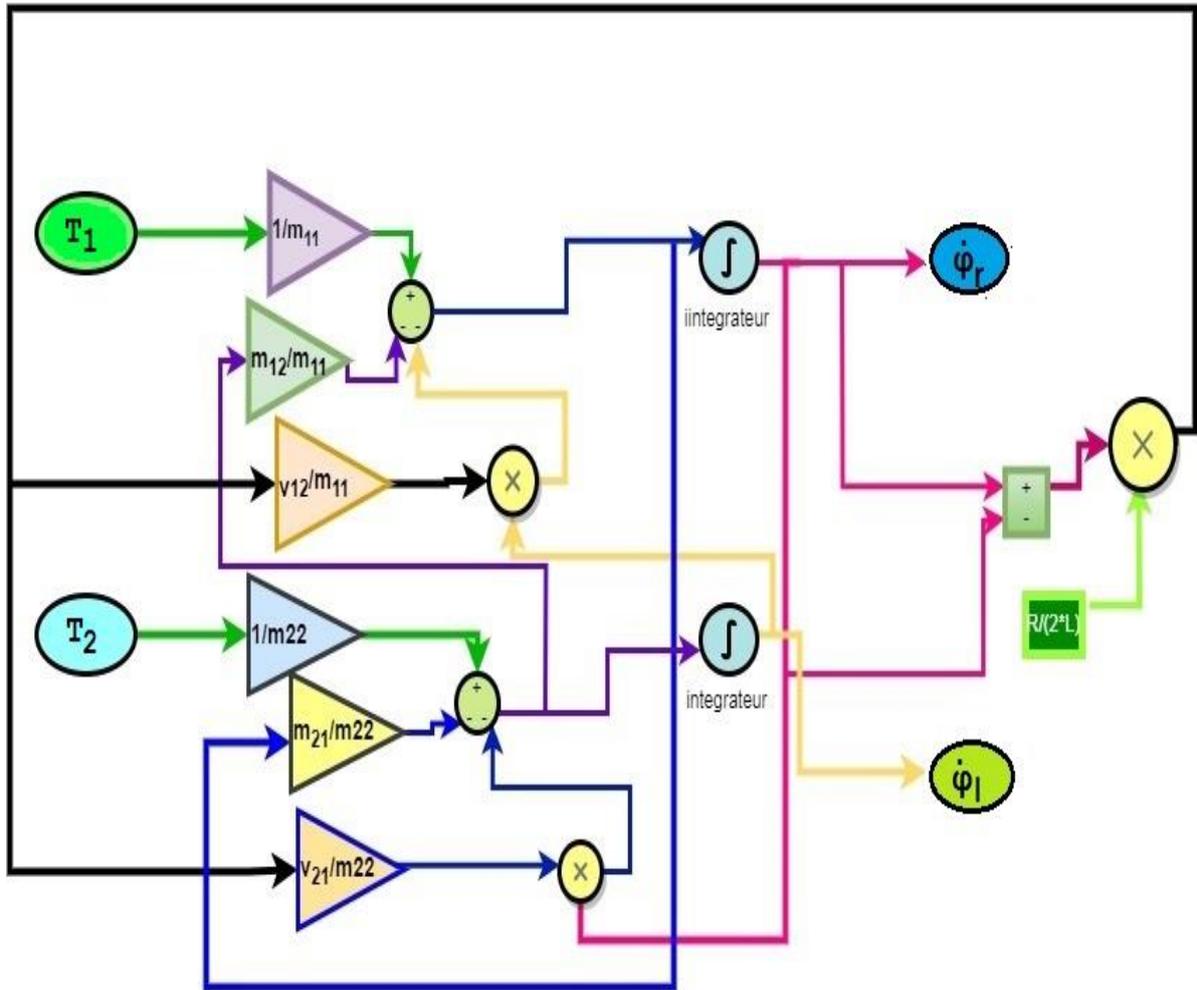


Figure II.6 Schéma bloc du modèle dynamique

Avec :

T_1, T_2 :Couples moteurs .

II.7.1.3 Modélisation des actionneurs

Suite à l'implémentation de l'équation (II.46) sur Simulink, le schéma bloc résultant est présenté dans la **Figure II.7**. Il reçoit, la tension U_1 et la vitesse angulaire $\dot{\phi}$ comme entré. Le PID ajuste le courant fournit afin de minimiser l'écart entre la consigne et la sortie T (couple moteur).

(x_d, y_d) : Position désiré du robot.

II.7.2.2 Commande par modèle cinématique inverse

Le modèle cinématique inverse correspond a la relation entre les vitesses (v, w) et les vitesses angulaires des roues $(\dot{\phi}_r, \dot{\phi}_l)$.

- Les équations utiliser dans le modèle cinématique inverse :

A partir des équations de vitesses linéaire et angulaire (II.13),(II.14) Les équations des vitesses de rotation des roues sont obtenue après tout calcul :

$$\dot{\phi}_r = \frac{2v + L\omega}{2R} \quad (\text{II.49})$$

$$\dot{\phi}_l = \frac{2v - L\omega}{2R} \quad (\text{II.50})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R} & \frac{2L}{R} \\ \frac{1}{R} & \frac{-2L}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ W \end{bmatrix} \quad (\text{II.51})$$

II.7.2.3 Commande des courants des moteur en utilisant un PID

Le régulateur PID est un dispositif de contrôle utilisé pour réguler la vitesse, la position, et la tension des moteurs électriques. Il compare la sortie réelle du moteur à la consigne souhaitée et utilise cette erreur pour ajuster le courant fourni afin de minimiser l'écart entre la consigne et la sortie réelle. [15]

Le régulateur PID utilise trois termes mathématiques pour ajuster le courant :

- **P** (proportionnelle) : Ce terme ajuste le courant en fonction de l'erreur actuelle
- **I** (intégral) : Ce terme ajuste le courant en fonction de l'accumulation passée des erreurs.
- **D** (dérivé) : Ce terme ajuste le courant en fonction de la variation actuelle de l'erreur.

- Equation du PID est donnée comme suit : [16]

$$U(t) = k_p \cdot \varepsilon(t) + k_i \int_0^t \varepsilon(t) + k_d \frac{d}{dt} \varepsilon(t) \tag{II.52}$$

Avec :

$\varepsilon(t)$: l'erreur statique.

k_p, k_i, k_d : les coefficients du PID .

Suite à l'utilisation de la transformée de la place :

$$U(S) = P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1+N \frac{1}{s}} \tag{II.53}$$

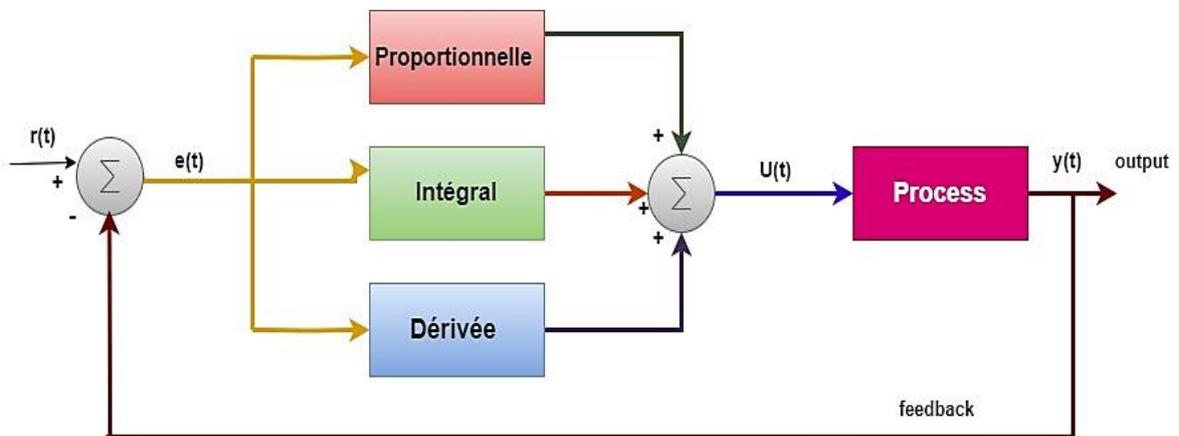


Figure II.8 Schéma bloc du régulateur PID

- Pour un fonctionnement correct des boucles de contrôle, la boucle PID doit être correctement réglée.
- Paramètres des PID utilisé dans la boucle de régulation interne voir la **Figure II.7** :

P	I	D	N
0.978	0.153	0.657	1.482

- Paramètre des PID utilisé pour les roues :

P	I	D	N
1.660	0.318	0.649	2724.369

Remarque : Les paramètres des PID ont été obtenus d'une manière empirique, cela après plusieurs essais.

II.7.3 Poursuite de trajectoire

II.7.3.1 Génération d'une trajectoire

Une trajectoire de test est utilisée afin d'assurer que les contrôleurs PID permettent au robot de poursuivre la trajectoire désirée, les équations mathématiques de la trajectoire en fonction du temps sont données par :

$$x = e^{(2 * \pi i * \frac{t}{300})} \quad (\text{II.54})$$

$$y = \sin(2 * \pi i * \frac{t}{200}) \quad (\text{II.55})$$

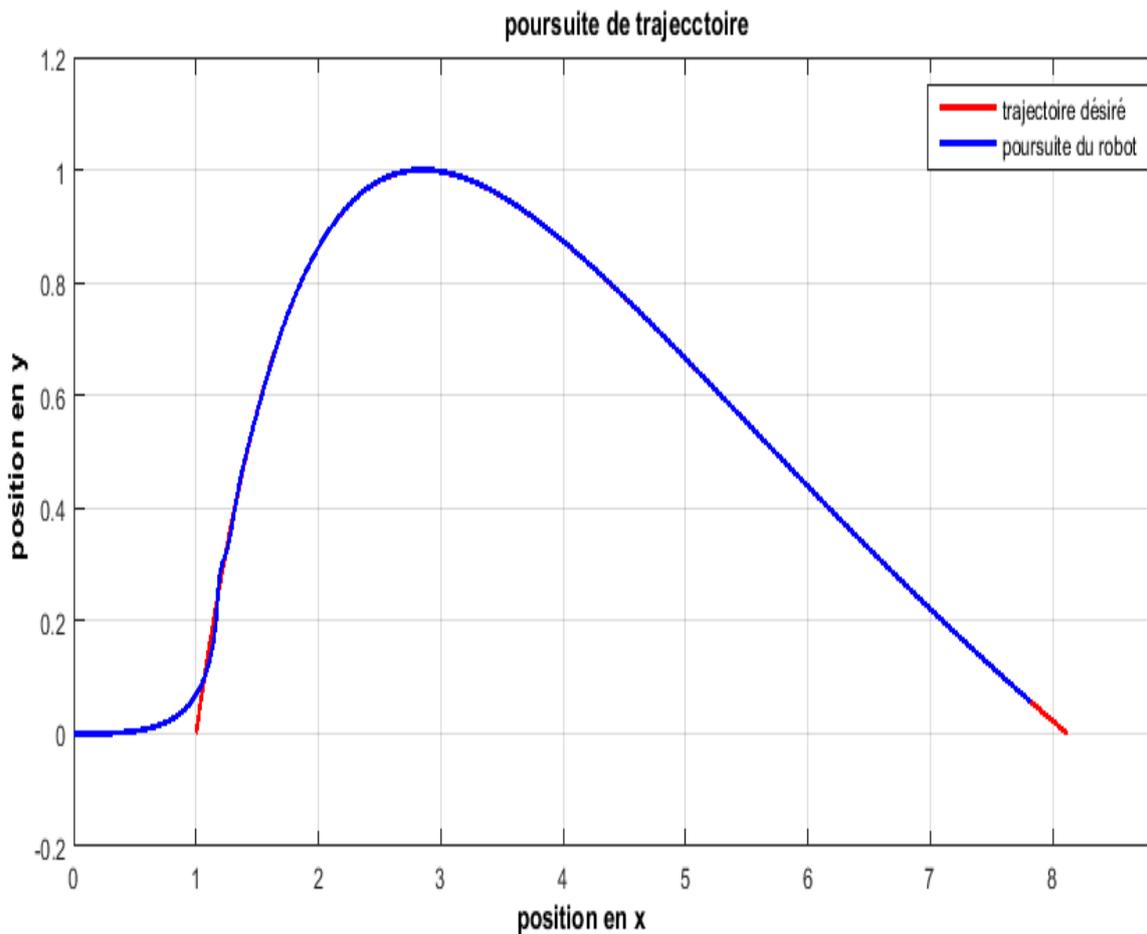


Figure II.9 Poursuite de trajectoire

- La **Figure II.9** présente la trajectoire désiré et la trajectoire obtenu, on remarque un écart initial important, principalement dû à la différence entre la valeur désirée et la valeur actuelle.

Remarque : Un tableau des paramètres du robot utilisé dans la simulation est présenté dans l'annexe A.

II.7.3.2 Analyse des résultats

Le pseudo-code utilisé dans la commande du mouvement :

commande du mouvement

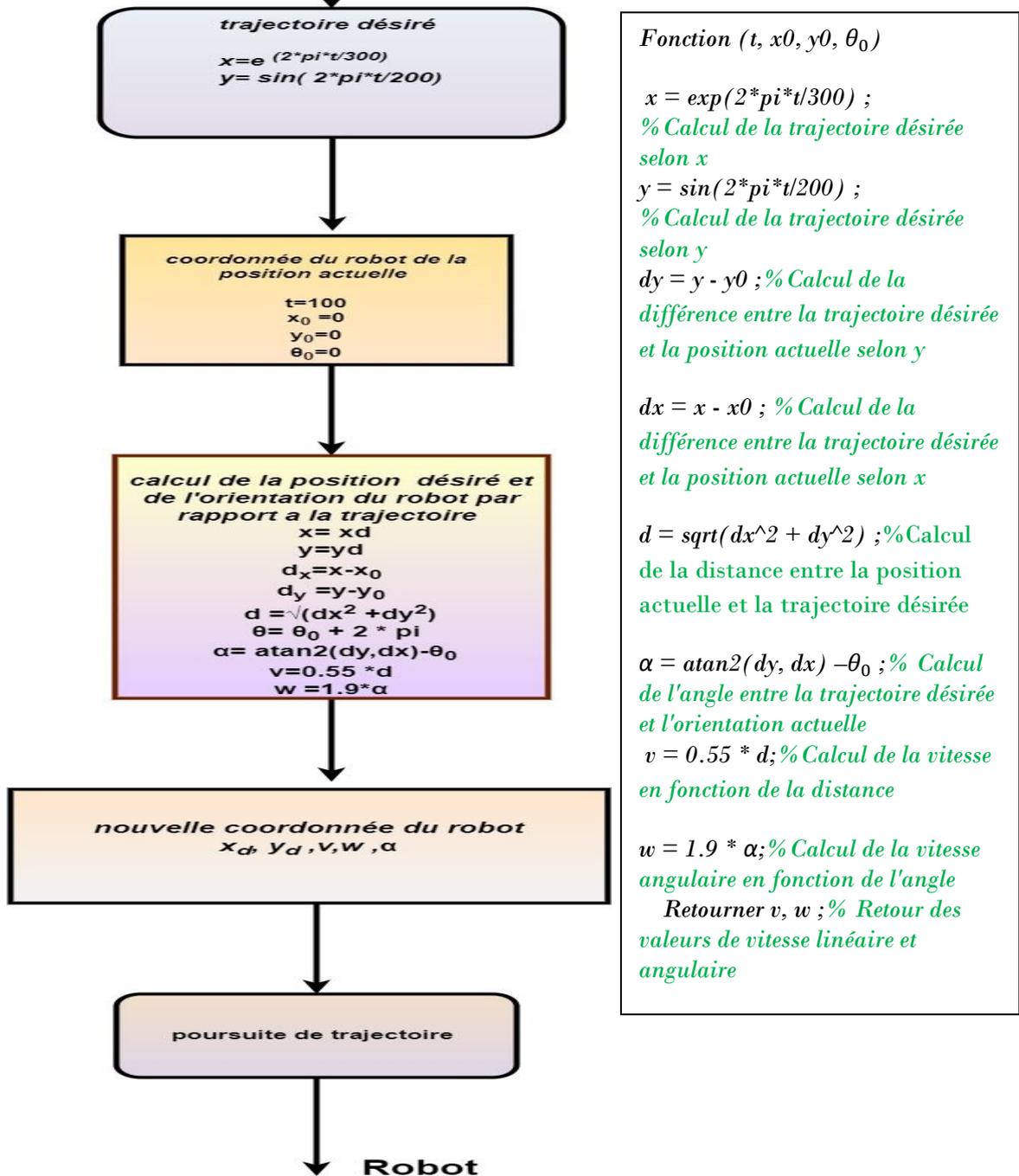
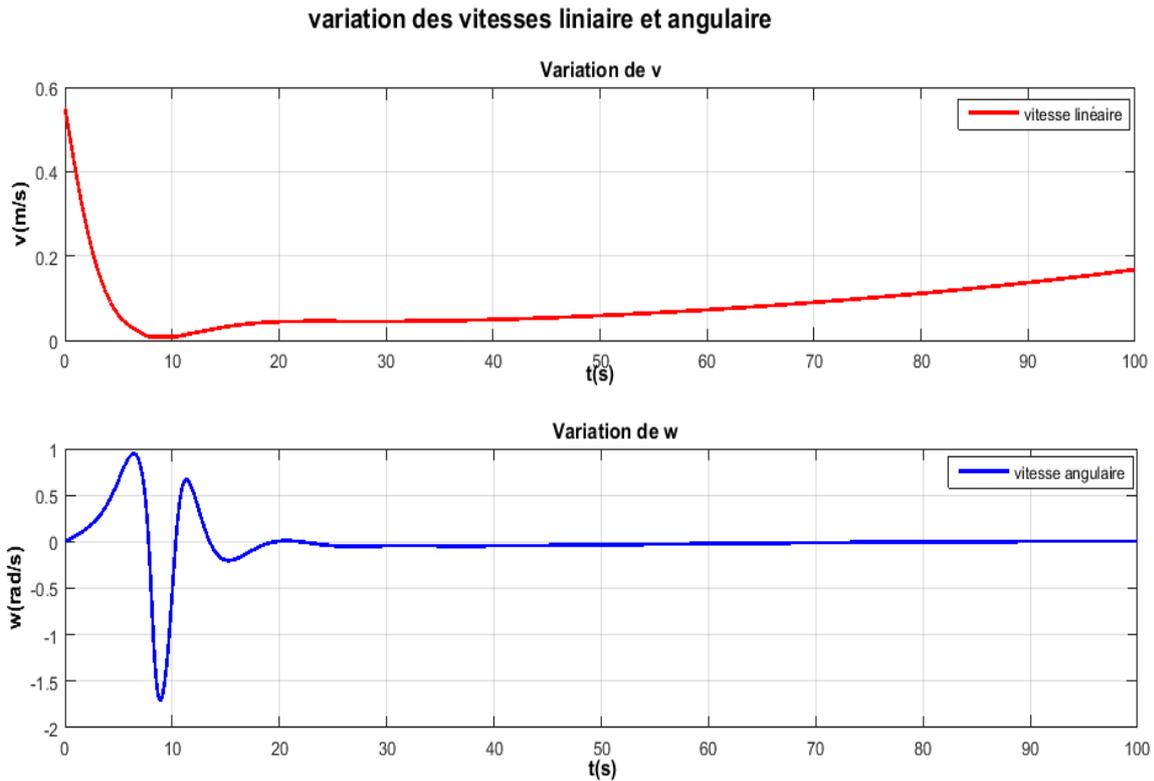
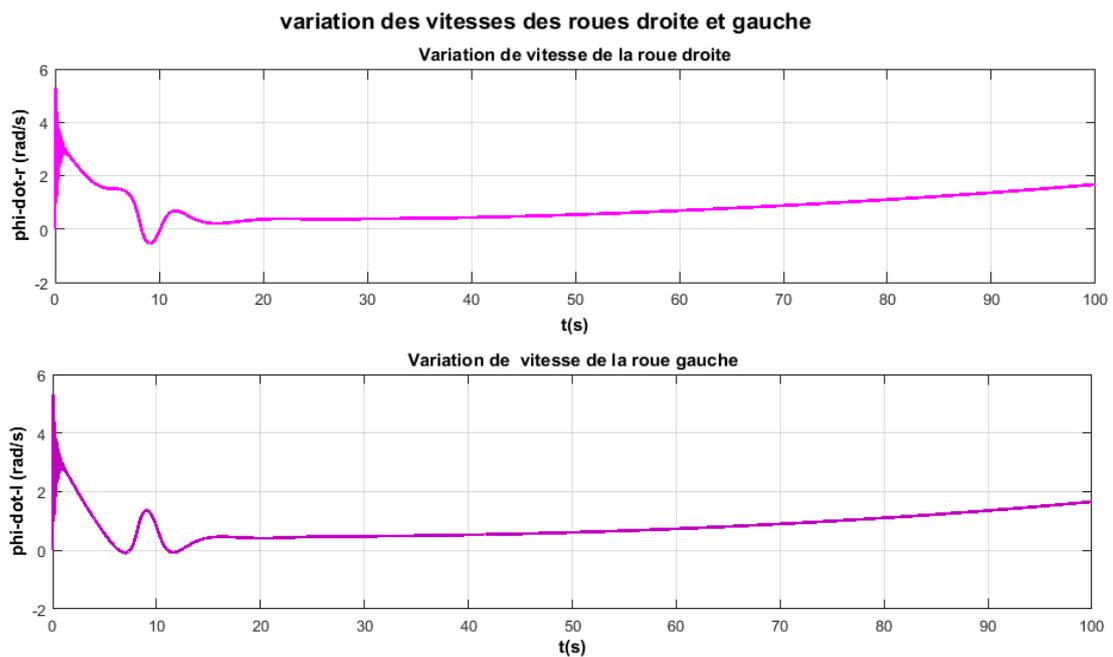


Figure II.10 Schéma de poursuite de trajectoire



- La **Figure II.11** illustre une variation irrégulière et indépendante des vitesses linéaire et angulaire, cela peut indiquer un mouvement impliquant des changements de direction et de vitesse.



- Les valeurs des vitesses des roues (droite et gauche) présentées dans la **Figure II.12**.

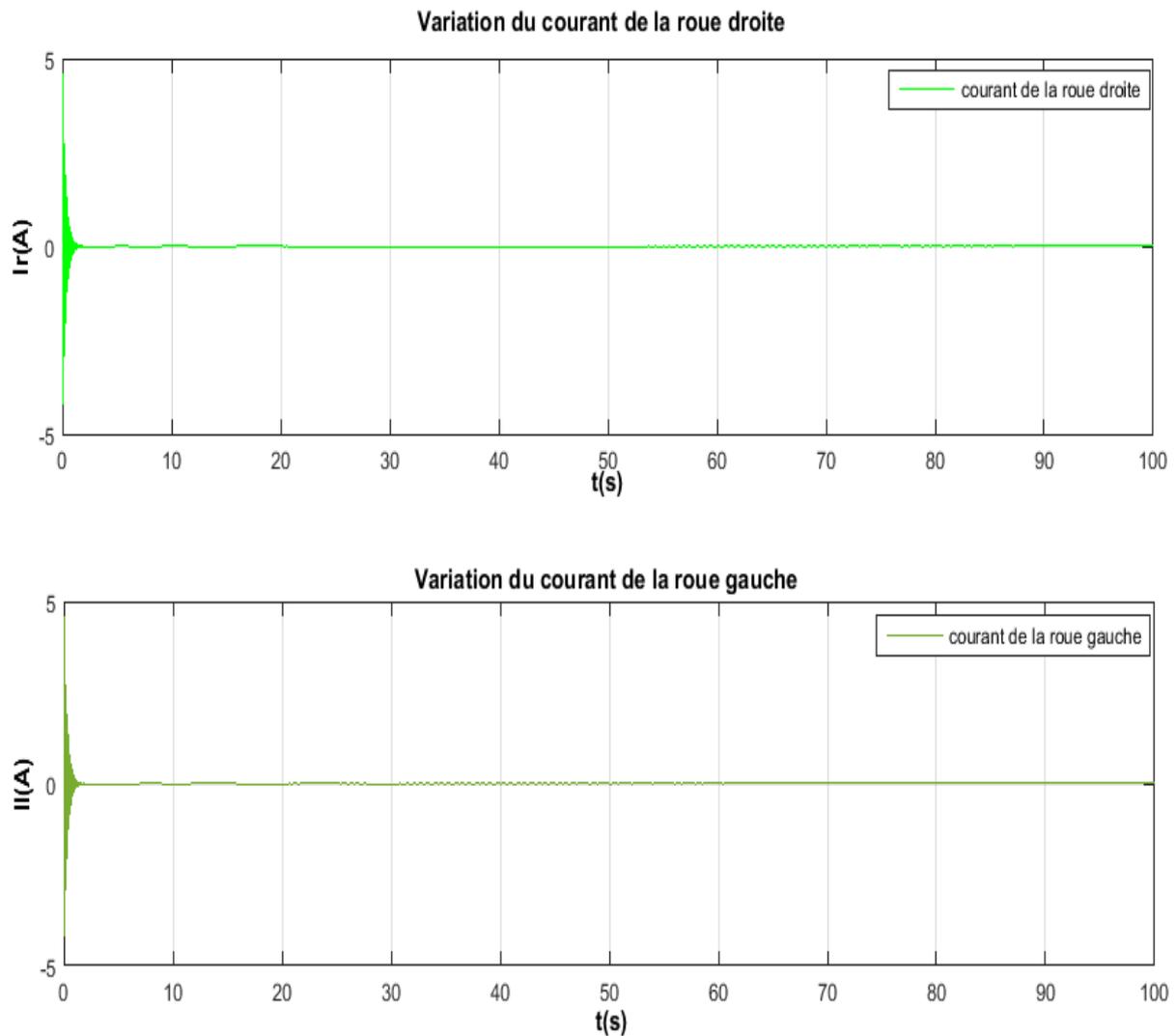


Figure II.13 Variation des courants des roues droit et gauche

- **La Figure II.13** présente, la variation du courant des roues. On remarque un courant de démarrage élevé, car lorsque les moteurs démarrent, ils nécessitent un courant initial élevé pour rétablir l'inertie et démarrer en mouvement.

Remarque : L'écart obtenu dans **la Figure II.9** est responsable des changements brusques sur les variations des vitesses (**Figure II.12**), et des courants (**Figure II.13**), au début du mouvement.

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, des modèles mathématiques ont été obtenus pour représenter le comportement cinématique, dynamique et actionneurs du robot. Des schémas blocs ont été réalisés pour chaque modèle. En utilisant une commande du mouvement et des contrôleurs PID, un test a été effectué sur le robot, où il a réussi à suivre la trajectoire désirée. Ces résultats confirment l'efficacité de l'approche de commande et des choix des paramètres PID.

Dans le chapitre suivant, ce système sera utilisé pour la planification de trajectoire guidée par le champ potentiel.

Chapitre III

Planification de trajectoires

Guidées par champs

potentiel

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons la planification de trajectoire pour un robot mobile en utilisant la méthode du champ potentiel. Cette approche de planification de trajectoire, largement utilisée dans le domaine de la robotique, permet de guider le robot vers sa destination en évitant les obstacles pour atteindre efficacement l'objectif

III.2 Champ de potentiel en robotique

III.2.1 Définition

La méthode du champ de potentiel est une approche utilisée en robotique mobile pour la planification de trajectoire. Elle a été introduite dans les années 1980 par Oussama Khatib[17]. Elle offre une solution simple et efficace pour guider les robots vers leurs objectifs tout en évitant les obstacles présents dans leur environnement

L'idée fondamentale de la méthode du champ de potentiel est de modéliser l'environnement dans lequel évolue le robot à l'aide d'un champ de potentiel virtuel.

III.2.2 Historique

Un aperçu de l'évolution de la méthode du champ de potentiel en robotique mobile :

- 1986 : Oussama Khatib présente la méthode du champ de potentiel pour l'évitement d'obstacles en temps réel pour les manipulateurs et les robots mobiles [17].
- 1991 : Koren et Borenstein ont démontré mathématiquement les problèmes d'instabilité de ces méthodes [18]
- 1991 : Rimon et Koditschek proposent une approche basée sur le champ de potentiel pour la navigation autonome d'un robot mobile [19].
- 1998 : Steven M. LaValle présente l'algorithme RRT (Rapidly-exploring Random Trees), qui combine la méthode du champ de potentiel avec des techniques d'échantillonnage probabiliste pour la planification de trajectoire [20].
- 2003 : Agirrebeitia propose une extension du principe des méthodes APF (Artificial Potential Field) pour la navigation de robots dans un espace 3D. [21]

- Depuis lors, de nombreuses autres recherches ont été menées pour améliorer la méthode du champ de potentiel, notamment en intégrant des techniques d'apprentissage automatique, des algorithmes de planification plus avancés et des stratégies de coordination multi-robots.

III.2.3 Principe de la méthode

La méthode du champ de potentiel repose sur la modélisation de l'environnement du robot comme un champ de forces virtuel. Ce champ est constitué de zones attractives et répulsives, qui exercent des forces sur le robot et influencent sa trajectoire.

- **Zones attractives :** Les zones attractives sont associées aux objectifs que le robot doit atteindre. Plus le robot se rapproche de l'objectif, plus la force d'attraction devient intense, le guidant ainsi vers sa destination. Cette force est calculée en fonction de la distance entre le robot et l'objectif, et elle diminue à mesure que le robot se rapproche de manière à éviter les oscillations excessives.
- **Zones répulsives :** Les zones répulsives sont associées aux obstacles présents dans l'environnement. Lorsque le robot s'approche d'un obstacle, la force répulsive devient plus intense, poussant le robot à s'éloigner de l'obstacle et à éviter les collisions. La force répulsive est également calculée en fonction de la distance entre le robot et l'obstacle.

III.2.4 Avantages de la méthode du champ de potentiel

La méthode du champ de potentiel présente plusieurs avantages importants :

- **Simplicité de mise en œuvre :** Cette méthode est relativement simple à mettre en œuvre, ne nécessitant pas de modèles complexes de l'environnement ou de capteurs sophistiqués. Elle repose sur des principes intuitifs de forces attractives et répulsives.
- **Capacité à gérer des environnements dynamiques :** La méthode du champ de potentiel permet de gérer des environnements dynamiques, où les obstacles peuvent se déplacer ou être ajoutés à tout moment. Les forces répulsives s'adaptent en temps réel aux changements dans l'environnement, assurant ainsi une navigation sécurisée.

III.2.5 Inconvénient de la méthode du champ potentiel

Malgré ses avantages, la méthode du champ de potentiel présente également certaines limitations :

- La possibilité de rester piégé dans des minimas locaux, des oscillations dans les passages étroits. [22]
- La négligence de la cinématique et de la dynamique réelles du robot. Ces approches sont mises en évidence par Koren et Borenstein [22].

Néanmoins, la méthode du champ de potentiel reste largement utilisée dans de nombreux domaines de la robotique mobile en raison de sa simplicité et de sa rapidité de calcul. Des améliorations et des variantes de cette méthode ont également été proposées au fil des années pour atténuer ses limitations.

III.2.6 Pseudo code de l'algorithme du champ de potentiel

```
% Initialisations des paramètres de simulation  
s = pas de déplacement  
p = position initial  
g = position de l'objectif  
katt = constante attractif  
krep = constante répulsif  
n = position d'obstacle  
Rob = initialiser le rayon d'obstacle  
% Boucle de contrôle  
Tant que le robot n'a pas atteint l'objectif  
% Calcul de la force attractif vers l'objectif  
Fatt = katt (g-p)  
% Calcul de la force répulsive des l'obstacles  
Pour chaque obstacle  
Frep = Frep + Rob(i) × krep ×  $\left(\frac{1}{d^2}\right) \times \frac{p-n}{d}$   
% Calcul de la force résultante  
Fres = Fatt + Frep  
  
% Mise à jour de la position du robot  
p = p +  $\left(\frac{s \times F_{res}}{\|F_{res}\|}\right)$   
fin tant que
```

Remarque : Dans tout ce qui suit, nous considérons que les obstacles sont sphériques et leur rayon est augmenté en rajoutant le rayon du robot. Ceci permet de considérer le robot comme un point.

III.2.7 Résultats et discussion

Dans cette partie, nous allons présenter cinq scénarios en utilisant la méthode du champ de potentiel afin de résoudre différentes problématiques où l'espace de configuration est limité à deux dimensions et les obstacles ont des rayons différents.

Remarque : la constante d'attraction (K_{att}) est choisie statique, ce qui signifie qu'il ne change pas au cours du temps cela peut entraîner une planification de trajectoire non fluide, ou l'on peut observer des trajectoires non lisses.

III.2.7.1 Premier scénario

Dans ce scénario on démontre 40 obstacles qui sont espacés. La position du robot est à $[-20,-20]$ et l'objectif est à $[80,45]$. Plusieurs obstacles sont présentés entre le robot et l'objectif, ce dernier est entouré de 4 obstacles situés sur ces côtés, le **Tableau III.1** indique les paramètres de ce cas :

Tableau III.1 Paramètre du premier scénario

Le pas du temps de simulation	0.3 m/s
Position du robot	$[-20,-20]$
Position de l'objectif	$[80,45]$
Constante attractive	3
Constante répulsive	30
Nombre d'obstacles	40

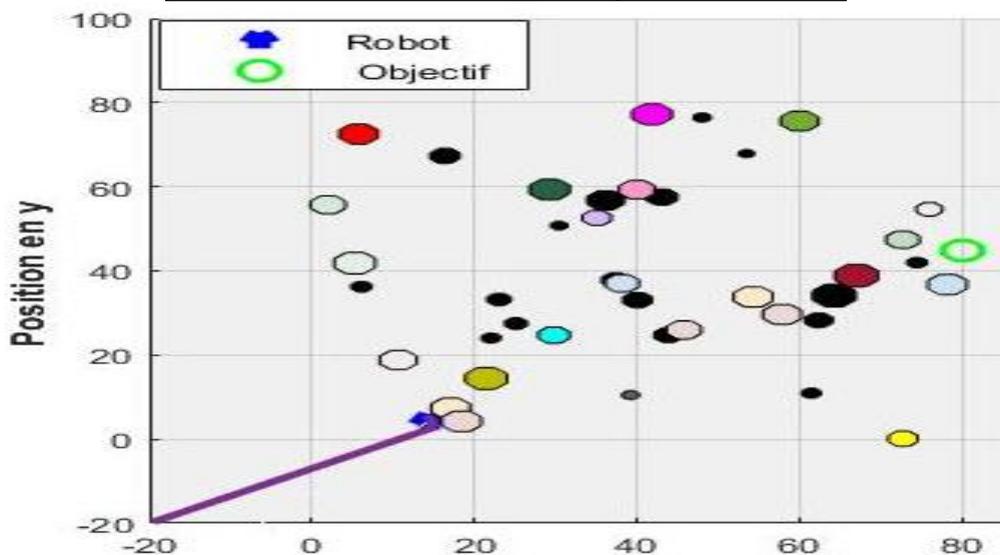


Figure III.1 Trajectoire du premier scénario

- Le robot est arrivé à une position où il est aligné avec l'objectif (Figure III.1) la force attractive tire le robot vers l'objectif, tandis que la force répulsive le pousse dans la direction opposée. Ces forces s'annulent mutuellement selon l'équation $F_{res} = f_{att} + f_{rep}$, ce qui empêche le robot de se déplacer et le maintient immobile. Ceci est un minimum local.

Pour éviter ces blocages, une boucle est ajoutée pour vérifier si la distance entre le robot et l'obstacle est proche au moins de 6 m cela nécessite une force répulsive plus forte pour éviter une collision. Les paramètres de cette boucle peuvent être changés tout dépend de chaque scénario.

```
if d < R_ob(i) + 6 % si l'obstacle est proche d'au moins 6 m
    F_att = [0 0];
    F_rep_i = R_ob(i) * k_rep + 20 * (1/d^2) * (pos - obstacle) / d; % Force
    % répulsive de l'obstacle i
    F_rep = F_rep + F_rep_i;
end
```

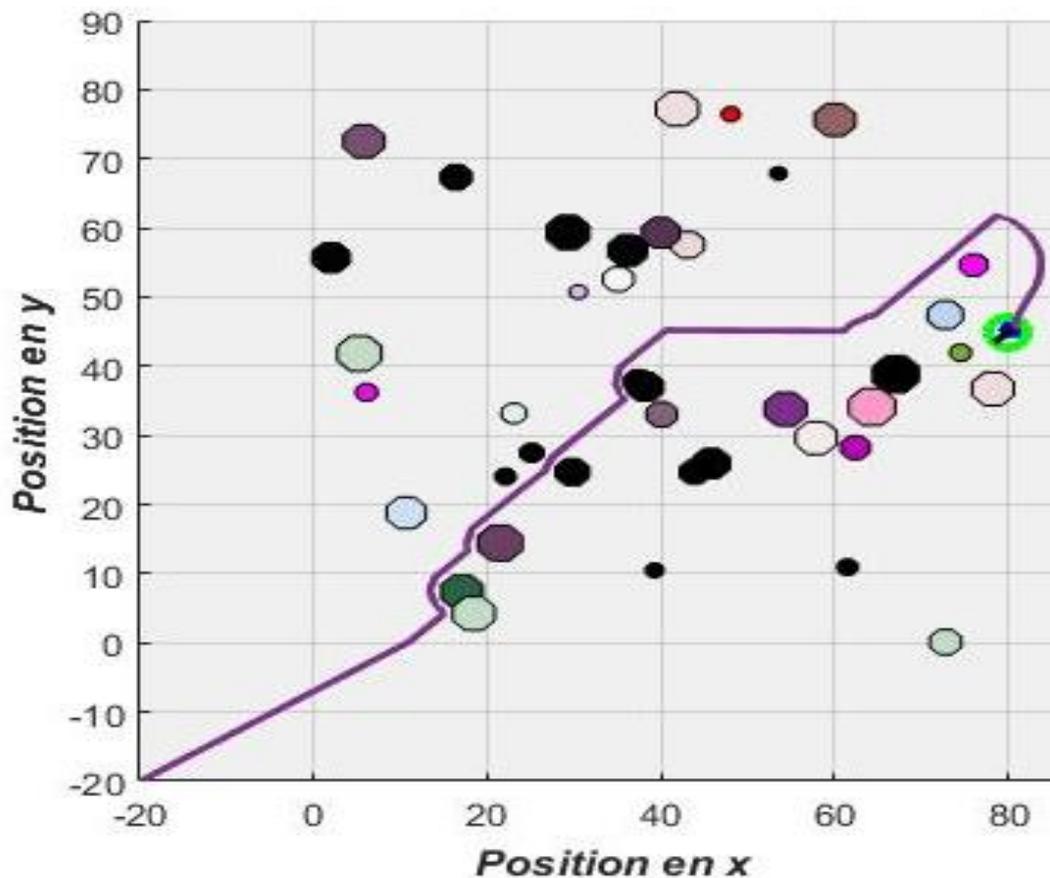


Figure III.2 Trajectoire du robot du premier scénario après ajustement

- La **Figure III.2** Montre que la boucle de contrôle a été efficace, le robot a réussi à trouver une trajectoire sans être bloqué.

III.2.7.2 Deuxième scénario

Les mêmes paramètres que dans l'exemple précédent, ont été conservés à l'exception de la position de l'objectif qui a été modifiée selon le **Tableau III.2** :

Tableau III.2 Paramètre du deuxième scénario

Le pas du temps de simulation	0.3 m/s
Position du robot	[-20,-20]
Position de l'objectif	[80,80]
Constante attractive	3
Constante répulsive	30
Nombre d'obstacles	40

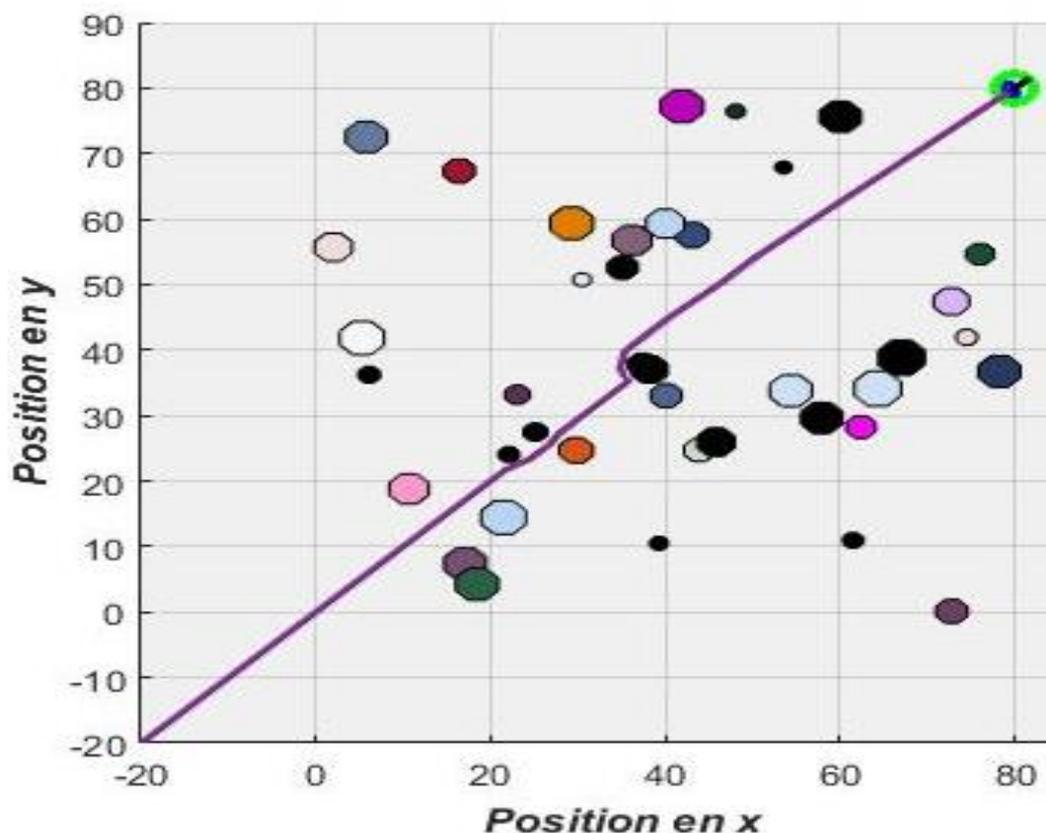


Figure III.3 Trajectoire du robot du deuxième scénario

- A partir de la **Figure III.3**, on constate que le robot parvient à trouver une trajectoire pour arriver au but sans collision avec les 40 obstacles, cependant, dans ce scénario, les obstacles sont dispersés et l'objectif n'est pas entouré d'obstacle.

III.2.7.3 Troisième scénario

Dans ce scénario, l'objectif a été positionné entre deux obstacles, comme le montre la Figure III.4.

Tableau III.3 Paramètre du troisième scénario

Le pas du temps de simulation	0.3 m/s
Position du robot	[-20,-20]
Position de l'objectif	[40,70]
Constante attractive	1
Constante répulsive	30
Nombre d'obstacles	30

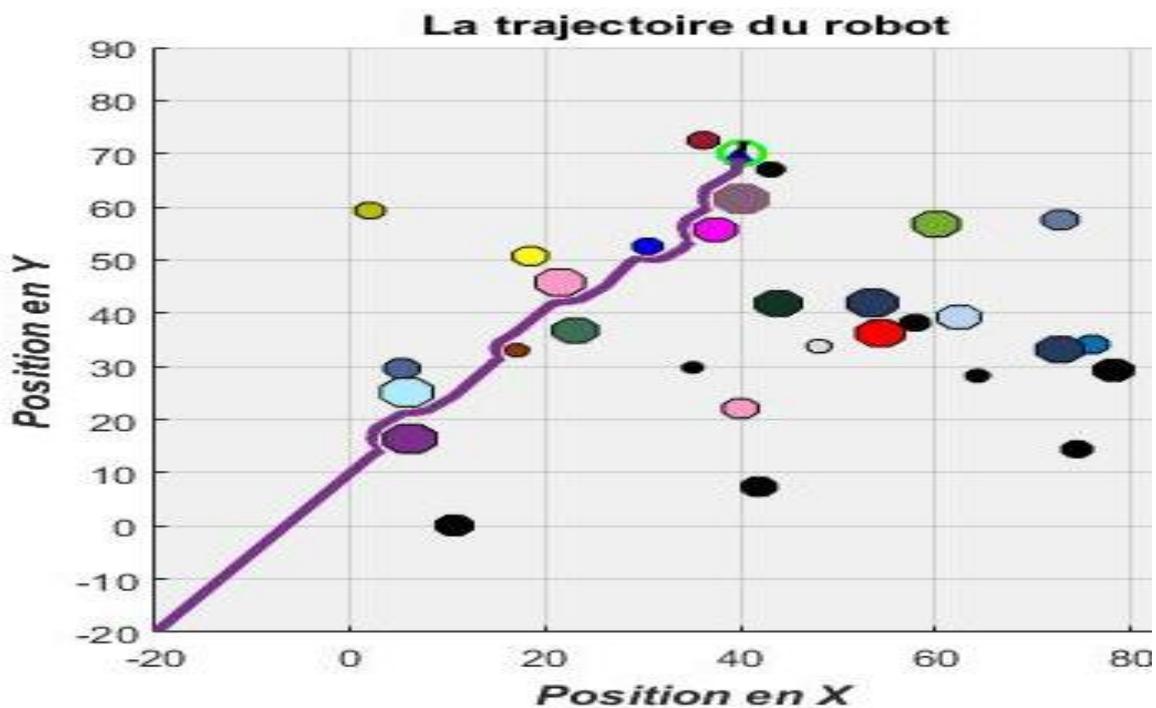


Figure III.4 Trajectoire du robot du troisième scénario

- D'après la **figure III.4** on observe que le robot se dirige vers le but avec une trajectoire rectiligne qui a une allure d'une droite. Cependant quand il arrive aux obstacles, il dévie avec un certain angle de sa trajectoire pour éviter la collision avec l'obstacle jusqu'à ce qu'il arrive à l'objectif.

III.2.7.4 Quatrième scénario

Dans ce scénario, tous les obstacles ont été regroupés dans le même endroit, comme illustré dans la **Figure III.5**

Tableau III.4 Paramètre du quatrième scénario

Le pas du temps de simulation	0.5 m/s
Position du robot	[-20,-20]
Position de l'objectif	[27,32]
Constante attractive	4
Constante répulsive	80
Nombre d'obstacles	50

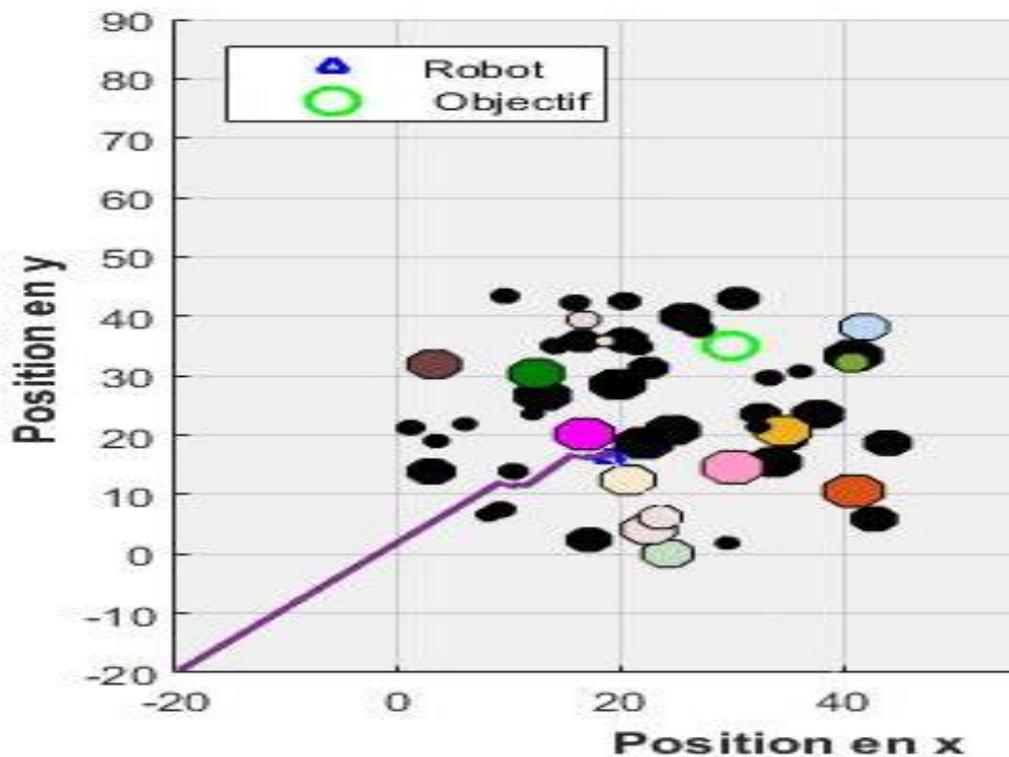


Figure III.5 Trajectoire du robot du quatrième scénario

- La **Figure III.5** montre la situation où le robot se retrouve coincé entre les obstacles. Malgré les tentatives de modification des paramètres et d'utilisation de la boucle proposée dans le premier scénario le robot continue à suivre la même trajectoire, ce qui entraîne un blocage. Afin de remédier à cette situation, une boucle a été proposée elle ajuste les forces attractives et répulsives en fonction de la distance entre le robot et l'obstacle. Lorsque le robot se trouve à moins d'un mètre d'un obstacle, les forces attractive et répulsive seront réduites de manière proportionnelle à la distance entre le

robot et l'obstacle. Cette modification permettra au robot de trouver une nouvelle trajectoire et de contourner les obstacles avec succès.

```

% Réduire la force attractive proportionnellement à la distance
if d < R_ob(i)+1
    % Augmenter la force répulsive proportionnellement à la distance
    F_att = F_att * (d / R_ob(i));
    F_rep_i = R_ob(i) * k_rep * (pos - obstacle) / d;
    F_rep = F_rep + F_rep_i; % Force répulsive de l'obstacle i
else
    F_rep_i = R_ob(i) * k_rep * (1 / d^2) * (pos - obstacle) / d;
    F_rep = F_rep + F_rep_i; % Force répulsive de l'obstacle i
end
    
```

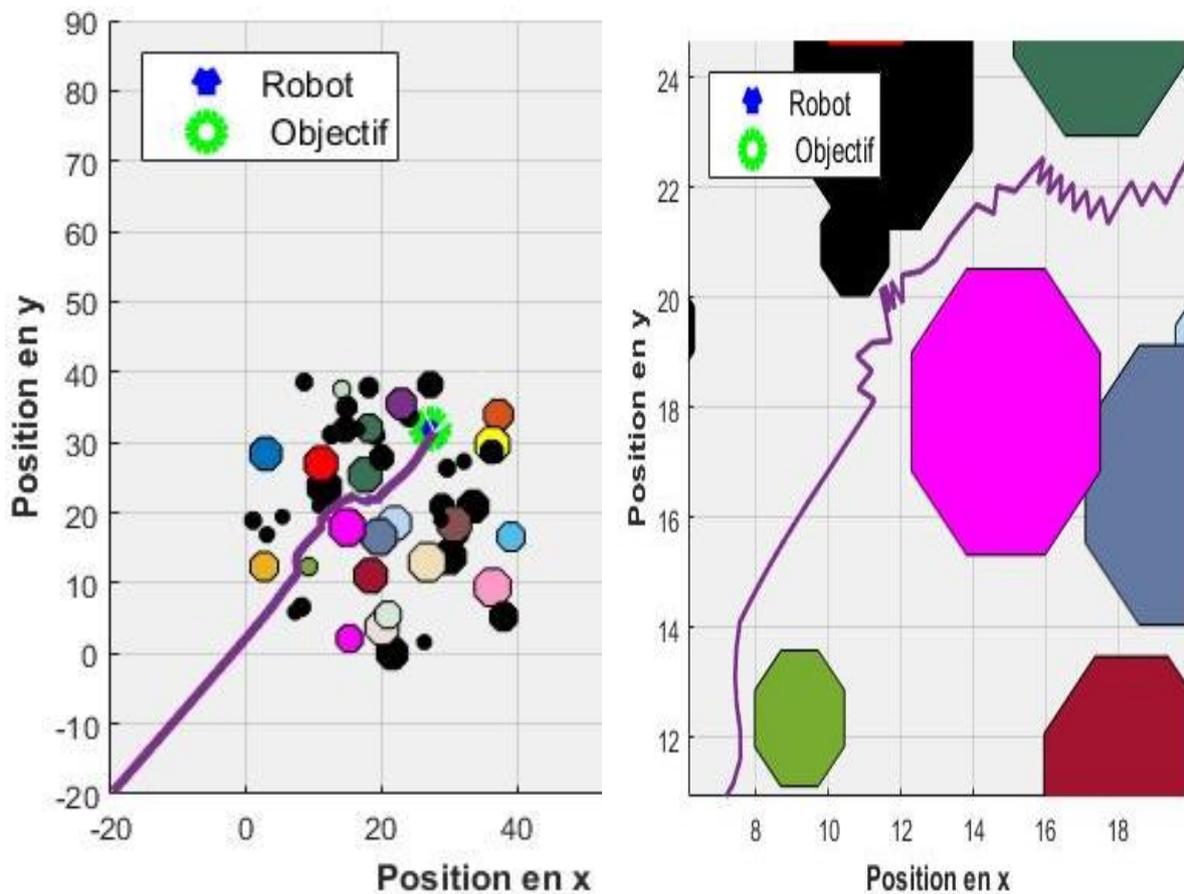


Figure III.6 Trajectoire du robot du quatrième scénario après ajustement

- La **Figure III.6** montre que le robot atteint l'objectif donné, cette boucle permet que le robot ressent à la fois des forces attractives et répulsives de la part de l'objectif et des obstacles respectivement, et ajuste son comportement en fonction de la proximité des obstacles. on remarque des oscillations à chaque fois que le robot se rapproche des obstacles.

Visualisation du potentiel attractif et repulsif du quatrième scénario

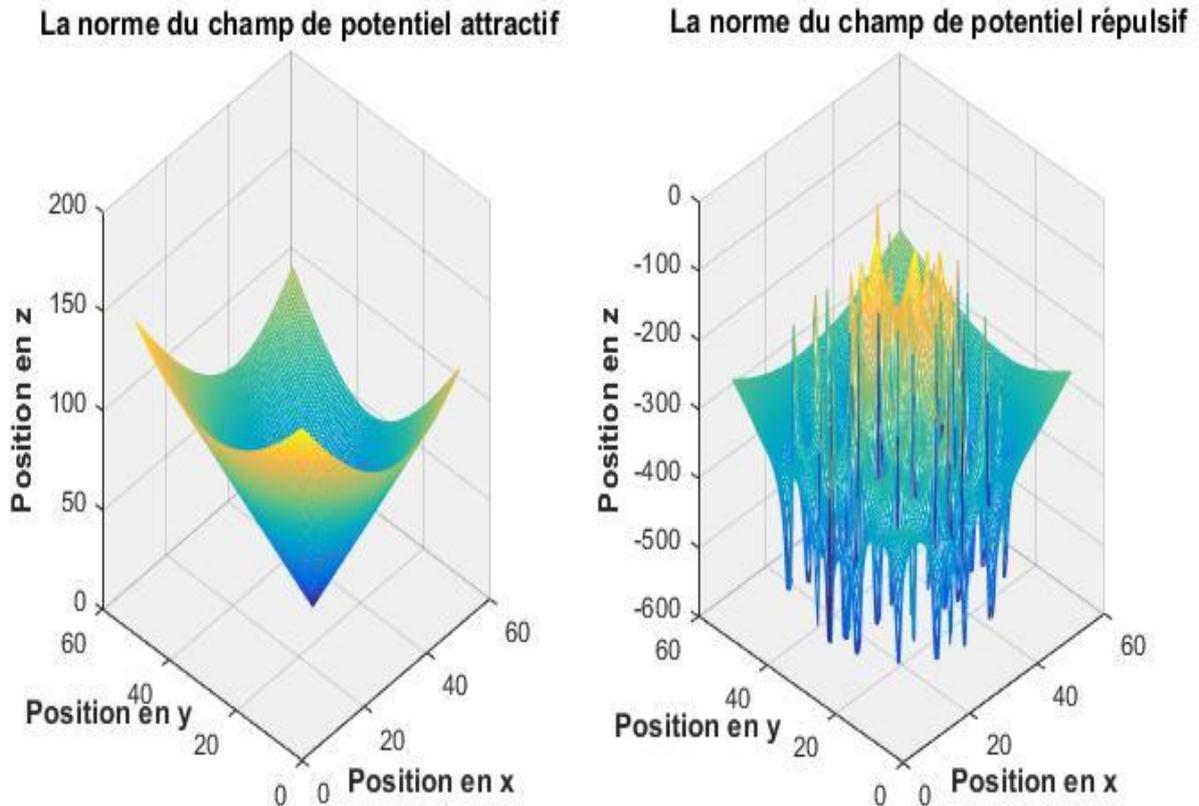


Figure III.7 La norme du champ de potentiel pour tous les points de l'espace

- La Figure III.7 présente le champ de potentiel attractif et répulsif. On peut observer que le champ attractif présente un unique pic qui pointe vers l'objectif, ce qui indique que le robot est attiré vers cet objectif. En revanche, le champ répulsif crée des zones d'éloignement autour des obstacles. Ces valeurs sont représentées négativement pour indiquer que le robot est repoussé par les obstacles et cherche à les éviter.

III.2.7.5 Cinquième scénario

Tableau III.5 Paramètre du cinquième scénario

Le pas du temps de simulation	0.2 m/s
Position du robot	[0,0]
Position de l'objectif	[30,40]
Constante attractive	2
Constante répulsive	10
Nombre d'obstacles	2

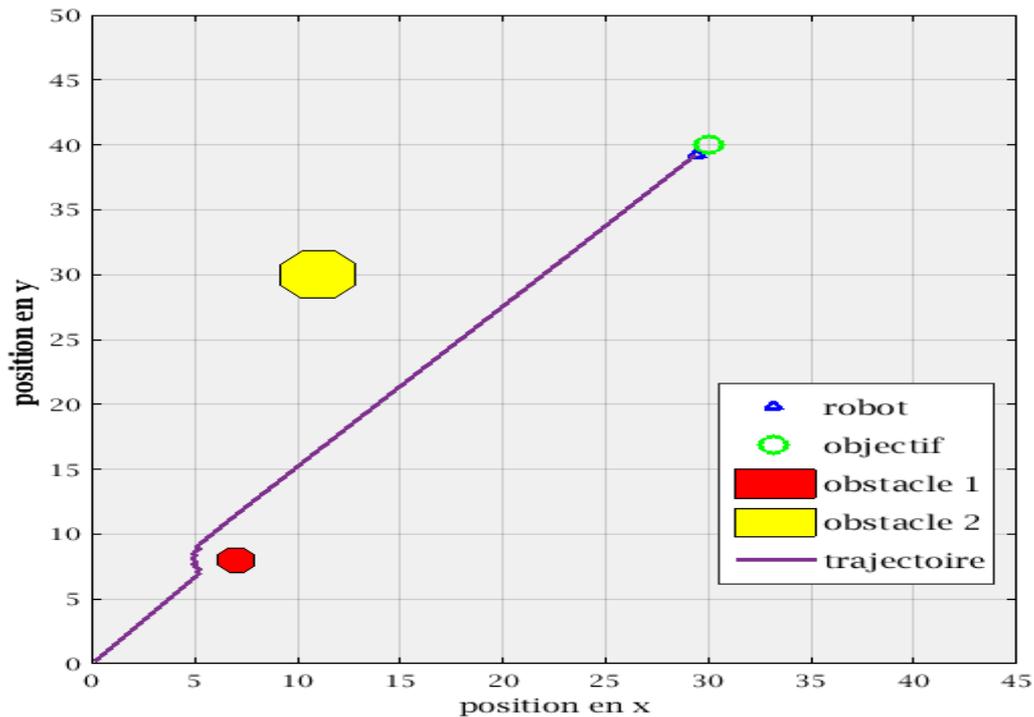


Figure III.8 Poursuite de trajectoire du cinquième scénario

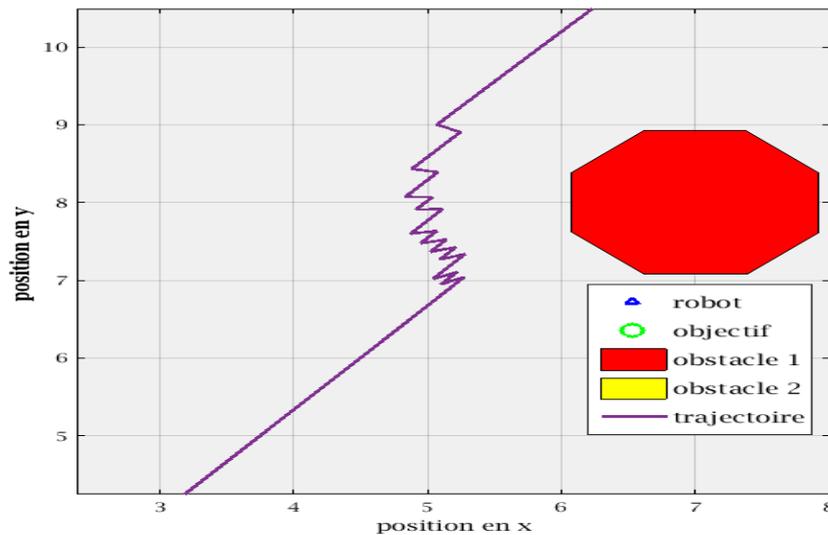


Figure III.9 Zoom sur l'approche d'obstacle du cinquième scénario

D'après les deux figures III.8 et III.9 le robot poursuit la trajectoire vers l'objectif, néanmoins une mouvementassions de la trajectoire est observée, lors que le robot se rapproche de l'obstacle. Le robot est attiré puis repoussé durant de très courtes périodes. Dans la suite de ce travail, la trajectoire obtenue dans ce scénario est comparée à celle obtenue en utilisant la commande automatique sur le modèle Dynamique en effet, le travail effectué jusqu'ici ne considère que la cinématique du robot. Dans la suite, nous allons appliquer la méthode du champ de potentiel sur le modèle dynamique obtenu au chapitre II.

III.3 planification de trajectoire et commande du robot par champs potentiels

La **Figure III.10** représente le schéma simplifié de la commande utilisé pour la planification de trajectoire :

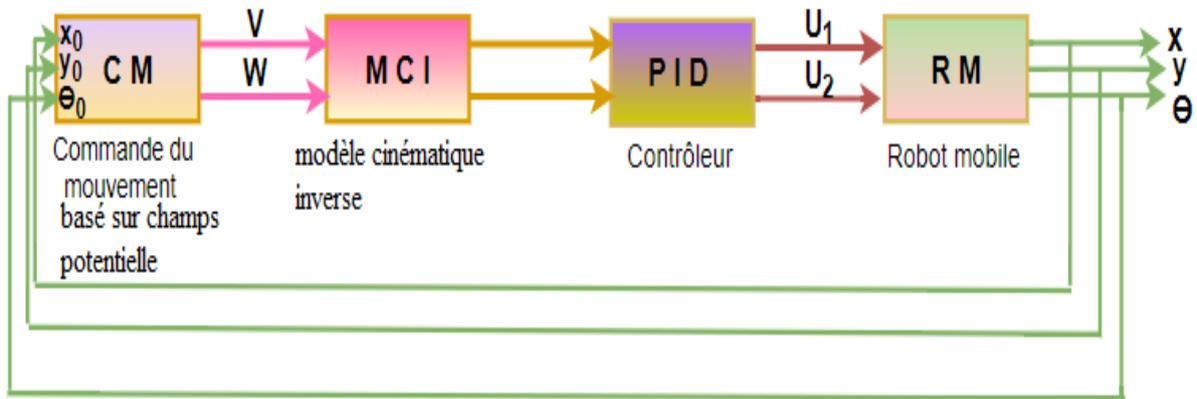


Figure III.10 Le schéma complet de la commande

- Code utilisé dans les blocs fonctions :
 - 1- Pseudo-code de la commande du mouvement

```

1- Fonction de sortie =(t, x0, y0, theta0)
2- % Initialisation de la position du robot
3- Si t=0 → p=[0,0]
4- Sinon → p=[x0,y0]
5- % Paramètres de simulation
6- g = [30, 40] % Position de l'objectif
7- Dis = ||(g - p)|| % Distance entre la position actuelle et l'objectif
8-  $K_{att} = 0.025 + \frac{1}{(Dis + 0.2)}$  % Constante de proportionnalité pour la force attractive
9-  $k_{rep} = 20$  % Constante de proportionnalité pour la force répulsive
10-  $F_{att} = k_{att} \times (g - p)$  % Calcul de la force attractive vers l'objectif
11-  $F_{rep} = [0, 0]$  % Initialisation de la force répulsive totale
12- % Calcul de la force répulsive des l'obstacles
13- Pour chaque obstacle
14-  $D = \|p - n\|$ 
15-  $F_{rep} = F_{rep} + k_{rep} \times \left(\frac{1}{D^2}\right) \times \frac{p - n}{D}$ 
16- % Calcul de la force résultante
17-  $F_{res} = F_{att} + F_{rep}$ 
18- % Mise à jour de la position du robot
19-  $P = p + s \times F_{res}$ 
20- Calcul de x, y, dy, dx, xd, yd, d, alpha, v et w
21- Retourner v, w, Dis, xd, yd, alpha,  $k_{att}$ ,  $k_{rep}$ ,  $F_{att}$ ,  $F_{rep}$ ,  $F_{res}$ 
22- Fin de la fonction
    
```

2- Code du modèle cinématique inverse

```

Fonction, (v, w)
r = 0.1 % Rayon de la roue en mètres
L = 0.2 % Distance entre les roues en mètres

 $\dot{\phi}_r = \frac{(2v+lw)}{2r}$  % Calcul de la vitesse de rotation de la roue droite
 $\dot{\phi}_l = \frac{(2v-lw)}{2r}$  % Calcul de la vitesse de rotation de la roue gauche
Fin de la fonction fcn
    
```

- Une simulation numérique a été réalisée avec le logiciel MATLAB/Simulink pour étudier le comportement de la dynamique d'un robot mobile tel que décrit dans le deuxième chapitre. Dans cette simulation, le programme du champ potentiel a été inséré dans la commande du mouvement afin d'obtenir une poursuite de trajectoire désiré.
- **Le tableau III.6** présente la mise en scène de la commande

Tableau III.6 Paramètre des simulation

Paramètre	Définit	Valeur
s	Le pas du temps de simulation	0.2 m /s
[x0, y0]	Position du robot	[0 0]
g	Position de l'objectif	[30 40]
K _{att}	Constante attractive	$0.025 + \frac{1}{(Dis + 0.2)}$
K _{rep}	Constante répulsive	20
N	Nombre d'obstacle	2
B	Paramètre de multiplication de la Vitesse linéaire	1.1
c	Paramètre de multiplication de la Vitesse angulaire	1.1

Avec :

Dis : la distance entre la position actuelle du robot et de l'objectif

d : distance entre deux pas de simulation

α: angle de déviation (la différence angulaire entre la direction actuelle du robot et la direction de l'objectif)

Dans ce cas la constante d'attraction (K_{att}) varie de manière dynamique selon l'équation :

$$k_{att} = \left(0.025 + \frac{1}{Dis+0.2}\right) \quad (III.1)$$

Pour avoir une planification de trajectoire fluide et sans perturbation. Lorsque le robot se rapproche de l'objectif la force attractive devient faible.

III.3.1 Résultats de simulation et discussions

Le cinquième scénario a été choisi pour l'étude de poursuite de trajectoire avec l'utilisation du système globale (robot et contrôleur) obtenue dans le deuxième chapitre voir la **Figure II.4**. Afin de réaliser cela le programme du champ potentiel a été intégré à l'intérieur de la commande du mouvement. Une variation dynamique est appliquée à la constante d'attraction (k_{att}), Les résultats obtenus sont illustré dans la **Figure III.11**.

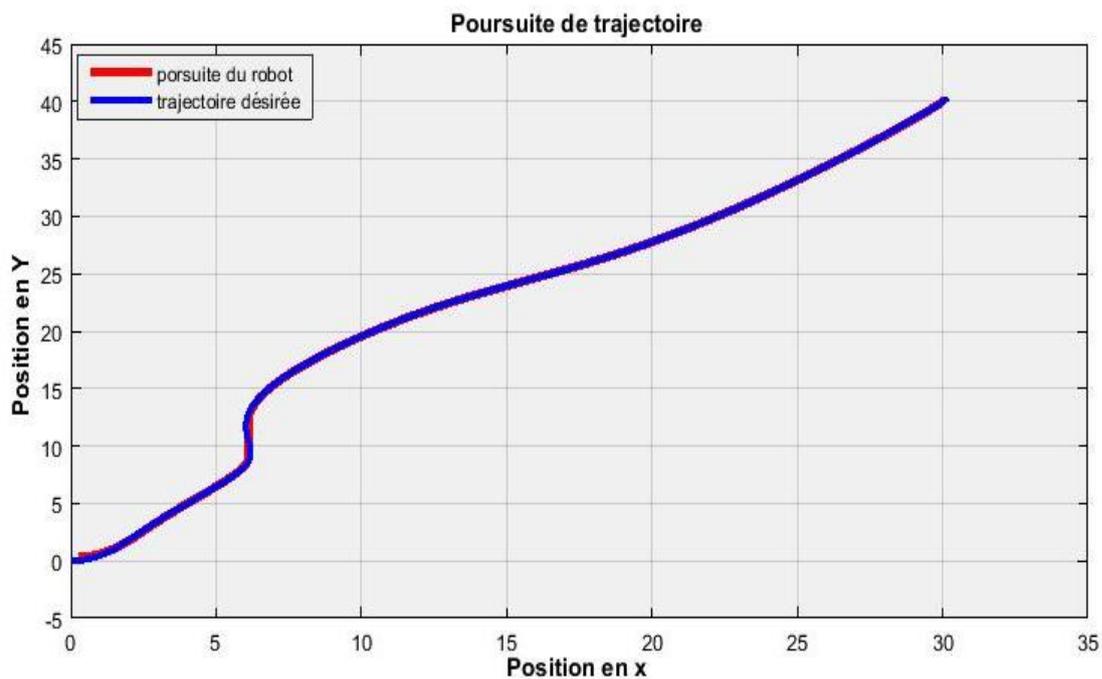


Figure III.11 Poursuite de trajectoire

▪ Dans la **Figure III.11**, on observe que le robot a réussi à suivre la trajectoire désirée tout en évitant les obstacles, jusqu'à atteindre l'objectif fixé. La trajectoire parcourue par le robot est lisse. Cependant, on remarque une légère oscillation lorsque le robot s'approche de l'objectif le long de l'axe x. Cette instabilité est due à l'utilisation de la fonction donnée par l'équation (III.1) pour calculer la constante attractive. Lorsque la distance (Dis) entre le robot

et l'objectif devient très proche de zéro, cela entraîne une variation brusque de la force attractive. Ceci peut être amélioré en utilisant une fonction qui se comporte d'une manière plus douce.

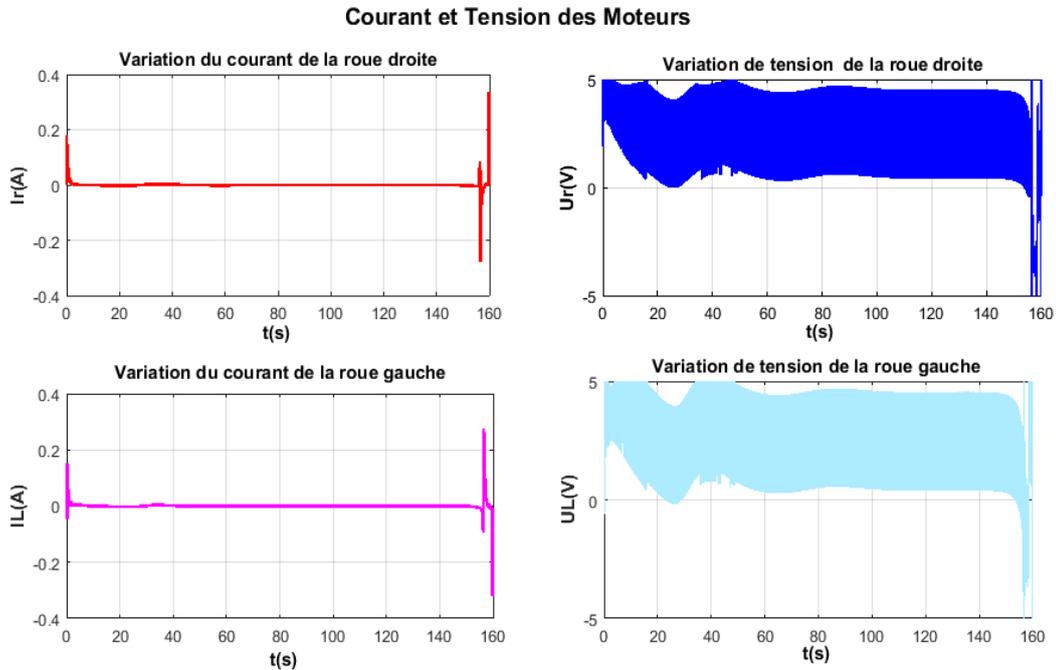


Figure III.12 Courant et tension appliqué aux moteurs

- La **Figure III.12** présente les courbes des courants et des tensions des moteurs de la roue droite et roue gauche, obtenu après correction des PID.

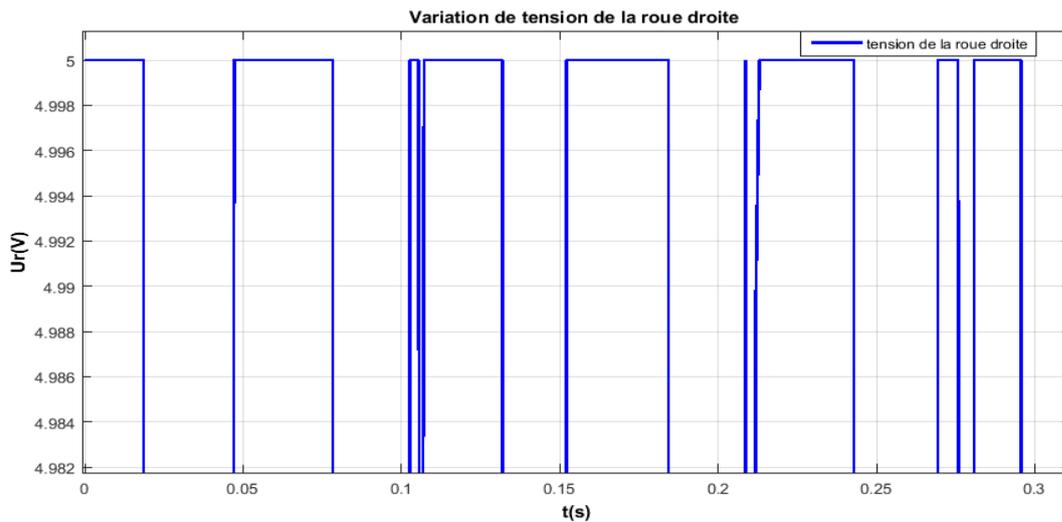


Figure III.13 Zoom sur l'approche de la tension de la roue droite

- La **Figure III.13** représente un zoom sur l'approche de la tension de la roue droite

erreurs de variation de tension

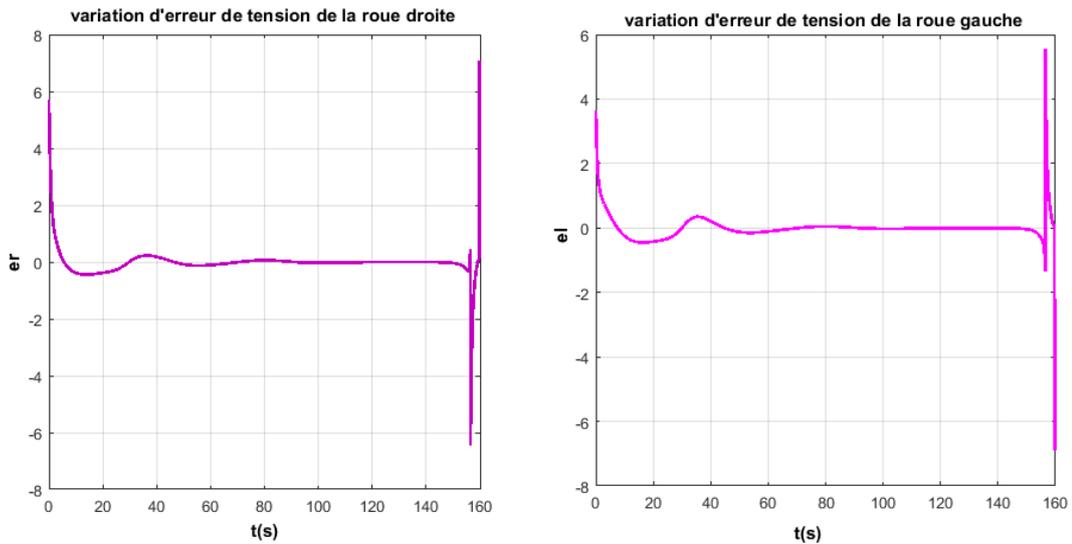


Figure III.14 Graphes des erreurs de tension des moteurs

- La Figure III.14 présente les courbes des erreurs de tensions des moteurs de la roue droite et roue gauche (e_r et e_l).

Les couples moteurs T1,T2

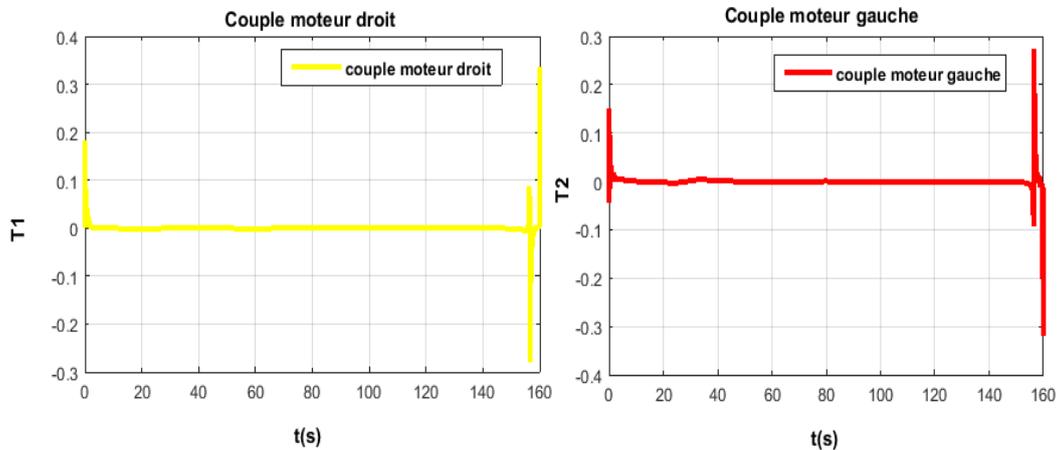


Figure III.15 Les couples moteurs

- La Figure III.15 illustre les courbes des couples moteurs des roues droite et gauche. Elles représentent l'évolution du couple exercé par chaque moteur au cours du temps.

variation des vitesses linéaire et angulaire

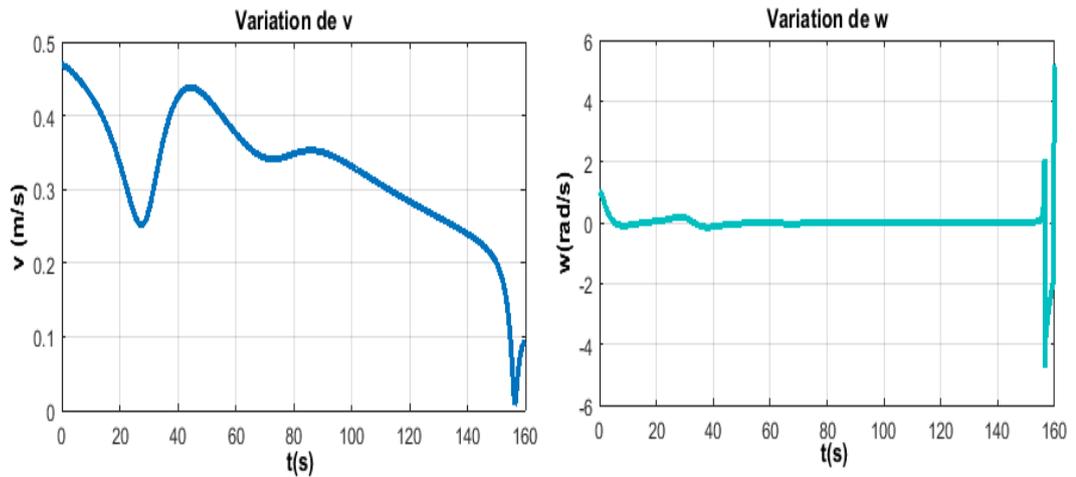


Figure III.16 Vitesses linéaire et angulaire

- Dans La **Figure III.16**, les graphes des variations des vitesses linéaires (v) et angulaires (w) au cours du temps, on observe que les vitesses subissent des perturbations lorsque le robot s’approche de l’objectif. Cela a dues à la fonction de la force attractive choisie pour guider le robot.

Vitesse angulaires des roues

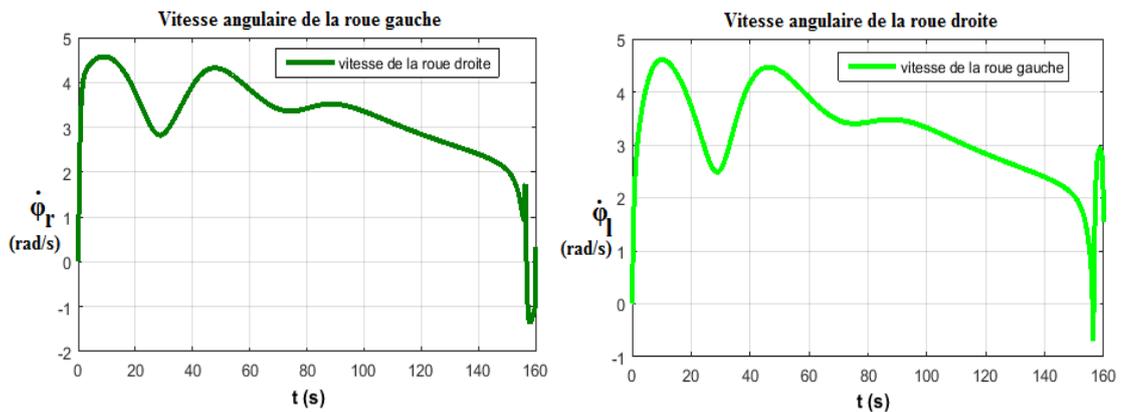


Figure III.17 Vitesses angulaires des roues

- La **Figure III.17** présente les courbes des vitesses angulaires des roues ($\dot{\phi}_R, \dot{\phi}_L$) au cours du temps.

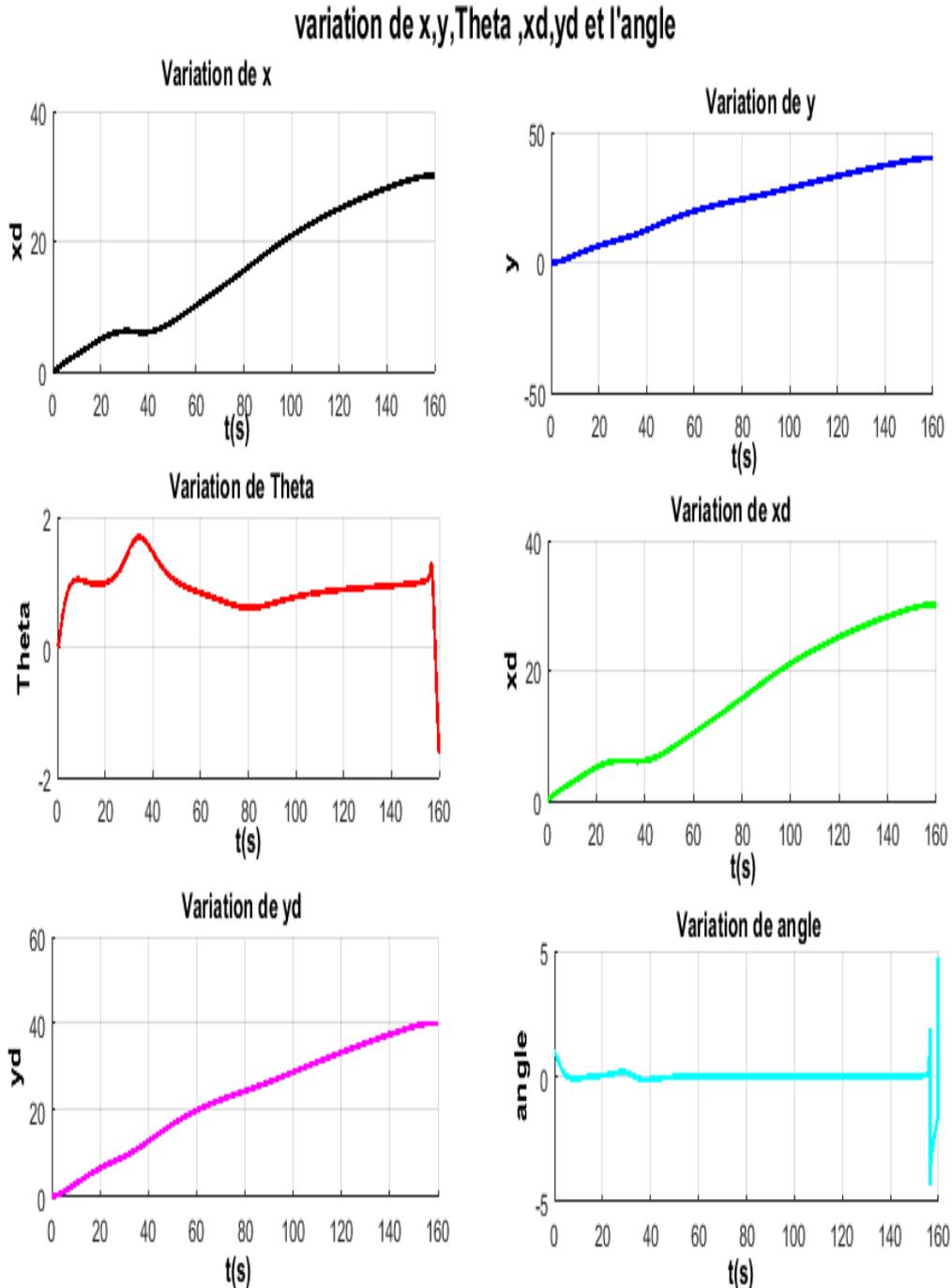


Figure III.18 Graphe des variations de x, y, theta, xd, yd et l'angle

- La Figure III.18 présente les graphes des variations des coordonnées x, y et theta du robot depuis sa position de départ vers les coordonnées désirées x_d , y_d et l'angle, au cours du temps.

Constantes de proportionnalité pour les forces attractives et répulsives

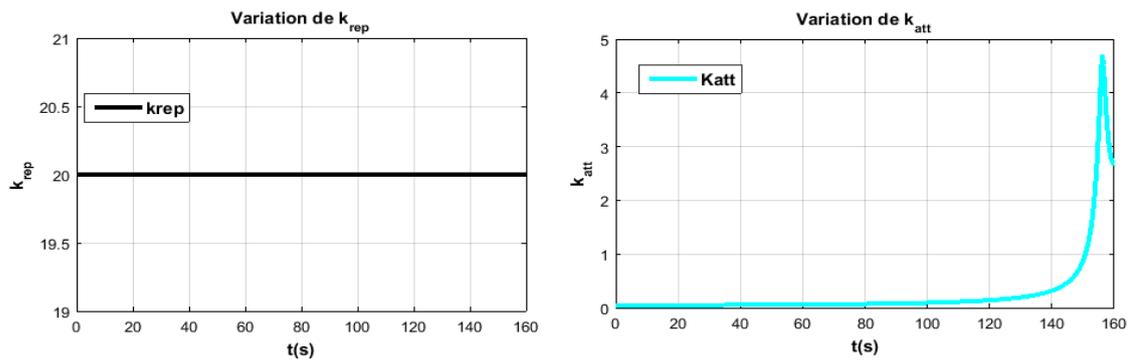


Figure III.19 Constantes de proportionnalité pour les forces attractives et répulsives

- La Figure III.19 présente les graphes des constantes de proportionnalité des forces attractive et répulsive, au cours du temps.

Forces de repulsion et d'attraction

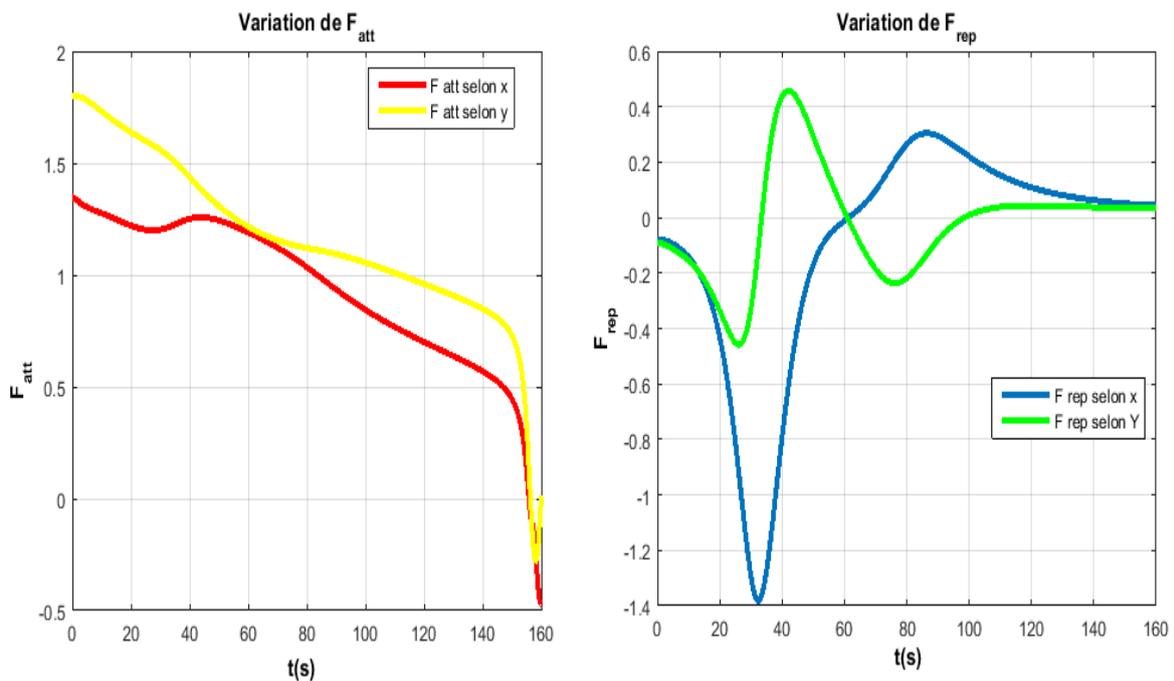


Figure III.20 Graphe des forces de répulsion, attraction et résultantes

- La Figure III.20 représente les graphiques de la force répulsive et la force attractive exercées sur le robot, au cours du temps.

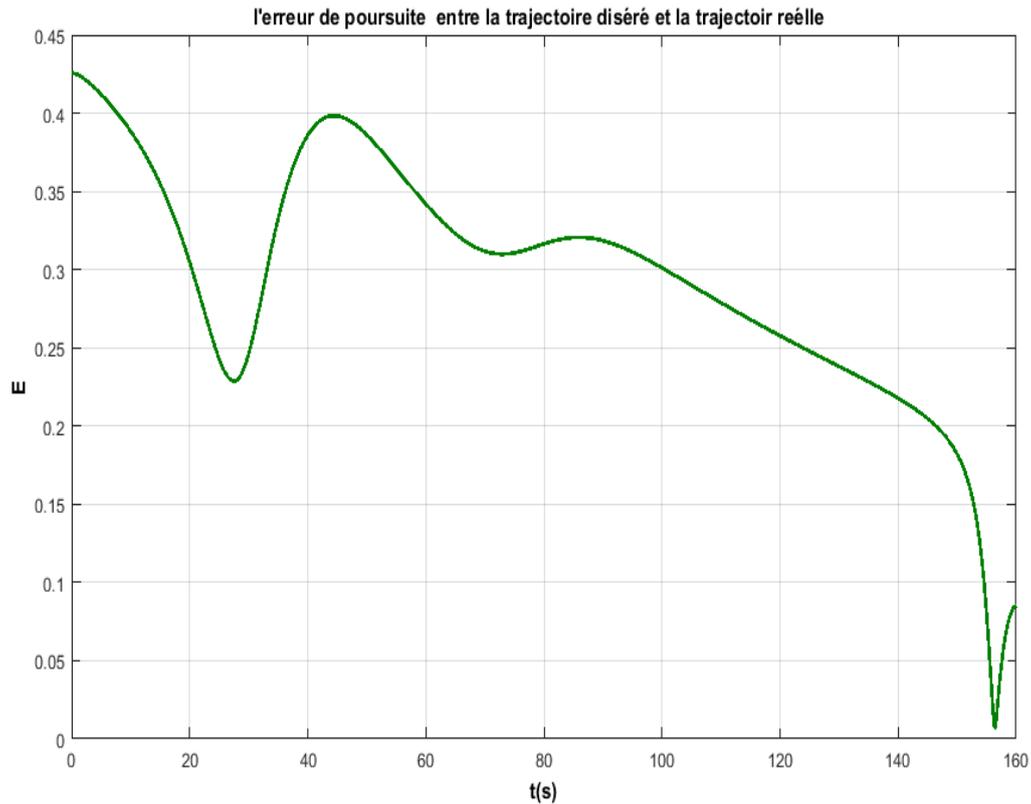


Figure III.21 Erreur de poursuite entre la trajectoire désirée et la trajectoire réelle

- La **Figure III.21** indique l'erreur de poursuite entre la trajectoire désirée et la trajectoire réelle, elle est obtenue par l'équation mathématique suivante :

$$E = \sqrt{((dx - x)^2 + (dy - y)^2)} \quad (III.2)$$

- Les résultats obtenus indiquent que la poursuite du robot le long de la trajectoire désirée est globalement réussie. Cette erreur peut être minimisée en utilisant des méthodes de commande sophistiquée ou en optimisant le PID.

III.4 Conclusion

Ce chapitre présente l'utilisation de la méthode du champ de potentiel pour la planification de trajectoire. En utilisant cette approche, des scénarios ont été interprétés en utilisant uniquement le modèle cinématique. Pour améliorer la poursuite de trajectoire, le champ de potentiel a été intégré dans la commande du mouvement avec une constante d'attraction dynamique.

En proposant des ajustements sur les méthodes de commande et les paramètres PID, il est possible d'améliorer les performances du système. Ces ajustements sont une proposition visant à optimiser la précision, la stabilité et le suivi de la trajectoire.

Conclusion générale

Ce mémoire de fin d'étude, met en évidence la planification de trajectoire et la commande d'un robot mobile différentiel, en utilisant la méthode du champ de potentiel en temps réel. L'objectif ultime, était de permettre au robot de se déplacer de manière autonome, dans son environnement tout en évitant les obstacles et en atteignant l'objectif donné.

Au cours de cette étude, plusieurs scénarios ont été réalisés pour évaluer l'efficacité de l'approche choisie. Les résultats principaux démontrent que la détection des obstacles par le robot est réalisée de manière sûre et fiable, indépendamment de leur forme. De plus, le robot est capable de suivre en temps réel la trajectoire souhaitée grâce à la méthode du champ de potentiel, qui est efficace pour guider le robot dans son environnement.

Cependant, des limitations ont été identifiées, notamment le risque de blocage du robot dans des minima locaux ou de l'oscillation lors des passages étroits.

Le mémoire est structuré en trois chapitres. Le premier a présenté une vue d'ensemble de la robotique mobile. Le deuxième a abordé la modélisation du robot mobile différentiel, tandis que le troisième chapitre a exploré la méthode du champ de potentiel pour la poursuite de trajectoire.

L'objectif principal a été atteint. Toutefois, des améliorations sont encore possibles. Il est proposé d'utiliser un contrôleur sophistiqué et d'appliquer cette approche à un robot réel.

ce mémoire a été une expérience enrichissante qui a renforcé notre compréhension sur la robotique mobile et nous a permis d'acquérir des compétences essentielles pour la conception et la mise en œuvre de systèmes autonomes. Nous espérons que ce travail inspirera d'autres chercheurs et ingénieurs à explorer davantage les domaines de la planification de trajectoire et de la commande des robots mobiles.

Bibliographie

- [1] Agnès Guillot, « Histoire de la robotique : automate aux premiers robots », Dossiers FuturaTech, **site web** : www.futura-sciences.com, **visité le** : 18/03/2023.
- [2] ALLOUI, A., & Brahim, A. H. A. J. (2007). Proposition d'une solution multi-agent pour la commande et la coopération multi-robot mobile. Mémoire d'ingénieur d'état en automatique, Université Biskra.
- [3] Laëtitia Matignon « Introduction à la robotique », Support de cours, Université de Caen, France, 2011/2012.
- [4] Dictionnaire Larousse, Edition en ligne, 2008.
- [5] Professor Michel j « Robotics Modelling, planning and control », support de cours, université de strathclyde ,Glasgow ,2009/2010.
- [6] **site web** : <https://www.cairn.info/revue-defense-nationale-2020-3-page-69.htm> **visité le**: 19/03/2023
- [7] Pflimlin, É. (2017). Drones et robots. Studyrama, Paris.
- [8] Spiewak, J. M. (2007). Contribution à la coordination de flottille de véhicules sous-marins autonomes (Doctoral dissertation, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc).
- [9] Bayle, B. (2008). Robotique mobile. Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg Université Louis Pasteur, 2007.
- [10] KADDOUR, S., & ZANAT, S. (2021). Etude et réalisation d'un robot mobile commandé via androïde (Doctoral dissertation, university of M'sila).
- [11] Dhaouadi, R., & Hatab, A. A. (2013). Dynamic modelling of differential-drive mobile robots using lagrange and newton-euler methodologies: A unified framework. *Advances in Robotics & Automation*, 2(2), 1-7.
- [12] Babesse, S. (2008). CONTRIBUTION A LA SIMULATION ET AU CONTROLE D'UN MINIROVER SOUS L'EFFET DE L'INTERACTION ROUE/SOL (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [13] Neimark, J. I., & Fufaev, N. A. (1972). Dynamics of nonholonomic systems, *Translations of Mathematical Monographs*, vol. 33. American Mathematical Society, Providence, Rhode Island, 518, 65-70

- [14] Bloch, A. M., & Bloch, A. M. (2003). Nonholonomic mechanics (pp. 207-276). Springer New York.
- [15] Etienne Deguine, Daniel Ross, « régulation PID », 26/02/2010.
- [16] Le Lann, C. (2007). Le PID utilisé en régulation de position et/ou de vitesse de moteurs électriques. Projet de fin d'étude.
- [17] Khatib, O. (1986). Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. The international journal of robotics research, 5(1), 90-98.
- [18] Koren, Y., & Borenstein, J. (1991, April). Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation. In *Icra* (Vol. 2, No. 1991, pp. 1398-1404).
- [19] Rimon, E. (1990). Exact robot navigation using artificial potential functions. Yale University.
- [20] LaValle, S. M. (1998). Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning
- [21] Adachi, Y., Saito, H., Matsumoto, Y., & Ogasawara, T. (2003, July). Memory-based navigation using data sequence of laser range finder. In *Proceedings 2003 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. Computational Intelligence in Robotics and Automation for the New Millennium* (Cat. No. 03EX694) (Vol. 1, pp. 479-484). IEEE.
- [22] Koren, Y., & Borenstein, J. (1991, April). Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation. In *Icra* (Vol. 2, No. 1991, pp. 1398-1404).

Annexes

Annexes A : tableau des paramètres de simulation du robot

Symboles	Valeur	Paramètres
X0	0	Position du robot initiale selon l'axe x
Y0	0	Position du robot initiale selon l'axe y
Theta0	0	Orientation du robot dans le plant
R	0.1 m	Rayon des roues
L	0.2 m	Distance entre les roues
Iw	0.01 kg* M ²	Moment d'inertie de chaque roue
mw	0.1 kg	Masse du robot sans les roues et les actionneurs
mc	0.8 kg	Masse du châssis du robot
d	0.05 m	Distance entre le centre du robot et l'axe des roues
m	M=mc+2*mw	Masse totale du robot
Ic	0.01 m	Moment d'inertie du robot autour de l'axe vertical passant par le centre de masse
Im	0.1 m	Moment d'inertie totale du robot
r	0.1 m	Rayon du bras du support
kt	1	Constante du couple moteur
ki	0.1	Gain du régulateur PID
kb	1	Constante de force contre-électromotrice

Annexes B : programme des exemples du champ potentiel

Exemple (2)

```

% Paramètres de la simulation

delta_t = 0.2; % Pas de temps de la simulation
pos = [0, 0]; % Position initiale du robot
goal = [80 80]; % Position de l'objectif
k_att = 3; % Constante de proportionnalité pour la force attractive
k_rep = 30; % Constante de proportionnalité pour la force répulsive
nob=40; % 1 10 nombre d'obstacles

obstacles = 80*rand(nob,2); % Position des obstacles
R_ob=2*rand(nob,1)+1; % rayon des obstacles

Traj=[]

% Boucle de contrôle
while norm(pos - goal) > 1 % Tant que le robot n'a pas atteint l'objectif

% Calcul de la force attractive vers l'objectif
F_att = k_att * (goal - pos);

% Calcul de la force répulsive des obstacles
F_rep = [0, 0]; % Initialisation de la force répulsive totale
for i = 1:size(obstacles, 1) % Parcourir tous les obstacles
    obstacle = obstacles(i, :);
    d = norm(pos - obstacle); % Distance entre robot et l'obstacle i
    if d < R_ob(i)+1
        F_att=[0 0];
        F_rep_i=R_ob(i)*k_rep * (pos - obstacle);
        F_rep = F_rep + F_rep_i; % Force répulsive de l'obstacle i
    end
end

% Calcul de la force résultante
F_att
F_rep
F_res = F_att + F_rep;

% Mise à jour de la position du robot
pos = pos + max(min(delta_t * F_res/norm(F_res),0.50),-0.50);
Traj=[Traj;pos];

```

```

% Affichage de la simulation
clf;holdon;
plot(pos(1), pos(2), 'b^', 'MarkerSize', 5, 'LineWidth', 2); % Robot en bleu
plot(goal(1), goal(2), 'go', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 2); % Objectif en vert
t = (1/16:1/8:1)*2*pi;
for k=1:nob
x = R_ob(k)*cos(t)+obstacles(k,1);
y = R_ob(k)*sin(t)+obstacles(k,2);
fill(x,y,'k')
end
% plot(obstacles(:, 1), obstacles(:, 2), 'ro', 'MarkerSize', 5, 'LineWidth', 2); % Obstacles
en rouge
quiver(pos(1), pos(2), F_att(1), F_att(2), 'b', 'LineWidth', 2); % Force attractive en bleu
quiver(pos(1), pos(2), F_rep(1), F_rep(2), 'r', 'LineWidth', 2); % Force répulsive en
rouge
quiver(pos(1), pos(2), F_res(1), F_res(2), 'k', 'LineWidth', 2); % Force résultante en
noir
axis equal; axis([0, 90, 0, 90]); % Limites de l'affichage
drawnow;
pause(0.00001)
end
holdon
plot(Traj(:, 1), Traj(:, 2), 'LineWidth', 2);
gridon

```

Résumé

Ce mémoire présente une étude sur la commande et la poursuite de trajectoire d'un robot mobile en utilisant la méthode du champ de potentiel. L'objectif est de permettre au robot de se déplacer de manière autonome tout en évitant les obstacles. Le travail présente un modèle cinématique et dynamique du robot, une commande de mouvement, des contrôleurs PID et l'utilisation dynamique de la méthode du champ de potentiel en temps réel. Plusieurs scénarios ont été testés pour évaluer l'efficacité de cette approche. Les résultats démontrent une détection fiable des obstacles et une capacité du robot à suivre la trajectoire souhaitée. Des améliorations sont proposées, notamment l'utilisation d'un contrôleur plus sophistiqué et l'application de cette approche à un robot réel.

Summary

This thesis presents a study on the trajectory planning and control of a differential mobile robot using the potential field method. The objective is to enable autonomous movement of the robot while avoiding obstacles. The work introduces a system based on the kinematic and dynamic models of the robot, motion control, PID controllers, and real-time dynamic implementation of the potential field method. Multiple scenarios were tested to evaluate the effectiveness of this approach. The results demonstrate reliable obstacle detection and the robot's ability to follow the desired trajectory. Enhancements are proposed, including the use of more sophisticated controllers and the application of this approach to a real robot.

ملخص

يقدم هذه البحث دراسة حول التحكم وتتبع المسار للروبوت المتحرك باستخدام طريقة حقل القوة. الهدف هو تمكين الروبوت من التحرك بشكل مستقل مع تجنب العوائق. يقدم العمل نموذجًا حركيًا وديناميكيًا للروبوت، مستخدمًا متحكم للحركة، ومتحكمات PID. تم اختبار عدة سيناريوهات لتقييم فعالية هذا النهج. تظهر النتائج اكتشافًا موثوقًا للعقبات وقدرة الروبوت على اتباع المسار المطلوب. ثم اقترح تحسينات، بما في ذلك استخدام وحدة تحكم أكثر فعالية وتطبيق هذا النهج على روبوت حقيقي.