

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Automatisation et Contrôle Des Systèmes Industriels

THÈME

COMMANDE PAR MODE GLISSANT-FLOUE D'UN ROBOT ÉQUILIBRISTE

Préparé par : Melle. DROUCHE AICHA
Melle. YAZID AICHA

Devant le Jury:

	Grade	
Mr. Aced Mohamed Réda	MAA	Président
Mr. Sbaa Morsli	MCB	Examineur
Mr. Hattab Abdellilah	MAA	Encadreur

PROMOTION 2015 /2016

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Mr : **Hattab Abd El-illah** a leur précieux conseil et leur aide durant toute la période du travail, et nous tenons aussi à remercier M^{lle} : Zinne Souhila.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.



Didicace

Je dédie ce modeste travail de :

-A mes chers parents

-A mes chères sœurs

-A mes frères

- A toutes mes amies

-A mes collègues de 2eme année master.

-A mon encadreur Mr. HATTAB.

-A la famille YEZID.

-Sans oublier qui nous a beaucoup aidés pour réaliser ce

Présent mémoire.

-A tous ceux qui de près ou loin m'ont encouragé

à réaliser ce parcours.

A icha-Y



Didicace

Je dédie ce modeste travail de :

-A la mémoire de mon mère.

-A mon très cher père.

-A mes chères sœurs et mes frères.

- A toutes mes amies.

- A mon encadreur Mr. HATTAB.

- A la famille DROUCHE.

- A mes collègues de 2eme année master

-Sans oublier qui nous a beaucoup aidés pour réaliser ce
présent mémoire.

-A tous ceux qui de près ou loin m'ont encouragé
à réaliser ce parcours.

A icha D

Liste des figures

Liste des figures

CHAPITRE I : Présentation des robots équilibristes

Fig I.1 : Robots Humanoïdes	06
Fig I.2 : Bras robots manipulateurs	07
Fig I.3 : Robot bipède	08
Fig I.4 : Aspirateur automatique Roomba (iRobot)	09
Fig I.5 : Différents types de Robot	11
Fig I.6 : Robot mobile	12
Fig I.7 : Segway (gauche) et iBot 4000 (droite)	13
Fig I.8 : Les trois cas du pendule inverse balance	09
Fig I.9 : Diagramme de robot pendule inverse	13

CHAPITRE II : modélisation mathématique

Fig II.1 : Modèle dynamique du robot pendule inverse	19
Fig II.2 : Inclinaison et déplacement linéaire du robot	20
Fig II.3 : Diagramme de moteur a cc	21
Fig II.4 : Diagramme de corps libre de la dynamique d'inclinaison	22
Fig II.5 : Diagramme de corps libre d'une roue	23
Fig II.6 : Déplacements des roues lors d'un changement de direction	25
Fig II.7 : Diagramme de corps libre de la dynamique d'angle de direction	27

CHAPITRE III : Commande par mode glissant d'un robot équilibriste

Fig III.1 : Différents modes de convergence pour la trajectoire d'état	33
Fig III.2 : Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase	34
Fig III.3 : Structure de la commande en mode glissant avec commande équivalent	36
Fig III.4 : Représentation de la fonction « Signe »	36
Fig III.5 : Le phénomène de broutement	37
Fig III.6 : Fonction de saturation $Sat(S)$	38
Fig III.7 : Fonction tangente hyperbolique	38

Liste des figures

Fig III.8 : Model simulink du robot équilibriste	42
Fig III.9 : L'équilibre du robot x, θ, u_1	43
Fig III.10 : Angle de direction du robot $[\delta, u_2]$	43
Fig III.11 : Surfaces de glissement S1et S2	43
FigIII.12: L'équilibre du robot x, θ, u_1	44
Fig III.13: Direction du robot $[\delta, u_2]$	44
Fig III.14: Surface de glissement S1et S2	45
Fig III.15: L'équilibre de robot x, θ, u_1	45
Fig III.16: Direction du robot $[\delta, u_2]$	46
Fig III.17: Surface de glissement S1et S2	46
Fig III.18: L'équilibre du robot x, θ, u_1	47
Fig III.19: Direction du robot $[\delta, u_2]$	47
Fig III.20: Surface de glissement S1et S2	48

CHAPITRE IV : Commande par mode glissant floue d'un robot équilibriste

Fig IV.1 : Exemples de fonction d'appartenance	51
Fig IV.2: Représentation de variable linguistique	53
Fig IV.3: Schéma générale de la commande floue	55
Fig IV.4: Structure du régulateur glissant-flou	59
Fig IV.5: Partition floue de l'espace autour de la surface de glissement	60
Fig IV.6: Les fonctions d'appartenances d'entrée s	60
Fig IV.7: Les fonctions d'appartenances d'entrée u	60
Fig IV.8: Model simulink du robot équilibriste	61
Fig IV.9: L'équilibre du robot x, θ, u_1	62
Fig IV.10 : l'angle de direction du robot	62
Fig IV. 11: surfaces de glissement S1et S	63
Fig IV.12: L'équilibre du robot x, θ, u_1	63
Fig IV.13: L'angle de direction du robot	64
Fig IV.14: Surfaces de glissement S1et S2	64
Fig IV.15: L'équilibre du robot x, θ, u_1	65

Liste des figures

Fig IV.16: L'angle de direction du robot	65
Fig IV.17: Surfaces de glissement S1et S2	66
Fig IV.18: L'équilibre du robot x , θ , u_1	66
Fig IV.19: L'angle de direction du robot	67
Fig IV.20: Surfaces de glissement S1et S2	67

Liste des tableaux

Liste des Tableaux

CHAPITRE I : Présentation des robots équilibristes

TAB I.1 : Les diverses applications des robots mobiles 10

CHAPITRE II : modélisation mathématique

TAB II.1 : Paramètres du système 18

CHAPITRE IV : Commande par mode glissant floue d'un robot équilibriste

TAB IV.1: Exemple de matrice des règles 56

Liste des notations et des symboles

$\delta(t)$:	Angle de direction.
η :	Efficacité de la boîte de réduction.
$\theta(t)$:	Angle d'une roue.
$\theta_i(t)$:	Angle de l'arbre moteur.
$\theta_l(t)$:	Angle de la roue gauche.
$\theta_r(t)$:	Angle de la roue droite.
$\theta_o(t)$:	Angle de l'arbre de la boîte de réduction.
$\psi(t)$:	Angle d'inclinaison.
Cf :	Constante de friction.
D :	Distance entre l'arbre du moteur et le centre de gravité.
$F(t)$:	Force appliqué au sol par une roue.
$F_l(t)$:	Force appliqué au sol par la roue gauche.
$F_r(t)$:	Force appliqué au sol par la roue droite.
J_b :	Moment d'inertie de la moitié du corps du robot.
J_d :	Moment d'inertie du robot autour de l'axe vertical.
J_w :	Moment d'inertie de l'une des roues.
K_e :	Constante de force électromotrice des moteurs.
K_t :	Constante de couple des moteurs.
M :	Masse de la moitié robot, y compris une roue.
M_b :	Masse de la moitié du corps du robot.
M_w :	Masse de l'une des roues.
$T(t)$:	Couple livré à une roue.
$T_i(t)$:	Couple livré à la boîte de réduction par un moteur à courant continu.
$T_l(t)$:	Couple livré à la roue gauche.
$T_r(t)$:	Couple livré à la roue droite.
R_a :	Résistance d'armature des moteurs.
R_g :	Rapport de boîte de réduction.
R_w :	Rayon des roues.
S :	Distance entre les roues.
$x(t)$:	Position du robot.
$x_l(t)$:	Position de la roue gauche.
$x_r(t)$:	Position de la roue droite.
SMC :	Sliding Mode Control
FLC :	Contrôleur floue
SEF :	Sous-Ensemble Flou
SIF :	Système d'Inférence Floue

Sommaire

Sommaire

Remerciement	i
Dédicace	ii
Sommaire	iii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	vii
Introduction générale	2

Chapitre I : Présentation des robots équilibriste

I.1. Introduction	05
I.2. Historique de la robotique	05
I.3. Définition Un robot	06
I.4. Différentes types	06
I.4.1. Robots humanoïdes et R H de HONDA	06
I.4.2. Bras robots manipulateurs	06
I.4.3. Robot bipède	07
I.4.4. Robot de service	08
I.5. Application	09
I.6. Présentation générale des robots mobiles	10
I.6.1. Le robot équilibriste	11
I.6.2. Conception	11
I. 6.2.1. Un pendule inverse	11
I. 6.2.2. Présentation du Segway	12
I.7. Mode de fonctionnement	13
I.8. La commande des robots équilibristes	14
I.9. Conclusion	15

Chapitre II : modélisation mathématique

II.1. Introduction	17
II.2. Le modèle mathématique de robot pendule inverse et leur système dynamique	18
II.3. Inclinaison et déplacement linéaire	19
II.3.1. Modèle linéaire d'un moteur à courant continu	20
II.3.2. Couple appliqué à une roue	21

Sommaire

II.3.3.Dynamique d'inclinaison	22
II.3.4.Dynamique des roues et du déplacement linéaire	23
II.3.5.Modèle d'état de la dynamique linéaire	24
II.4.Angle de direction	25
II.4.1.Modèle d'état de la dynamique de direction	28
II.5. Conclusion	29

Chapitre III : Commande par mode glissant d'un robot équilibriste

III.1.Introduction	32
III.2.Commande par mode glissant	32
III.3. Systèmes à structure variables	33
III.4. Synthèse de la loi de commande	34
III.4.1. Choix de la surface de glissement	34
III.4.2. condition d'existence du mode de glissement	35
III.4.3. calcul de la commande	35
III.4.4. Fonction directe de commutation	36
III.5. le broutement (chattering)	37
III.6. Solution pour atténuer le phénomène de réticence	37
III.6.1. Solution de couche limite	38
III.7. Les avantages de la commande par mode glissant	39
III.8. Application de la commande sur le robot équilibriste	39
III.8.1. Espace d'état	40
III.8.2. Commande par mode glissant du robot	40
III.8.3. Model simulink	42
III.8.4. Resultats de simulation sous MATLAB	43
III.8.4.1. Resultats de simulation sans perturbation	43
III.8.4.2. Resultats de simulation avec perturbation en entrie	44
III.8.4.3. Resultats de simulation avec perturbation en sortie	45
III.8.4.4. Resultats de simulation avec une perturbation aléatoire (Gaussian) appliquée sur la sortie du robot	46
III.9. Conclusuon	48

Chapitre IV : Commande par mode glissant floue d'un robot équilibriste

IV.1.Introduction	50
IV.2. La logique floue	50
IV.2.1.Théorie des sous-ensembles flou	51
IV.2.2. Fonctions d'appartenance	51
IV.2.3. Caractéristiques d'un sous-ensemble flou	51
IV.2.4. Opérations sur les sous-ensembles flous	52
IV.2.5. Variables linguistiques	53
IV.2.6. Raisonnement en logique floue	53
IV.2.7. Règles floues	54
IV.2.8. Implication floue	54
IV.3. La commande floue	54
IV.3.1. Synthèse de contrôleur par la logique floue	55
IV.4. Avantages et désavantages du réglage par la logique floue	58
IV.5. Structure du contrôleur glissant-floue	59
IV.5.1. Application de la commande glissant-floue sur le robot équilibriste	59
IV.6 Résultat de simulation sous MATLAB	61
IV.6.1. Simulations de l'inclinaison et le déplacement du robot équilibriste	61
IV.6.1.1 Model simulink	61
IV.6.1.2. Resultats de simulation sans perturbation	62
IV.6.1.3. Resultats de simulation avec perturbation en entrée	63
IV.6.1.4. Resultats de simulation avec perturbation en sortie	64
IV.6.1.5. Resultats de simulation avec une perturbation aléatoire (Gaussian) appliquée sur la sortie du robot	66
IV.7.Conclusion	67
Conclusion générale	69
Références Bibliographie	72
Annexes	77

Chapitre I:

Présentation des robots équilibriste

I.1. Introduction :

La robotique est une science à la croisée de plusieurs disciplines scientifiques et techniques (mécanique, électronique, informatique,...) ses applications sont à présent principalement connues dans l'industrie.

Ce chapitre est consacré pour décrire des robotiques avec la présentation générale ainsi que l'application et le principe de fonctionnement et leur différent type et fournit aussi un résumé des revues de littérature sur des sujets liés à deux roues pendule inversé.

I.2. Historique de la robotique :

La robotique est l'ensemble des techniques permettant la conception et la réalisation des machines automatiques ou de robots. [1]

Le concept de robot mobile autonome est apparu vers la fin des années soixante, de deux sources totalement différentes : tout d'abord des recherches menées au *Stanford Research Institute* sur les possibilités d'équiper des machines de capacités de déduction et de réaction logique à des événements extérieurs. On a ainsi construit *Shakey*, machine à roues reliée à un ordinateur et équipée d'une caméra lui permettant d'acquérir des images de son environnement. Elle évolue dans un univers de cubes et de pyramides de tailles et de couleurs différentes. *Shakey* a pour mission de prendre un objet et de le porter ailleurs, quel que soit sa position ; chaque mission dure près de cinquante minutes.

D'autre part, l'industrie nucléaire a besoin des machines permettant d'agir à distance dans des environnements encombrés et inaccessibles à l'homme. L'entreprise américaine *Général Electric* développe alors un quadrupède pour essayer de résoudre ce problème, tandis que les projets *Luna* et *Mars Rover* s'échafaudent dans le but d'explorer des planètes sans que l'homme ne prenne part au voyage.

Pendant plusieurs années, laboratoires, industriels, informaticiens et mécaniciens vont continuer leurs travaux en parallèle. On accède ainsi côté industriel à la télé-opération et à une partie de la robotique classique, tandis que du côté informatique, on assiste à de grands progrès dans le domaine de l'intelligence artificielle. Ainsi, vers la fin des années soixante-dix, trois pôles géographiques principaux se distinguent (France, Japon, États-Unis). La synthèse de tous les travaux réalisés jusqu'alors donne enfin naissance aux robots mobiles autonomes (du robot domestique au robot militaire). [2]

I.3. Définition d'un robot :

Un robot est un système alimenté en énergie qui évolue dans un environnement statique ou dynamique, il est formé d'un microcontrôleur ainsi que d'un ou plusieurs capteurs et actionneurs.

Un robot fonctionne par l'exécution continue d'un programme informatique constitué d'algorithmes. Ce programme est écrit dans un langage de programmation dont la nature est choisie par le constructeur. [3]

I.4. Différentes types:

I.4.1. Robots humanoïdes et R H de HONDA :

Un robot humanoïde ou androïde est un robot dont l'apparence générale rappelle celle d'un corps humain. Généralement, les robots humanoïdes ont un torse avec une tête, deux bras et deux jambes, bien que certains modèles ne représentent qu'une partie du corps, par exemple à partir de la taille. Certains robots humanoïdes peuvent avoir un « visage », avec des « yeux » et une « bouche » [3]

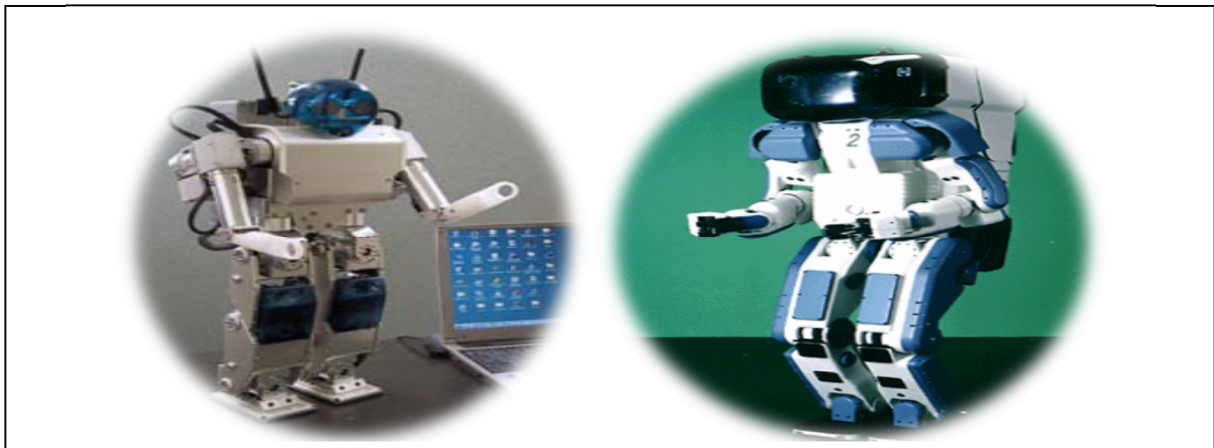


Fig I.1: Robots Humanoïdes

I.4.2. Bras robots manipulateurs:

Robots ancrés physiquement à leur place de travail et généralement mis en place pour réaliser une tâche précise ou répétitive.

Un bras manipulateur est le bras d'un robot généralement programmable, avec des fonctions similaires à un bras humain. Les liens de ce manipulateur sont reliés par des axes permettant, soit du mouvement de rotation (comme dans un robot articulé) ou de translation (linéaire) de déplacement.

Il peut être autonome ou contrôlé manuellement et peut être utilisé pour effectuer une variété de tâches avec une grande précision.

Les bras manipulateurs peuvent être fixes ou mobiles (c'est-à-dire à roues) et peuvent être conçus pour des applications industrielles. [4]



Fig I.2: Bras robots manipulateurs

I.4.3. Robot bipède :

Nous allons voir quels sont les intérêts de la marche pour un robot, les contraintes et les solutions apportées. Concrètement arrive-t-on à faire marcher des robots aujourd'hui ?

De nombreux laboratoires travaillent sur le sujet et notamment le "Leg Laboratory" du MIT. Cependant, aujourd'hui, la marche est loin d'être maîtrisée, On arrive à faire danser, descendre ou monter des marches mais un manque d'aisance évident existe encore chez les robots qu'ils soient bipèdes ou quadrupèdes.

L'intérêt de réaliser un robot marcheur permet à celui-ci de se mouvoir sur une plus grande variété de terrains que ne le permet un robot rouleur par exemple. Le sol ainsi peut-être irrégulier voir parsemé de petits obstacles. Donc le but final serait de pouvoir utiliser le robot dans tout en droit initialement accessible par l'Homme.

Certaines problèmes néanmoins se posent pour l'implémentation de la marche. Notamment le problème évident de l'équilibre. La gestion du centre de gravité du robot devient alors primordiale. Deux solutions peuvent être proposées afin de résoudre ce problème:

-Avoir un centre de gravité bas.

-Un corps large qui permet de maintenir la stabilité plus facilement. [3]

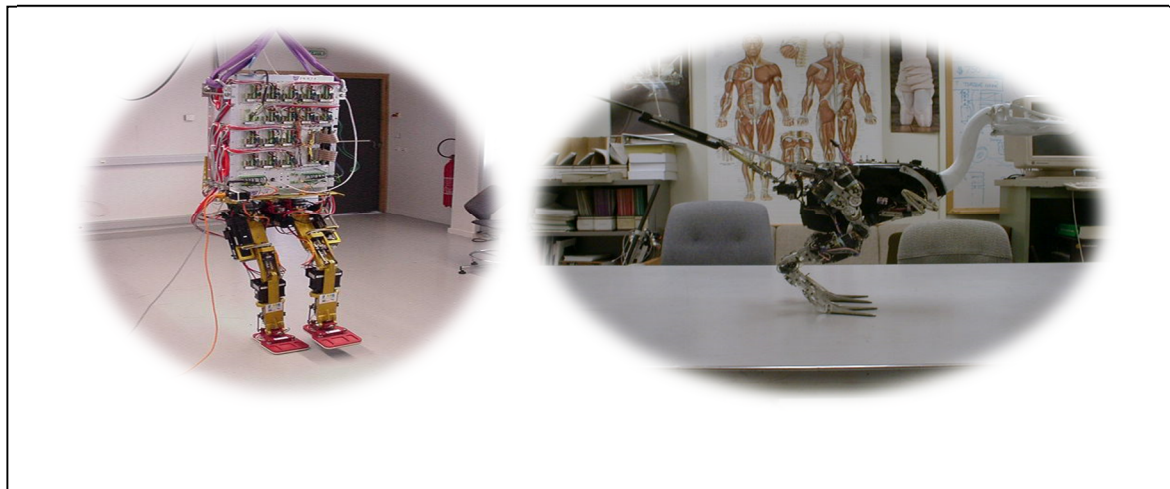


Fig I.3:Robot bipède

I.4.4.Robot de service :

Il existe sur la marche différente plate-forme dans cette catégorie. Les applications principales sont des aspirateurs ou des tondeuses µa gazon. Leur fonction principale est de couvrir une surface de travail, de dimension variable, de manière autonome. Le robot Roomba, le premier et jusqu'à présent le seul succès commercial de robots de service à domicile (vendu à plus de 2 millions d'exemplaires partout dans le monde) résume bien les caractéristiques de fonctionnement de ce type de robot. [5]

Roomba : ce robot aspirateur pour les domiciles, illustre couvre de manière autonome une surface qui peut être de dimension variable. Il est aussi possible de le commander à l'aide d'une télécommande. Les nouvelles versions du robot permettent de programmer à l'avance le démarrage de la tâche de nettoyage. L'alimentation du robot est basée sur une batterie NiMH de 12 V, ce qui donne une autonomie de 2 heures en mode de fonctionnement normal. Roomba est en mesure de se recharger de manière autonome en autant que sa station de recharge se retrouve dans les limites de la surface de travail. Ces capacités de navigation autonomes sont limitées à se promener de manière aléatoire à l'intérieur de la surface de travail. Il mesure 350 mm de diamètre, 100 mm de haut et il a un poids de 3 kg. Une caractéristique intéressante de ce système est qu'il utilise des capteurs infrarouges pour détecter la présence d'un escalier.

Fonctionnant de manière autonome sur tous types de sol. Grâce à ses capteurs, il évite les escaliers, et retourne à sa base pour se recharger sans assistance.

Il est possible de délimiter une surface précise à nettoyer avec les accessoires fournis.

Ce type de robot est commercialisé entre 300€et 2000€ [5]



Fig I.4:Aspirateur automatique Roomba (i Robot)

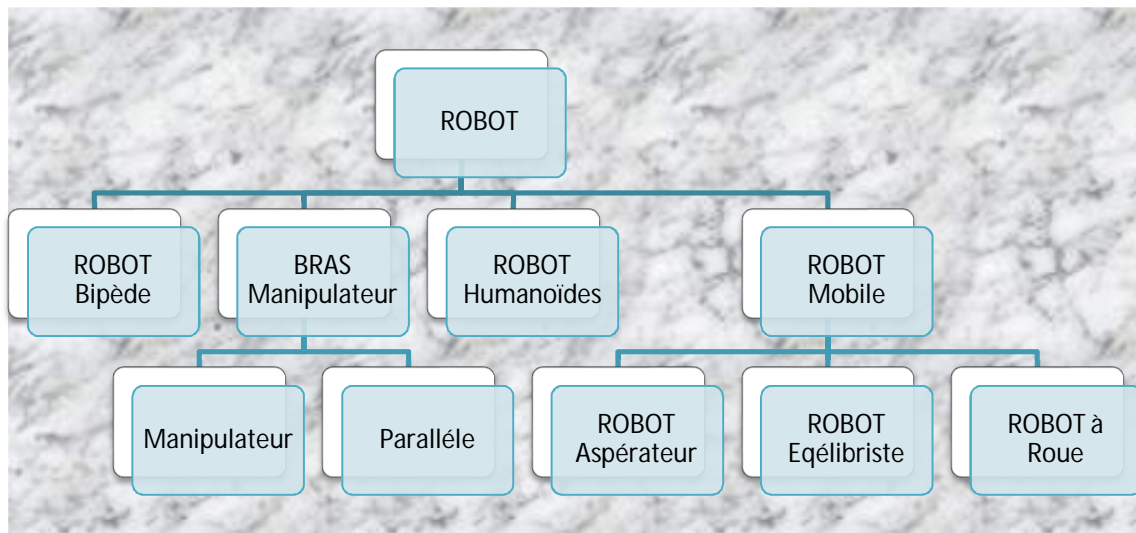


Fig I.1:Différents types de Robot

I.5.Application :

Les diverses applications des robots mobiles : [2]

Industrie nucléaire :	<ul style="list-style-type: none"> - surveillance de sites - manipulation de matériaux radioactifs - démantèlement de centrales
Militaire :	<ul style="list-style-type: none"> - surveillance, patrouille - pose d'explosifs - manipulation de munitions
Chimique :	<ul style="list-style-type: none"> - surveillance de site - manipulation de matériaux toxiques
Médecine :	<ul style="list-style-type: none"> - assistance d'urgence

	- aide aux handicapés physiques, aux aveugles
Lutte contre l'incendie :	- localisation d'une source d'incendie - détection de fumée - suppression de flammes
Sous-marine:	- pose de câbles - recherche de nodules - recherche de navires immergés - inspection des fonds marins
Agricole :	- cueillette de fruits - traite, moisson, traitement des vignes...
Construction BTP :	- projection mortier - lissage du béton
Nettoyage:	- coque de navire - nettoyage industriel
Espace:	- exploration
Industriel :	- convoyage - surveillance

TAB I.1 : Les diverses applications des robots mobiles

I.6. Présentation générale des robots mobiles:

Robots mobiles : robots capables de se déplacer dans un environnement. Ils sont équipés ou non de manipulateurs suivant leur utilisation.

L'aspect particulier de la mobilité impose une complexité technologique et méthodologique qui s'ajoute en général aux problèmes rencontrés par les robots manipulateurs. La résolution de ces problèmes passe par l'emploi de toutes les ressources disponibles tant au niveau technologique (capteurs, motricité, énergie) qu'à celui du traitement des informations par l'utilisation des techniques de l'intelligence artificielle ou de processeurs particuliers (vectoriel, cellulaires).

L'autonomie du robot mobile est une faculté qui lui permet de s'adapter ou de prendre une décision dans le but de réaliser une tâche malgré un manque d'informations préliminaires ou éventuellement erronées. Dans d'autres cas d'utilisation, comme celui des véhicules

d'exploration de planètes, l'autonomie est un point fondamental puisque la télécommande est alors impossible par le fait de la durée du temps de transmission des informations. [6]

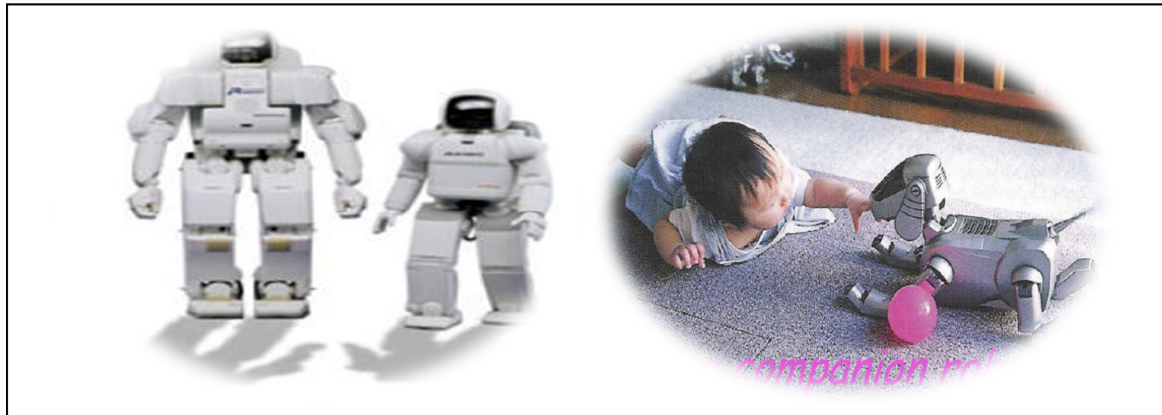


Fig I.6: Robot mobile

I.6.1. Le robot équilibriste:

Un système mécatronique consistant en un pendule inversé mobile a été réalisé dans le but d'expérimenter le système de commande par supervision à travers Internet. Ce système présente plusieurs défis dont le fait que celui-ci est un système instable et requiert donc un correcteur pour le stabiliser en le maintenant en équilibre.

I.6.2. Conception:

Le robot équilibriste conçu est composé d'un microcontrôleur PIC16F877, de deux moteurs à courant continu, de deux puces de pont en H, d'un module d'affichage à cristaux liquides (*Liquid Crystal Display - LCD*), de batteries, de deux régulateurs de tension, d'un gyroscope, d'un accéléromètre, d'encodeurs optiques et d'une puce de communication sans fil. [7]

I.6.2.1. Un pendule inverse:

Quand on pense d'un pendule que nous pensons d'une boule à l'extrémité d'un fil suspendu à un point de pivot, ainsi un pendule inversé est exactement le contraire. Un pendule inverse est un pendule simple, cependant la masse est située en l'air. Le pendule présente une position d'équilibre instable que l'on cherche à stabiliser en utilisant un chariot mobile.

Plus simplement, une application du pendule inverse est le jeu qui consiste à faire tenir un balai (la tête de celui-ci étant vers le haut) dans la paume de la main, le plus longtemps possible.

En physique, un pendule inversé présente une position d'équilibre instable s'il est maintenu vertical à 180° , mais cette position est maintenue par un système de contrôle ou par excitation de Kapitza. C'est un problème de physique non-linéaire. [6]

L'étude du pendule inverse a plusieurs intérêts : L'homme est en fait un pendule inverse double dont les deux axes de rotations sont les chevilles et les hanches. Afin de tenir debout,

les articulations travaillent sans cesse, et l'étude de ce modèle est importante pour la construction de prothèses.

Pendule inversé fournit un exemple bon modèle pour un guidage fusée ou un missile, un système d'aéronef pour l'atterrissage automatique, stabilisation des avions dans le flux d'air turbulent, la stabilisation d'une cabine sur un navire, et ainsi de suite. Un robot à deux roues pendule inversé est un robot qui simule le comportement d'un pendule inversé, c'est à dire, nous cherchons à comprendre un robot qui peut auto en équilibre sur deux roues que par la lecture et la compréhension des données fournies et d'agir sur le deux-roues selon.

La robotique utilise le principe du pendule inverse, en particulier dans de nouveaux moyens de transports a 2 roues comme le segway qui permet d'avancer en se penchant en avant comme nous le verrons dans la suite.

I.6.2.2. Présentation du Segway:

L'application du pendule inverse la plus courante est le segway. C'est un moyen de transport à deux roues qui permet le déplacement d'une personne.

Un segway est représenté en figure I.7, L'utilisateur en se penchant en avant accéléré, et lorsqu'il se penche en arrière, le véhicule ralentit. Le segway utilise un système de gyroscope, que nous n'étudierons pas, pour compenser et ne pas faire tomber l'utilisateur. Ce produit est développe depuis maintenant une dizaine d'année et se développe encore de nos jours.

En 2006 iBot était un autre produit qui a développé de Kamen. iBot est un fauteuil roulant électrique mobile. Il monte les escaliers et se tient en équilibre sur deux roues. iBot augmente sa hauteur quand il tient en équilibre sur deux roues. Augmenter la hauteur offre une vision du niveau des yeux pour une personne désactivé pour communiquer avec d'autres personnes.

Figure, illustre les fonctionnalités iBot. [8]



Fig I.7:Segway (gauche) et iBot 4000 (droite)

I.7. Mode de fonctionnement :**Principe de fonctionnement de robot pendule inverse :**

Robot sur deux roues d'équilibrage est un système instable dynamique. Cela signifie que le robot est libre de tomber en avant ou en arrière sans aucunes forces appliquées. Robot est équilibre lorsque son centre de gravité et les roues sont situés sur une ligne verticale imaginaire identique. Sinon, les roues devraient suivre les chutes du robot jusqu'à ce robot lui-même l'équilibre. L'utilisation de deux roues seulement pour robot sur deux roues d'équilibrage de fournir un poids plus léger et plus lisse manœuvre. La figure illustre les fonctions de base du robot équilibrage. [8]



Fig I.7:Les trois cas du pendule inverse balance

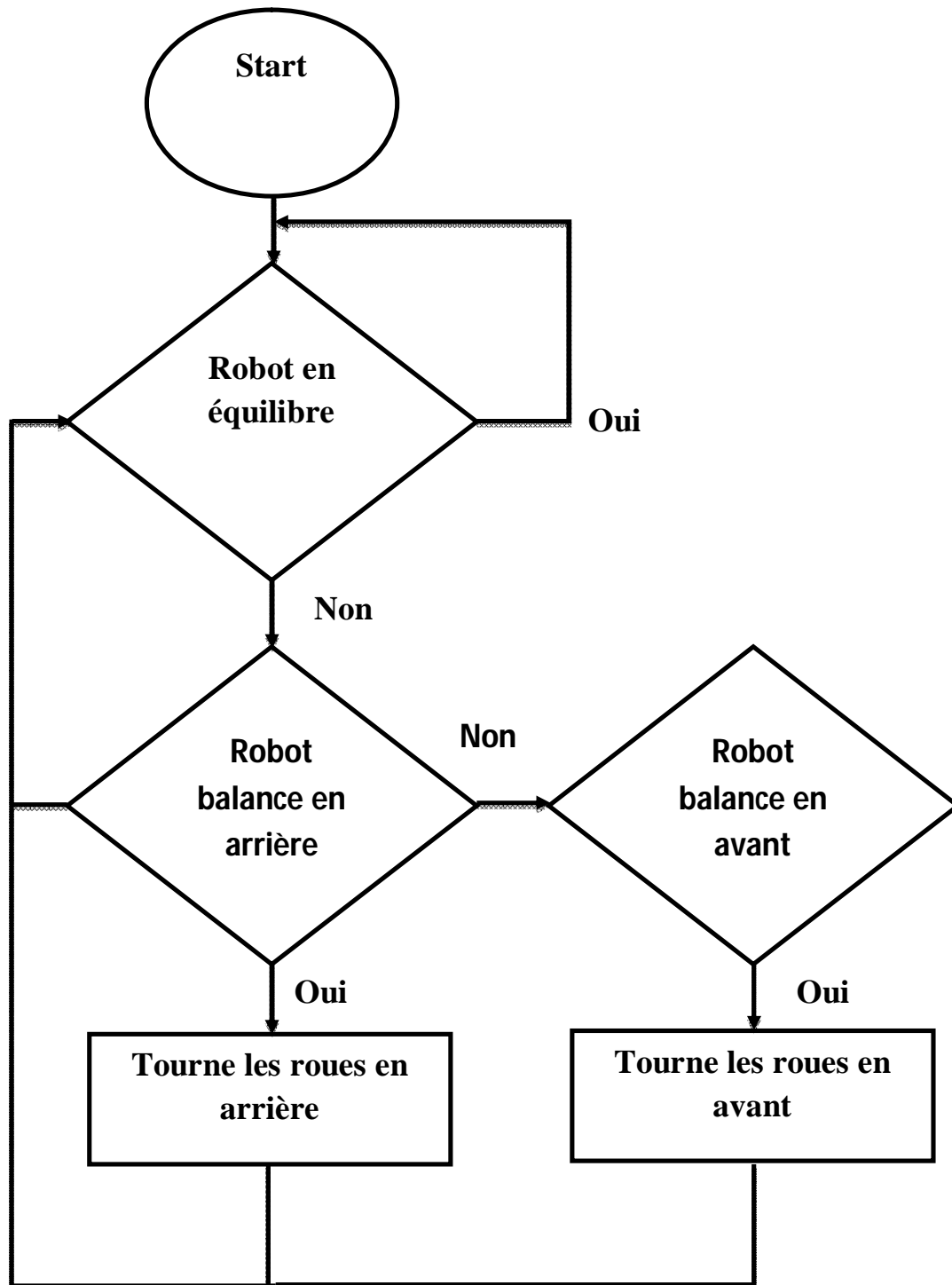


Fig I.2:Diagramme de robot pendule inverse

I.8. Commande des robots équilibristes :

Par le temps, les chercheurs et les universités dans le monde sont développés les techniques du commande des robots équilibristes.

Plusieurs architectures et techniques de contrôle ont été développées sur cette plateforme et un simple contrôleur PD peut lui fournir une stabilité suffisante [9].

Un grand nombre de travaux de recherche ont été effectués sur le développement de techniques de commande sur les robots équilibristes. Nous présentons ici des techniques utilisées :

- a. **Commande utilisant le théorème de Lyapunov** : Cette technique de commande a permis de démontrer que le Robots équilibristes est asymptotiquement stable sous certaines conditions ([10], [11], [12]).
- b. **Commande Adaptative (le contrôleur PID)** : cette commande classique n'a aucune exigence sur les paramètres du modèle commandé et elle est très simple à mettre en œuvre [13], [14].
- c. **La commande Optimale** : Commande linéaire quadratique (LQ) et Commande linéaire quadratique Gaussienne (LQG). Cette loi de commande a donné de bons résultats dans la stabilisation d'attitude du Robots équilibristes dans les travaux de S. Bou Abdallah et André Noth. Ces résultats ont été comparés avec ceux obtenus par le contrôleur PID [13].
- d. **Commande Robuste** : Commande par mode glissant et commande Backstepping. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec ces deux techniques de commande non linéaire, la convergence des états internes des robots équilibristes a été garantie quel que soit les états initiaux. Cette technique de commande a été renforcée par la suite dans les travaux de [10] par l'ajout de l'action intégrale.

D'autres techniques de commande ont été implémentées pour la commande des robots équilibristes parmi lesquelles on peut citer : Feedback Linéarisation, la logique floue, les réseaux de neurones [15], et aussi des méthodes d'hybridation entre deux commandes, et l'apprentissage par renforcement dans la stabilisation et la navigation du robots équilibristes [14].

I.9. Conclusion :

Dans l'étude précédente, nous avons présenté l'état de l'art des robots mobiles en générale, Puis nous avons cité les principales classifications ainsi que les applications et leur différent type, et le principe de fonctionnement du robot équilibriste qui basée sur le principe d'un pendule inversé, Enfin, Nous avons pu constater la grande diversité des techniques de commande existantes dans le domaine des robots équilibriste. Nous allons maintenant permettre de définir une équation générale du mouvement du robot équilibriste qui font l'objet du chapitre suivant.

Chapitre II :

Modélisation mathématique

II.1. Introduction :

Afin de pouvoir concevoir un correcteur capable de stabiliser le robot et lui faire pour suivre une trajectoire, il est nécessaire dans un premier temps de mettre au point un modèle mathématique qui représente fidèlement son comportement. La dynamique du robot sera représentée par deux modèles découplés, le premier décrivant la dynamique d'inclinaison et de déplacement linéaire, et le deuxième décrivant la dynamique d'angle de direction. La dynamique globale du robot a été découplée afin de pouvoir concevoir deux contrôleurs déferentes ; un contrôleur classique et l'autre avance et dans chaque contrôleur deux parties séparément ; le premier pour l'angle d'inclinaison et le déplacement linéaire et le deuxième pour l'angle de direction. De cette façon, il est possible d'assigner différentes performances aux deux sous-systèmes et éviter un couplage des dynamiques par le contrôleur.

Les valeurs des paramètres du moteur et de la boîte de réduction ont été obtenues à partir de leurs fiches techniques tandis que les valeurs des moments d'inertie du robot ont été estimées à partir du modèle de conception mécanique assisté par ordinateur dans le logiciel Catia et les poids des différentes composantes ont été obtenus en les pesants avec une balance électronique. Toutes les valeurs des paramètres sont présentées au TAB. II.1.

Pour le développement du modèle mathématique représentant la dynamique du robot, certaines hypothèses doivent être faites. De façon générale, on considère que le robot semaintient autour de la position verticale, que ses roues restent en contact avec le sol en tout temps et qu'il se déplace à basse vitesse. Les forces de réactions entre le corps du robot et les roues ainsi que la force centrifuge due au mouvement d'inclinaison du robot sont également négligées. On considère que les moteurs appliquent des couples aux roues et sur le corps du robot simultanément et que les roues appliquent à leur tour des forces sur le sol provoquant une accélération linéaire du robot ainsi qu'une accélération angulaire autour de l'axe vertical faisant varier l'angle d'orientation du robot. Ces hypothèses sont prises afin d'obtenir un modèle linéaire, bien qu'approximatif, relativement simple représentant bien la dynamique du système autour de la position d'équilibre. Le contrôleur conçu à la chapitre III devra être suffisamment robuste afin d'assurer la stabilité du système malgré le fait que le modèle n'est qu'une approximation de la dynamique véritable du système.

Si les effets des forces de réactions entre le corps du robot et les roues ainsi que la force centrifuge du eau mouvement d'inclinaison du robot étaient prises en considération lors du développement du modèle mathématique représentant la dynamique du robot, on sera

trouverait avec un modèle plus complexe et contenant plus de termes non-linéaires devant être linéarisés[16]. On va extraire par la modèle mathématique l'espace d'état et aussi la fonction de transfert. Cette approche a été utilisée par MATHIEU LOZEAU.

Symbole	Valeur (Unité)	Description
Rw	4.575 (cm)	rayon des roues
M	1.076 (kg)	masse de la moitié robot, y compris une roue
Mb	1.054 (kg)	masse de la moitié du corps du robot
Mw	0.022 (kg)	masse de l'une des roues
Jb	43.47 (kg*cm ²)	moment d'inertie de la moitié du corps du robot
Jd	108.21 (kg*cm ²)	moment d'inertie du robot autour de l'axe Z
Jw	0.04269 (kg*cm ²)	moment d'inertie de l'une des roues
D	6.19252 (cm)	distance entre l'arbre du moteur et le centre de gravité
S	22.9 (cm)	distance entre les roues
Kt	0.0552 (N*m/A)	constante de couple des moteurs
Ke	0.0552 (V*s/rad)	constante de force électromotrice des moteurs
Ra	41.5 (Ω)	résistance d'armature des moteurs
Rg	6 (N/A)	rapport de la boîte de réduction
N	0.8	efficacité de la boîte de réduction
Cf	0.001 (N*m*s/rad)	constante de friction

TAB II.1 : Paramètres du système

II.2. Le modèle mathématique de robot pendule inverse et leur système dynamique :

Il est important de comprendre la dynamique de robot pendule inverse pour faire la modélisation.

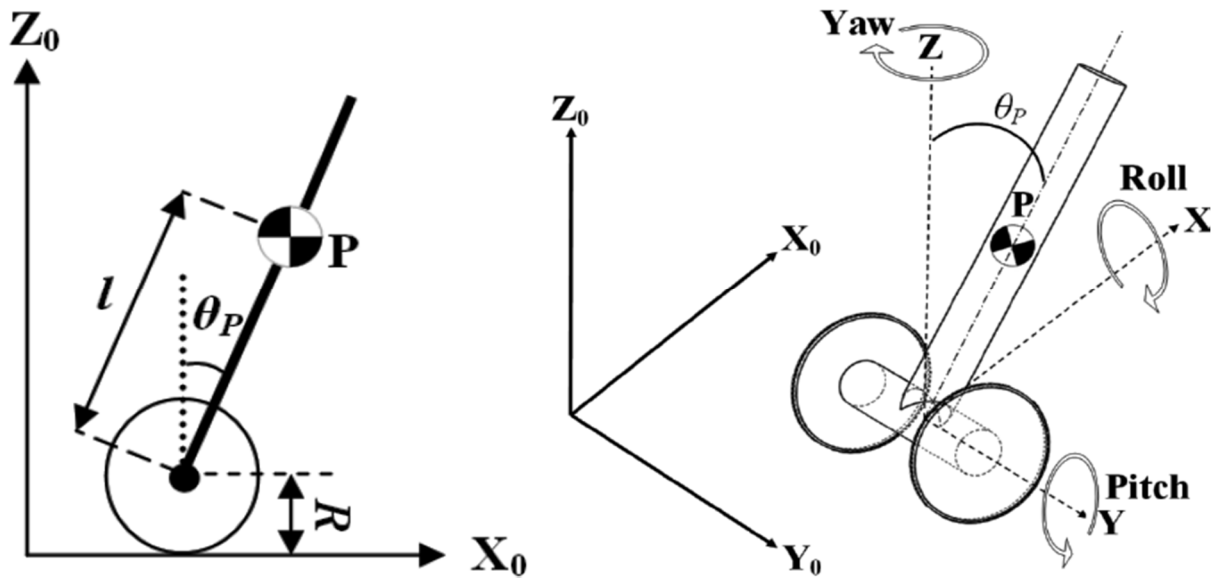


Fig II.1 : Modèle dynamique du robot pendule inverse

Le robot pendule inverse a trois degrés de liberté. Les degrés de liberté sont décrits par trois types de rotation du robot autour des axes X, Y et Z, qui sont appelés roulement, tangage et lacet, respectivement. Dans ce projet, l'accent était mis sur la rotation autour de l'axe Y (hauteur), il suppose que le centre de gravité du robot est situé au point P et θ_P représente l'angle de tangage de la coordonnée du point P. Cet angle changera si le robot s'éloigne de son emplacement initial le long de l'axe X_0 [17].

II.3. Inclinaison et déplacement linéaire :

Tout d'abord, un modèle pour la dynamique d'inclinaison et de déplacement linéaire est mis au point en faisant l'hypothèse que le robot se déplace en ligne droite. En tenant compte de la symétrie du robot par rapport à l'axe vertical, il est possible de ne considérer que la moitié du robot avec un seul moteur, en notant que des couples de valeurs égales doivent être appliqués par chacun des deux moteurs afin de provoquer un déplacement purement linéaire du robot. Par conséquent, la même tension doit être fournie aux deux moteurs et cette tension $u_x(t)$ sera considérée comme l'entrée de ce sous-système. En se référant aux variables et paramètres définis dans la liste des notations et des symboles, on peut faire les observations suivantes :

- la masse de la moitié du robot M consiste en la somme de la moitié de la masse du corps M_b et de la masse d'une roue M_w :

$$M = M_b + M_w$$

– la constante de couple K_t et la constante de la force électromotrice K_e sont équivalentes dans le système d'unités international

– la position linéaire du robot $x(t)$ peut être obtenue à partir du déplacement angulaire d'une roue $\theta(t)$ et le rayon d'une roue R_w de cette façon :

$$x(t) = R_w \theta(t) \quad (II.1)$$

– le déplacement angulaire de l'arbre du moteur $\theta_i(t)$ est relié au déplacement angulaire de l'arbre de la boîte de réduction $\theta_0(t)$ par le facteur de réduction R_g de la boîte de réduction de la façon suivante :

$$\theta_i(t) = R_g \theta_0(t) \quad (II.2)$$

– le déplacement angulaire de l'arbre de la boîte de réduction $\theta_0(t)$ est constitué du déplacement angulaire de la roue $\theta(t)$ et de l'inclinaison du robot $\psi(t)$:

$$\theta_0(t) = \theta(t) + \psi(t) \quad (II.3)$$

– la force de friction $F(t)$ entre la roue et le sol est responsable d'engendrer une accélération linéaire du robot :

$$F(t) = M\ddot{x}(t) \quad (II.4)$$

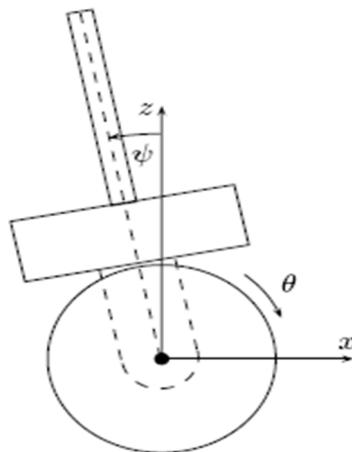


Fig II.2 : Inclinaison et déplacement linéaire du robot

II.3.1. Modèle linéaire d'un moteur à courant continu :

Le robot est alimenté par deux moteurs Faulhaber DC. Dans cette section, le modèle espace d'état du moteur à courant continu est dérivée. Ce modèle est ensuite utilisé dans le

modèle dynamique du Robot pour fournir un équilibre entre une relation entre la tension d'entrée aux moteurs et le couple de commande nécessaire pour équilibrer le robot [18].

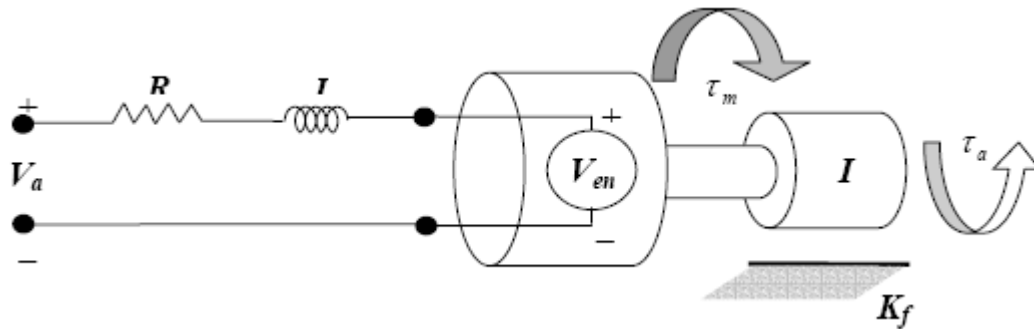


Fig II.3 : Diagramme de moteur a cc

Le couple généré par un moteur est proportionnel à son courant :

$$T_i(t) = K_t i(t) \tag{II.5}$$

En faisant l'hypothèse que l'inductance du moteur est négligeable, il est possible d'exprimer le courant en fonction de la tension d'entrée et la force électromotrice en utilisant la loi d'Ohm :

$$i(t) = \frac{u_x(t)}{R_a} - \frac{K_e \dot{\theta}_1(t)}{R_a} \tag{II.6}$$

On peut maintenant établir la relation entre le couple généré par le moteur et la tension appliquée à son entrée en combinant les équations (II.5) et (II.6) de cette façon :

$$T_i(t) = K_t \left[\frac{u_x(t)}{R_a} - \frac{K_e \dot{\theta}_1(t)}{R_a} \right] \tag{II.7}$$

II.3.2. Couple appliqué à une roue :

La relation exprimant le couple appliqué à une roue par un moteur à travers la boîte de réduction est la suivante :

$$T(t) = \eta R_g T_i(t)$$

En remplaçant $T_i(t)$ par la relation trouvée en (II.7), on obtient la relation suivante :

$$T(t) = \frac{\eta R_g K}{R_a} u_x(t) - \frac{\eta R_g K^2}{R_a} \dot{\theta}_1(t)$$

En utilisant la relation entre $\theta_i(t)$ et $\theta_0(t)$ donnée par l'équation (II.2), on peut exprimer l'équation précédente en fonction de $\theta_0(t)$ de cette façon :

$$T(t) = \frac{\eta R_g K}{R_a} u_x(t) - \frac{\eta R_g^2 K^2}{R_a} \dot{\theta}_0(t)$$

Puis, en considérant la dérivée de l'équation (II.3) par rapport au temps, on obtient :

$$\dot{T}(t) = \frac{\eta R_g K}{R_a} \dot{u}_x(t) - \frac{\eta R_g^2 K^2}{R_a} \ddot{\psi}(t) - \frac{\eta R_g^2 K^2}{R_a} \dot{\chi}(t)$$

Finalement, à partir de l'équation (II.1), on obtient la relation donnant le couple appliqué à une roue $T(t)$ en fonction de la tension à l'entrée d'un moteur $u_x(t)$, de la vitesse de déplacement linéaire du robot $\dot{\chi}(t)$ et de la dérivée par rapport au temps de son angle d'inclinaison $\dot{\psi}(t)$:

$$T(t) = \frac{\eta R_g K}{R_a} u_x(t) - \frac{\eta R_g^2 K^2}{R_a} \dot{\psi}(t) - \frac{\eta R_g^2 K^2}{R_a R_w} \dot{\chi}(t) \quad (II. 8)$$

II.3.3. Dynamique d'inclinaison :

En se référant à la Fig II.4 et en notant que le couple appliqué à une roue est également appliqué à la moitié du corps du robot, on peut faire le bilan des couples agissant sur la moitié du corps du robot comme suit :

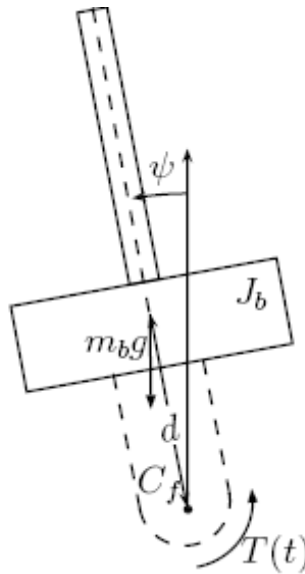


Fig II.4 : Diagramme de corps libre de la dynamique d'inclinaison

$$J_b \ddot{\psi}(t) = M_b G_d \sin(\psi(t)) + T(t) - C_f - C_f \dot{\theta}(t)$$

En remplaçant $T(t)$ par la relation trouvée en (II.8), on obtient la relation suivante :

$$J_b \ddot{\psi}(t) = M_b G_d \sin(\psi(t)) + \frac{\eta R_g K}{R_a} u_x(t) - \frac{\eta R_g^2 K^2}{R_a R_w} \dot{x}(t) - \frac{\eta R_g^2 K^2}{R_a} \dot{\psi}(t) - C_f \dot{\psi}(t) - C_f \frac{\dot{x}(t)}{R_w}$$

Ce qui donne à son tour :

$$\ddot{\psi}(t) = \frac{M_b G_d \sin(\psi(t))}{J_b} - \left[\frac{\eta R_g^2 K^2 + C_f R_a}{R_a J_b} \right] \dot{\psi}(t) - \left[\frac{\eta R_g^2 K^2 + C_f R_a}{R_a R_w J_b} \right] \dot{x}(t) + \frac{\eta R_g K}{R_a J_b} u_x(t)$$

Par contre, cette équation contient le terme non linéaire $\sin(\psi(t))$ et nous devons la linéariser afin de pouvoir utiliser la théorie de la commande des systèmes linéaires. En considérant l'hypothèse que le robot reste autour de la verticale, $\psi(t)$ peut être considéré comme étant petit, et on obtient $\sin(\psi(t)) \approx \psi(t)$, ce qui implique à son tour que :

$$\ddot{\psi}(t) = \left[\frac{\eta R_g K}{R_a J_b} \right] u_x(t) + \frac{M_b G_d}{J_b} \psi - \left[\frac{\eta R_g^2 K^2 + C_f R_a}{R_a J_b} \right] \dot{\psi}(t) - \left[\frac{\eta R_g^2 K^2 + C_f R_a}{R_a R_w J_b} \right] \dot{x}(t) \quad (II.9)$$

II.3.4. Dynamique des roues et du déplacement linéaire :

En se référant à la Fig II.5 on effectue le bilan des couples appliqués à l'une des roues comme suit :

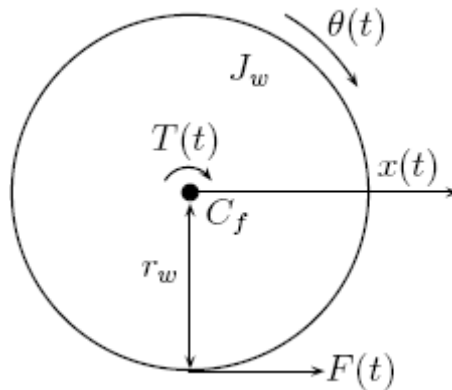


Fig II.5: Diagramme de corps libre d'une roue

$$J_w \ddot{\theta}(t) = T(t) - F(t) R_w - C_f \dot{\theta}(t) - C_f \dot{\psi}(t) \quad (II.10)$$

La force appliquée au sol par une roue $F(t)$, peut être remplacée par une relation équivalente selon l'équation (II.4) :

$$J_w \ddot{\theta}(t) = T(t) - R_w M \ddot{x}(t) - C_f \dot{\theta}(t) - C_f \dot{\psi}(t)$$

En remplaçant $T(t)$ par la relation trouvée en (II.8), on obtient la relation suivante :

$$J_w \ddot{\theta}(t) = \frac{\eta R_g K}{R_a} u_x(t) - \frac{\eta R_g^2 K^2}{R_a} \dot{\psi}(t) - \frac{\eta R_g^2 K^2}{R_a R_w} \dot{x}(t) - R_w M \ddot{x}(t) - \frac{C_f}{R_w} \dot{x}(t) - C_f \dot{\psi}(t)$$

Cette équation peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\left[\frac{J_w}{R_w} + MR_w \right] \ddot{x}(t) = \frac{\eta R_g K}{R_a} u_x(t) - \left[\frac{\eta R_g^2 K^2 + C_f R_a}{R_a} \right] \dot{\psi}(t) - \left[\frac{\eta R_g^2 K^2 + C_f R_a}{R_a R_w} \right] \dot{x}(t)$$

Ce qui donne à son tour :

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) = & \left[\frac{\eta R_w R_g K}{R_a (J_w + MR_w^2)} \right] u_x(t) - \left[\frac{\eta R_w R_g^2 K^2 + C_f R_w R_a}{R_a (J_w + MR_w^2)} \right] \dot{\psi}(t) \\ & - \left[\frac{\eta R_g^2 K^2 + C_f R_a}{R_a (J_w + MR_w^2)} \right] \dot{x}(t) \end{aligned} \quad (II.11)$$

II.3.5. Modèle d'état de la dynamique linéaire

En définissant le vecteur d'état d'entrée $x(t) = [\psi(t) \dot{\psi}(t) \dot{x}(t) \ddot{x}(t)]^T$ et le vecteur de sortie $y(t) = [\psi(t) \dot{x}(t)]^T$, à partir des équations (II.9) et (II.11), on obtient le modèle d'état suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu_x(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (II.12)$$

Ou

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 & A_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & A_{42} & 0 & A_{44} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \\ 0 \\ B_4 \end{bmatrix}$$

$$A_{21} = \frac{M_b G D}{J_b} ; \quad A_{22} = -\frac{\eta R_g^2 K^2 + C_f R_a}{R_a J_b} ; \quad A_{24} = -\frac{\eta R_g^2 K^2 + C_f R_a}{R_a R_w J_b} ;$$

$$A_{42} = -\frac{\eta R_w R_g^2 K^2 + C_f R_w R_a}{R_a (J_w + MR_w^2)} ; \quad A_{44} = \frac{\eta R_g^2 K^2 + C_f R_a}{R_a (J_w + MR_w^2)} ;$$

$$B_2 = \frac{\eta R_g K}{R_a J_b} ; \quad B_4 = \frac{\eta R_w R_g K}{R_a (J_w + MR_w^2)} ;$$

En tenant compte des valeurs des paramètres du système, nous obtenons les matrices nominales suivantes :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 147.2948 & -0.7165 & 0 & -15.660 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -0.0631 & 0 & -1.3803 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1.4687 \\ 0 \\ 0.1295 \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

II.4.Angle de direction :

Le modèle représentant la dynamique de l'angle de direction du robot est établi en prenant en considération le fait que des couples égaux mais opposés doivent être appliqués par les deux moteurs de manière à engendrer un mouvement de rotation pure au robot sans affecter son inclinaison et sa position linéaire. Par conséquent, des tensions égales mais opposées doivent être appliquées aux deux moteurs et l'amplitude de ces tensions

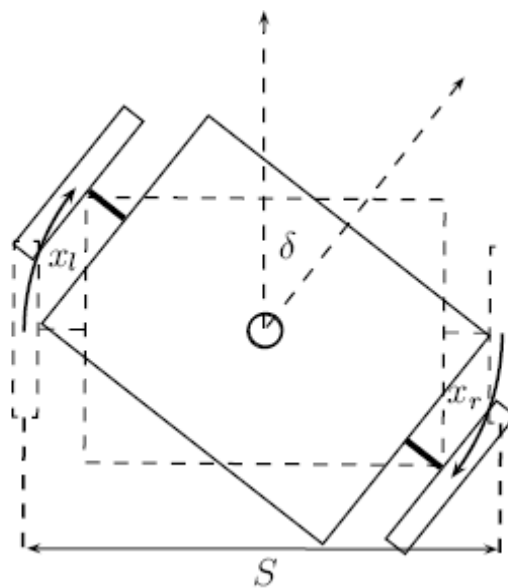


Fig II.6: Déplacements des roues lors d'un changement de direction

\$u_h(t)\$ est considérée comme étant l'entrée de ce sous-système. Ici, l'hypothèse que le robot se trouve dans le voisinage de la position verticale et que par conséquent son moment d'inertie autour de l'axe vertical peut être considéré comme une constante, est prise en considération. En se référant aux variables et aux paramètres définis dans la liste des notations et des symboles, on débute par observer le déplacement des roues produit par un changement d'angle de direction. En se référant à la Fig II.6 on peut voir que les distances parcourues par

les deux roues $x_l(t)$ et $x_r(t)$ lorsque le robot tourne sur lui-même sont reliées à l'angle de direction $\delta(t)$ de la façon suivante :

$$x_l = \delta(t) \frac{S}{2}$$

$$x_r = -\delta(t) \frac{S}{2}$$

À partir de ces deux équations, on peut exprimer l'angle de direction en fonction des déplacements des roues de la façon suivante :

$$\delta(t) = \frac{x_l(t) - x_r(t)}{S} \quad (II.13)$$

Les déplacements des roues sont reliés à leurs déplacements angulaires par les équations suivantes :

$$x_r = R_w \theta_r \quad (II.14)$$

$$x_l = R_w \theta_l \quad (II.15)$$

À partir de la définition des tensions appliquées aux moteurs produisant un mouvement de changement de direction stipulant que celles-ci doivent être égales mais opposées, on peut établir la relation suivante entre la tension appliquée au moteur gauche $u_l(t)$, la tension appliquée au moteur droit $u_r(t)$ et l'entrée $u_h(t)$ du sous-système qui régit la dynamique d'angle de direction : $u_l(t) = -u_r(t) = u_h(t)$

La différence entre les tensions appliquées aux moteurs peut être exprimée de la façon suivante :

$$u_l(t) - u_r(t) = 2u_h(t) \quad (II.16)$$

À partir de l'équation (II.10), on peut exprimer la force $F(t)$ appliquée par une roue sur le sol par la relation suivante :

$$F(t) = \frac{T(t) - J_w \ddot{\theta}(t) - C_f \dot{\theta}(t) - C_f \dot{\psi}(t)}{R_w}$$

Ensuite, à l'aide de l'équation (II.8), on peut exprimer cette dernière équation comme suit :

$$F(t) = \frac{\eta R_g K}{R_a R_w} u(t) - \left[\frac{\eta R_g^2 K^2 + C_f R_a}{R_a R_w} \right] \dot{\psi}(t) - \left[\frac{\eta R_g^2 K^2 + C_f R_a}{R_a R_w^2} \right] \dot{x}(t) - \frac{J_w}{R_w} \ddot{\theta}(t)$$

On peut maintenant exprimer les forces appliquées au sol par chacune des roues par les équations suivantes :

$$F_l(t) = \frac{\eta R_g K}{R_a R_w} u_l(t) - \left[\frac{\eta R_g^2 K^2 + C_f R_a}{R_a R_w} \right] \dot{\psi}(t) - \left[\frac{\eta R_g^2 K^2 + C_f R_a}{R_a R_w^2} \right] \dot{x}_l(t) - \frac{J_w}{R_w} \ddot{\theta}_l(t) \quad (II.17)$$

$$F_r(t) = \frac{\eta R_g K}{R_a R_w} u_r(t) - \left[\frac{\eta R_g^2 K^2 + C_f R_a}{R_a R_w} \right] \dot{\psi}(t) - \left[\frac{\eta R_g^2 K^2 + C_f R_a}{R_a R_w^2} \right] \dot{x}_r(t) - \frac{J_w}{R_w} \ddot{\theta}_r(t) \quad (II.18)$$

En se référant à la Fig.II.7, on effectue le bilan des couples agissant sur le robot autour de l'axe vertical :

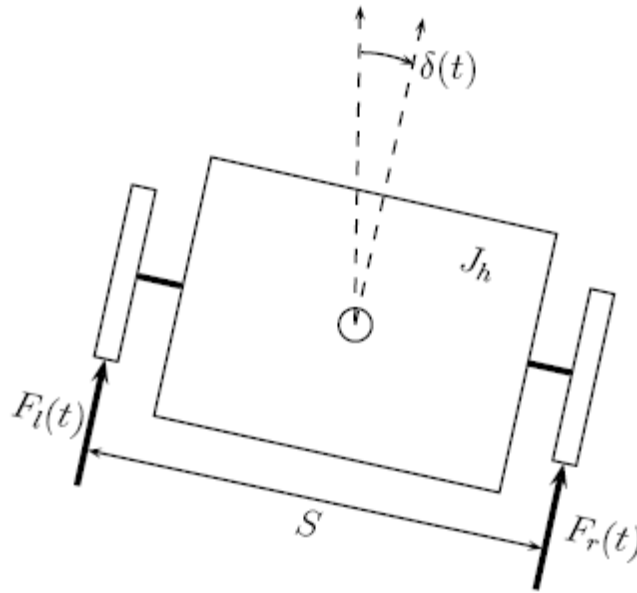


Fig II.7 : Diagramme de corps libre de la dynamique d'angle de direction

$$J_d \ddot{\delta}(t) = [F_l(t) - F_r(t)] \frac{S}{2}$$

En remplaçant $F_l(t)$ et $F_r(t)$ par les expressions trouvées en (II.17) et (II.18), on établit la relation suivante :

$$J_d \ddot{\delta}(t) = \frac{\eta R_g K S}{2 R_a R_w} [u_r(t) - u_r(t)] - \left[\frac{\eta S R_g^2 K^2 + C_f S R_a}{2 R_a R_w^2} \right] [\dot{x}_r(t) - \dot{x}_l(t)] - \frac{S J_w}{2 R_w} [\ddot{\theta}_r(t) - \ddot{\theta}_l(t)]$$

À partir de l'équation (II.16), on peut exprimer cette dernière équation en fonction de l'entrée $u_h(t)$ de la manière suivante :

$$J_d \ddot{\delta}(t) = \frac{\eta R_g K S}{R_a R_w} u_h(t) - \left[\frac{\eta S R_g^2 K^2 + C_f S R_a}{2 R_a R_w^2} \right] [\dot{x}_r(t) - \dot{x}_l(t)] - \frac{S J_w}{2 R_w} [\ddot{\theta}_r(t) - \ddot{\theta}_l(t)]$$

En considérant la dérivée par rapport au temps de l'équation (II.13), on peut exprimer l'équation précédente en termes de la vitesse de changement de direction $\dot{\delta}(t)$ comme suit :

$$J_d \ddot{\delta}(t) = \frac{\eta R_g K S}{R_a R_w} u_h(t) - \left[\frac{\eta S^2 R_g^2 K^2 + C_f S^2 R_a}{2 R_a R_w^2} \right] \dot{\delta} - \frac{S J_w}{2 R_w^2} [\ddot{\theta}_r(t) - \ddot{\theta}_l(t)]$$

Les accélérations angulaires des roues $\ddot{\theta}_r(t)$ et $\ddot{\theta}_l(t)$ peuvent premièrement être exprimées en fonction des accélérations des roues en considérant la dérivée seconde par rapport au temps des équations (II.14) et (II.15) de cette façon :

$$J_d \ddot{\delta}(t) = \frac{\eta R_g K S}{R_a R_w} u_h(t) - \left[\frac{\eta S^2 R_g^2 K^2 + C_f S^2 R_a}{2 R_a R_w^2} \right] \dot{\delta} - \frac{S J_w}{2 R_w^2} [\ddot{x}_r(t) - \ddot{x}_l(t)]$$

Puis, ces accélérations des roues $\ddot{x}_r(t)$ et $\ddot{x}_l(t)$ peuvent être exprimées à leur tour en termes de l'accélération du changement de direction $\ddot{\delta}(t)$ en considérant la dérivée seconde par rapport au temps de l'équation (II.13) de la façon suivante :

$$J_d \ddot{\delta}(t) = \frac{\eta R_g K S}{R_a R_w} u_h(t) - \left[\frac{\eta S^2 R_g^2 K^2 + C_f S^2 R_a}{2 R_a R_w^2} \right] \dot{\delta} - \frac{S J_w}{2 R_w^2} \ddot{\delta}(t)$$

Ce qui donne :

$$\left[J_d + \frac{J_w S^2}{2 R_w^2} \right] \ddot{\delta}(t) = \frac{\eta R_g K S}{R_a R_w} u_h(t) - \left[\frac{\eta S^2 R_g^2 K^2 + C_f S^2 R_a}{2 R_a R_w^2} \right] \dot{\delta}$$

Finalement, on obtient :

$$\ddot{\delta}(t) = \left[\frac{2 \eta R_w R_g K S}{R_a (2 J_d R_w^2 + J_w S^2)} \right] u_h(t) - \left[\frac{\eta S^2 R_g^2 K^2 + C_f S^2 R_a}{R_a (2 J_d R_w^2 + J_w S^2)} \right] \dot{\delta}(t) \quad (II.19)$$

II.4.1. Modèle d'état de la dynamique de direction

En définissant le vecteur d'état d'entrée $x_h(t) = [\delta(t) \dot{\delta}(t)]^T$ et le vecteur de sortie $y_h(t) = \delta(t)$, à partir de l'équation (II.19), on obtient le modèle d'état suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}_h(t) = A_h x(t) + B_h u_h(t) \\ y_h(t) = C_h x_h(t) \end{cases} \quad (\text{II. 20})$$

$$\text{Ou : } A_h = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & A_{h22} \end{bmatrix}; B_h = \begin{bmatrix} 0 \\ B_{h2} \end{bmatrix}; C_h = [1 \quad 0]$$

Avec :

$$A_{h22} = \frac{\eta S^2 R_g^2 K^2 + C_f S^2 R_a}{R_a (2J_d R_w^2 + J_w S^2)}; B_{h2} = \frac{2\eta R_w R_g K S}{R_a (2J_d R_w^2 + J_w S^2)};$$

En tenant compte des valeurs des paramètres du système, nous obtenons les matrices suivantes :

$$A_h = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -3.5880 \end{bmatrix}; B_h = \begin{bmatrix} 0 \\ -2.9388 \end{bmatrix}; C_h = [1 \quad 0]$$

II.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit les mouvements de base du robot équilibriste, nous avons donné un modèle dynamique de notre système. Le modèle présente presque tous les phénomènes physiques agissant sur le robot équilibriste.

Par la suite, nous allons tester et simuler ce modèle en se servant du logiciel MATLAB afin de lui appliquer des commandes de stabilisation (par mode glissant, par mode glissant flou) et voir la réponse de système.

Chapitre III :

Commande par mode glissant d'un robot équilibriste

III.1 Introduction

Dans la formulation de n'importe quel problème de commande, il y a typiquement des anomalies entre le système réel et le modèle mathématique développé pour la conception de contrôle. Cette distinction peut être due à la variation des paramètres de la dynamique du système ou à l'approximation du comportement complexe de système par un modèle. Ceci a mené à un intérêt intense pour l'élaboration des méthodes de contrôle robustes qui cherchent à résoudre ce problème [19].

Les algorithmes de commande classiques par exemple à action proportionnelle intégrale dérivée, peuvent s'avérer suffisants si les exigences sur la précision et les performances du système ne sont pas trop strictes. Néanmoins, dans le cas contraire et particulièrement lorsque la partie commandée est soumise à de fortes non linéarités et à des variations temporelles, il faut concevoir des algorithmes de commande assurant la robustesse du comportement du processus vis-à-vis des incertitudes sur les paramètres et leurs variations. [19], [20]

Ce chapitre est consacré dans un premier aux quelques éléments de la théorie et une présentation générale des concepts de base de la commande par mode glissant (SMC) Son principe et ses propriétés de robustesse ainsi le phénomène "chattering" qui associé à la commande par mode glissant, et présente un inconvénient majeur parce qu'il peut exciter la dynamique de la commutation à haute fréquence qui le rend indésirable. Dans le but de réduire ou d'éliminer ce phénomène, de nombreuses solutions ont été proposées. Dans un seconde temps, on applique la commande par mode glissant à un robot équilibriste (conception par mode glissant).Et enfin, nous présentons les résultats de simulation pour mettre exergue les performances de l'entraînement et des résultats des tests de robustesse.

III.2 Commande par mode Glissants :

Une attention considérable a été concentrée sur la commande du système non linéaire à dynamique incertaine, souvent sujet aux perturbations et aux variations paramétriques. La théorie des systèmes à structure variable et les modes des glissements associés a fait l'objet d'études détaillées au cours des trente dernières années [21] [22].

Des contrôleurs à structure variable ont fait leur application dans la littérature soviétique [19], et ont été largement identifiés comme une approche potentielle à ce problème [23].

Des recherches sur la commande à structure variable ont été données par Decarlo et d'autre (1998), Hung et d'autre (1993), l'action de commande force la trajectoire de systèmes à intercepter l'espace d'état intitulé surface du glissement. Les trajectoires de système sont alors confondues avec la surface de glissement durant l'utilisation des commandes à une grande

vitesse de commutation. L'avantage saillant de la commande à structure variable avec le mode glissant, la propriété de convergence rapide et en temps fini des erreurs, ainsi, que la grande robustesse par rapport aux erreurs de modélisation et certains types de perturbations extérieures [19].

La commande par mode glissant (SMC) est une commande à structure variable pouvant changer de structure et commutant entre deux valeurs suivant une logique de commutation bien spécifique $S(x)$.

Le principe de la commande par modes glissants est de contraindre le système à atteindre une surface donnée appelée surface de glissement et d'y demeurer jusqu'à l'équilibre. Cette commande se fait en deux étapes : la convergence vers la surface et ensuite le glissement le long de celle-ci (Figure III.1). [24]

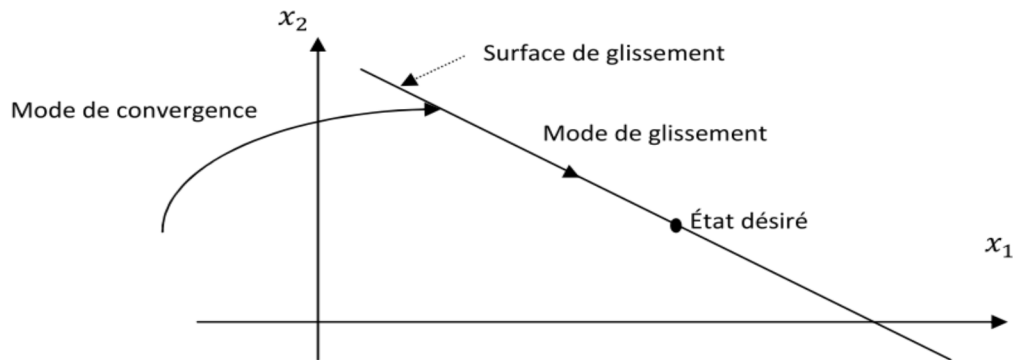


Fig III.1 : différents modes de convergence pour la trajectoire d'état.

III.3 Systèmes à structure variables :

Dans la commande des systèmes à structure variable par mode de glissement, la trajectoire d'état est amenée vers une surface, puis à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est appelée surface de glissement et le mouvement le long de laquelle se produit est appelé mouvement de glissement [25].

La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes [26] :

- Le mode de convergence (MC): c'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase, et tend vers la surface de commutation $S(x, y)=0$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et de critère de convergence.
- Le mode de glissement (MG): c'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $S(x, y)=0$.

- Le mode de régime permanent (MRP): ce mode est ajouté pour l'étude de réponse du système autour de son point d'équilibre (origine de plan de phase), il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande.

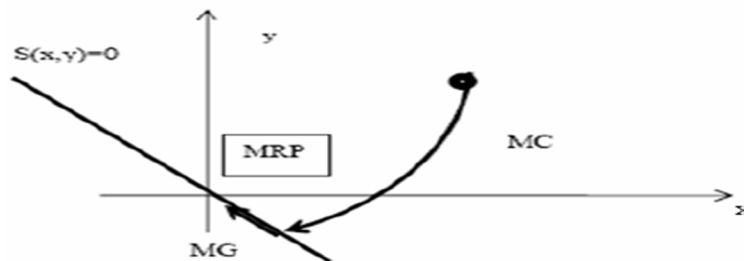


Fig III.2 : Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase

III.4 Synthèse de la loi de commande :

La synthèse de la commande par modes glissants se fait en trois étapes [27], [28], [29] :

- choix de la surface de glissement.
- Établir la condition de convergence.
- déterminer la loi de commande qui permet d'atteindre la surface et d'y demeurer.

III.4.1 Choix de la surface de glissement :

Soit le système décrit par l'équation différentielle suivante : [30], [31]

$$x^n(t) = f(x, t) + g(x, t)u(t) \tag{III.1}$$

Où f et g sont des fonctions non linéaires, g est supposée inversible. u : L'entrée du système.
x:état du système.

Soit x_d la consigne désirée et e l'erreur de poursuite définie par :

$$e = x - x_d \tag{III.2}$$

La formule générale de la surface de glissement est définie en fonction de l'ordre du système

Où n : le degré relatif du système par rapport à la sortie y(t). Il représente le nombre minimum de fois qu'il faut dériver la sortie y(t) par rapport au temps, pour y voir apparaître l'entrée.

Dans le cas du traitement dans l'espace de phase, la fonction de commutation est une fonction scalaire, telle que la variable à régler glisse sur cette surface pour atteindre l'origine du plan de phase. Ainsi, la surface S(x) représente le comportement dynamique désiré du système. Le professeur J. J. Slotine [25] propose une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable vers sa valeur désirée :

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right)^{n-1} e(x) \tag{III.3}$$

Avec : e(x) : L'écart de la variable à régler. $e(x) = x_{ref} - x$.

λ_x : Une constante positive qui interprète la bande passante du contrôle désiré.

n : Degré relatif, égal au nombre de fois qu'il fait dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

Pour $n=1$, $S(x) = e(x)$.

Pour $n=2$, $S(x) = \lambda e(x) + \dot{e}(x)$

Pour $n=3$, $S(x) = \lambda^2 e(x) + 2\lambda_x \dot{e}(x) + \ddot{e}(x)$

$S(x) = 0$: est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x)=0$.

En d'autre terme, la difficulté revient à un problème de poursuite de trajectoire dont l'objectif est de garder $S(x)$ à zéro. Ceci est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart en respectant la condition de convergence. La linéarisation exacte de l'écart a pour but de forcer la dynamique de l'écart (référence – sortie) à être une dynamique d'un système linéaire autonome d'ordre « n ».

III.4.2 condition d'existence du mode de glissement :

Le choix de la fonction de glissement étant fait, la deuxième étape consiste à concevoir une loi de commande qui puisse amener le vecteur d'état à converger vers la surface et y demeurer $S = 0$. Pour cela, il faut que la loi de commande soit conçue de telle manière à ce que S soit attractif. [30]

Pour déterminer la condition d'attractivité, considérons la fonction de Lyapounov suivante :

$$v(s) = \frac{1}{2} s^2 \quad (\text{III.4})$$

Une condition nécessaire et suffisante, appelée condition d'attractivité, pour qu'une variable de glissement $s(x, t)$ tende vers 0 est que la dérivée temporelle de v soit définie négative :

$$\dot{s} \cdot s < 0 \quad (\text{III.5})$$

Si la condition (III.5) est vérifiée, alors la variable de glissement et sa dérivée sont de signe contraire quel que soit le temps et que 0 est un centre attracteur pour S .

Le temps de convergence, ou le temps d'atteinte « reaching time » t_r dépend directement du choix de S .

Pour une convergence en temps fini, la condition (III.5) qui ne garantit qu'une convergence asymptotique vers la surface de glissement est remplacée par une condition plus restrictive dite de η -attractivité et donnée par : [32]

$$\dot{s} \cdot s \leq \eta |s| \quad , \eta > 0 \quad (\text{III.6})$$

III.4.3 calcul de la commande :

Dans notre cas, la méthode choisie est celle de la commande équivalente, schématisée sur la figure (III.3).

La commande équivalente est une fonction continue qui sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement $\{S= 0\}$. Elle est obtenue grâce aux conditions d'invariance de la surface :

$$\begin{aligned} S &= 0 \\ \dot{S} &= 0 \end{aligned} \tag{III.7}$$

Où u_{eq} est déduite de la relation : $\dot{S} = 0$

Physiquement la commande équivalente présente la valeur moyenne de la commande u .

Cependant, cette commande ne force pas les trajectoires du système à converger vers la surface de glissement. Ainsi, la commande u est la somme de la commande équivalente et d'une composante discontinue, assurant une convergence et un régime glissant. [III.8]

$$u = u_{eq} + u_d \text{ avec } u_d = -\alpha \text{sign}(s) \tag{III.8}$$

$$\text{sign}(s) = \begin{cases} +1 & \text{si } s > 0 \\ 0 & \text{si } s = 0 \\ -1 & \text{si } s < 0 \end{cases}$$

α est une constante positive, sign est la fonction signe et u_d est la commande discontinue

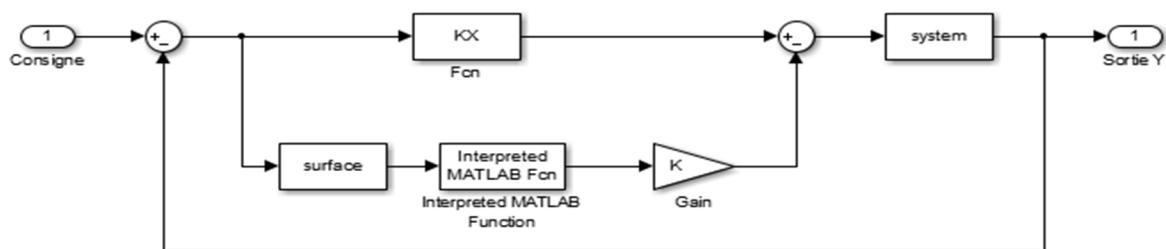


Fig III.3 : Structure de la commande en mode glissant avec commande équivalent.

III.4.3.1. Fonction directe de commutation :

Elle est proposée et étudiée par [33] et [34]. Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro. Elle est donnée par :

$$\dot{S}(x) \cdot S(x) < 0 \tag{III.9}$$

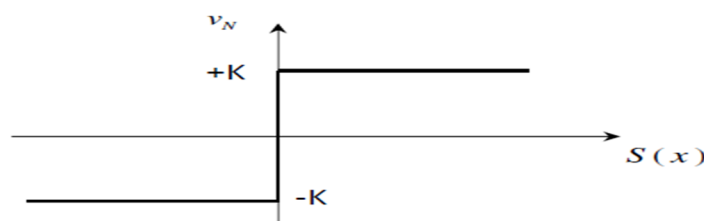


Fig III.4 : Représentation de la fonction « Signe »

Le gain K est choisi positif pour satisfaire la condition (III.9). Le choix de ce gain est très influent car, s'il est très petit le temps de réponse sera très long et s'il est choisi très grand, nous aurons de fortes oscillations au niveau de l'organe de la commande. Ces oscillations peuvent exciter les dynamiques négligées (phénomène de Chattering), ou même détériorer l'organe de commande [30].

III.5 le broutement (chattering) :

Un régime glissant idéal requiert une commande pouvant commuter à une fréquence infinie. Ainsi, durant le régime glissant, les discontinuités appliquées à la commande peuvent entraîner un phénomène de broutement, appelé réticence ou "chattering" en anglais. Celui-ci se caractérise par de fortes oscillations des trajectoires du système autour de la surface de glissement (figure (III.5)). Les principales raisons à l'origine de ce phénomène sont les limitations des actionneurs ou les retards de commutation au niveau de la commande. Ces commutations détériorent la précision de la commande et peuvent s'avérer néfastes pour l'organe de commande en provoquant une détérioration prématurée des systèmes mécaniques et une élévation de température dans les systèmes électriques (perte d'énergie non négligeable). [35]

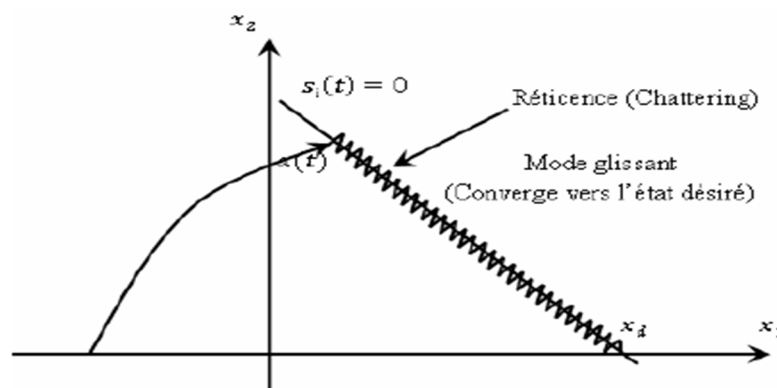


Fig III.5 : Le phénomène de broutement

III.6 Solutions pour atténuer le phénomène de réticence :

Dans le but de réduire ou d'éliminer ce phénomène, de nombreuses solutions ont été proposées,

La présence de la fonction signe dans les expressions des différentes lois de commande est la principale cause du phénomène de chattering.

Pour réduire la fréquence des commutations, on a utilisé les solutions suivantes :

-la solution de couche limite : remplacer la fonction signe par la fonction tangente hyperbolique.

- fuzzy sliding mode. [36]

III.6.1 Solution de couche limite :

Cette solution, connue aussi sous le nom de "boundary layer solution", consiste à remplacer la fonction signe par une fonction de saturation adéquate, de type grand gain qui filtre les hautes fréquences, uniquement dans un voisinage de la surface, Parmi les fonctions utilisées nous citerons la fonction de saturation.

On donne ci-dessous un exemple de fonction de saturation Fig (III.6):

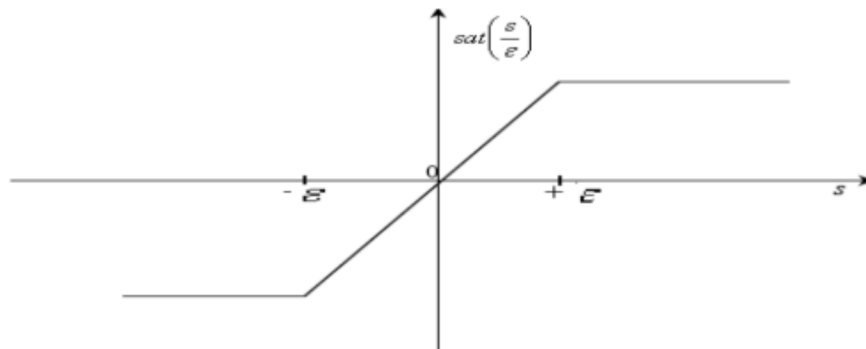


Fig III.6 : Fonction de saturation $Sat(S)$.

$$Sat(S) = \begin{cases} \frac{s}{\epsilon} & Si \frac{s}{\epsilon} \leq 1 \\ Sign(S) & Si \frac{s}{\epsilon} > 1 \end{cases} \quad (III.10)$$

ϵ : Largeur du seuil de la fonction de saturation.

D'autres fonctions existent telles que les fonctions, La fonction tangente hyperbolique $\tanh a$ l'avantage de faire varier la largeur de la bande de commutation en ajoutant un terme supplémentaire, $2\pi \arctan(s/\epsilon) \dots$

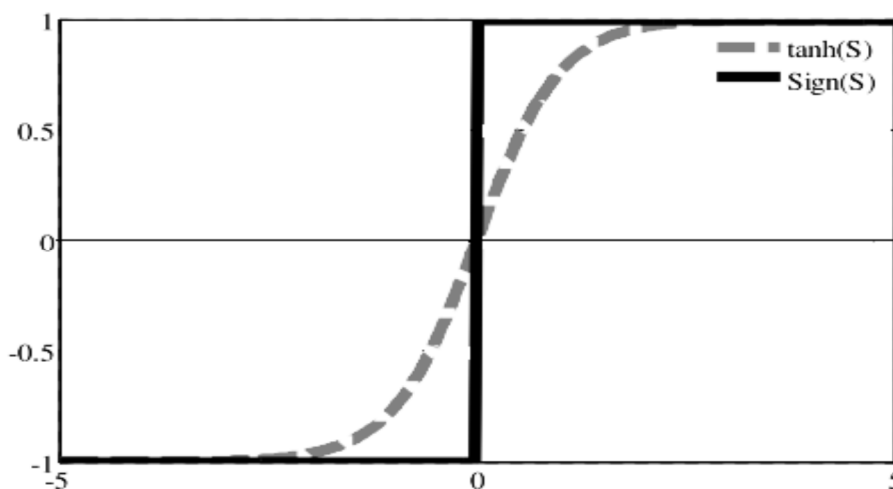


Fig III.7 : Fonction tangente hyperbolique.

Le système ne converge plus vers la valeur désirée, mais vers un voisinage de cette dernière dans ce cas, le système est dit en régime pseudo-glissant. Bien que cela permette d'atténuer le phénomène de réticence, la précision par rapport à l'objectif fixé, la robustesse de la commande et le temps de réponse s'en trouvent dépréciés.

Cette méthode est paramétrée par une constante positive - réglée pour avoir un bon compromis entre réduction du chattering et conservation de la robustesse. Dans les méthodes présentées ici, plus - est petit, plus l'approximation tend vers la fonction signe, et donc meilleure est la robustesse, au détriment de la réduction du chattering. [36]

III.7 Les avantages de la commande par mode glissant :

Cette commande présente les caractéristiques suivantes :

- ✓ La réponse du système est insensible et robuste aux variations de certains paramètres et aux effets troubles de la charge, et perturbations ;
- ✓ Il suffit de connaître une borne pour ν , ce qui simplifie le réglage ;
- ✓ Le choix de la surface de commutation est assez libre ;
- ✓ La commande est adoucie par la présence de la commande équivalente, celle-ci peut être supprimée au prix d'une augmentation de ν . [37]

III.8 Application de la commande sur le robot équilibré :

Dans cette partie nous contenterons d'appliquer la technique de réglage par mode glissant au robot équilibré et nous établirons les expressions de valeur de commande en s'appuyant sur le modèle établi au deuxième chapitre.

III.8.1 Espace d'état :

La modélisation mathématique du robot équilibré est représenté sur deux sous-systèmes :

Le premier sous système, représente l'inclinaison et déplacement linéaire, le deuxième sous-système, représente l'angle de direction.

On veut commander le déplacement du robot 'x' ainsi que sa direction 'delta' en garantissant toujours l'équilibre du robot 'psi=0' :

$$1^{er} \text{ sous - système: } \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \ddot{\psi} \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 147.2948 & -0.7164 & 0 & -15.6609 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -0.0631 & 0 & -1.3803 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1.4687 \\ 0 \\ 0.1295 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix}$$

$$2^{\text{ième}} \text{ sous-système: } \begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \ddot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -3.5880 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2.9388 \end{bmatrix} u \quad y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} \delta \\ \dot{\delta} \end{bmatrix}$$

III.8.2 Commande par mode glissant du robot :

On considère le système linéaire suivant : $\dot{x} = Ax + Bu$

Nous définissons la surface de glissement $s(x)$ suivant :

$$s = S^T \tilde{x} = 0$$

La stabilité sur la surface de glissement est assurée si la condition de glissement est vérifiée ($\dot{s} < 0$), ce qui, avec $\eta > 0$, peut s'écrire :

$$\dot{s} = -\eta \text{sign}(s)$$

Car, $s \dot{s} = -\eta s \text{sign}(s) = -\eta |s|$

En dérivant $s = S^T \tilde{x} = 0$, on fait apparaître que l'on peut remplacer par $Ax + Bu$

On obtient : $\dot{s} = S^T \dot{\tilde{x}} = S^T (Ax + Bu) = -\eta \text{sign}(s)$

De l'équation précédente, on peut extraire u et on obtient la commande à appliquer :

$$u = -(S^T B)^{-1} S^T Ax - (S^T B)^{-1} \eta \text{sign}(s)$$

$$u = u_{eq} + u_{glis}$$

Nous obtenons ainsi les deux composantes, continue et discontinue, de la commande qui sont :

$$u_{eq} = -(S^T B)^{-1} S^T Ax = Kx$$

$$u_{glis} = -(S^T B)^{-1} \eta \text{sign}(s) = \eta K_{glis} \text{sign}(s)$$

Avec,

$$K = -(S^T B)^{-1} S^T A$$

$$K_{glis} = -(S^T B)^{-1}$$

Dynamique du système sur la surface de glissement :

Pour déterminer les paramètres S de la surface de glissement, on conçoit le retour d'état linéaire de telle sorte que le système possède une dynamique donnée sur la surface de glissement. Lorsque le système se trouve sur la surface de glissement, la commande u se résume à la partie linéaire u_{eq} puisque $S(x) = 0$. Le système est donc régi par l'équation suivante :

$$\dot{x} = [A - B(S^T B)^{-1} S^T A]x$$

Ou,

$$K = -(S^T B)^{-1} S^T A$$

$$K_{glis} = -(S^T B)^{-1}$$

On cherche le gain K qui place les valeurs propres de A_c à des valeurs désirées correspondant à une dynamique désirée.

$$\det(\lambda I - A_c) = 0$$

L'une des valeurs propres de la matrice A_c du système bouclé doit être nulle. La matrice A_c étant alors connue, on obtient S en sachant que S est le vecteur propre à droite de A_c^T qui correspond à la valeur propre nulle λ_i

$$A_c^T S = \lambda_i S = 0$$

Les pôles des deux systèmes sont déterminés de façon expérimentale et ils valent :

$$P = [0, -11.8199, -12.5457, -1.3710] \quad P_h = [-0.5, -3.5880]$$

En notant $k = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4]$, $k_h = [k_1 \ k_2]$ les gains du retour d'état.

En développant $\det(\lambda I - A_c) = 0$, on abouti à un système de deux équations (on à une valeur propre nulle) qui permettent de calculer k_1, k_2, k_3 et k_4 :

$$k = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4] = [223.9952 \ 17.9749 \ 0 \ -21.3252]$$

$$k_h = [k_1 \ k_2] = [0.6105 \ 0.1701]$$

Une fois K déterminer ; la matrice A_c est connue. On obtient S de la surface de glissement en résolvant: $A_c^T S$, pour cela on pose $S_1 = 1$ et on résout les systèmes de deux équations pour

obtenir, S_2, S_3 et S_4 . On normalise ensuite les S_i . $S = \begin{bmatrix} 12.14099 \\ 1 \\ 7.01104 \\ -6.26607 \end{bmatrix}$, $S_h = \begin{bmatrix} 4.0880 \\ 1 \end{bmatrix}$

$$U_{gliss} = k_{gliss} \cdot \text{Sign}(S(x))$$

Pour déterminer les k_{glis} : $\text{inv}(S' * B)$, $\text{inv}(S' * B_h)$ ou $k_{glis} = -(\alpha B)^{-1}$

$U = -kx + k_{gliss} \cdot \text{Sign}(S(x))$, Donc la commande par mode glissant :

1^{er}sous – système: $230.99924\psi + 18.54834\dot{\psi} - 4.4721(x - x_d) - 24.93714\dot{x} \quad u = -kx$

$$s(x) = 0.56\psi - 0.68\dot{\psi} - 0.754(x - x_d) - \dot{x} \quad k_{glis} = -1.2$$

2^{ieme}sous – système: $1.4142(\delta - \delta_d) - 0.34534\dot{\delta} \quad u = -kx$

$$s(x) = 4.088(\delta - \delta_d) + 1\dot{\delta} \quad k_{glis} = -0.3403$$

III.8.4 Résultats de simulation sous MATLAB :

III.8.4.1 Résultats de simulation sans perturbation :

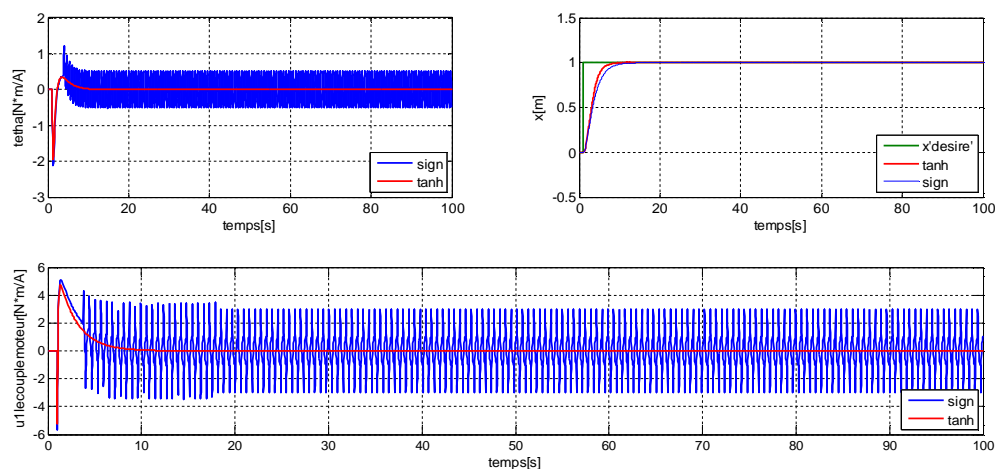


Fig III.9 : L'équilibre du robot.

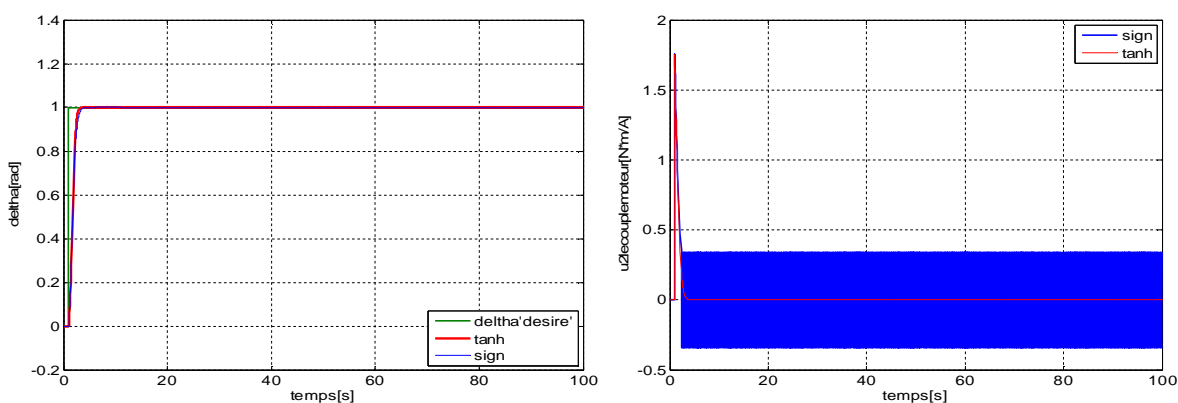


Fig III.10 : Angle de direction du robot

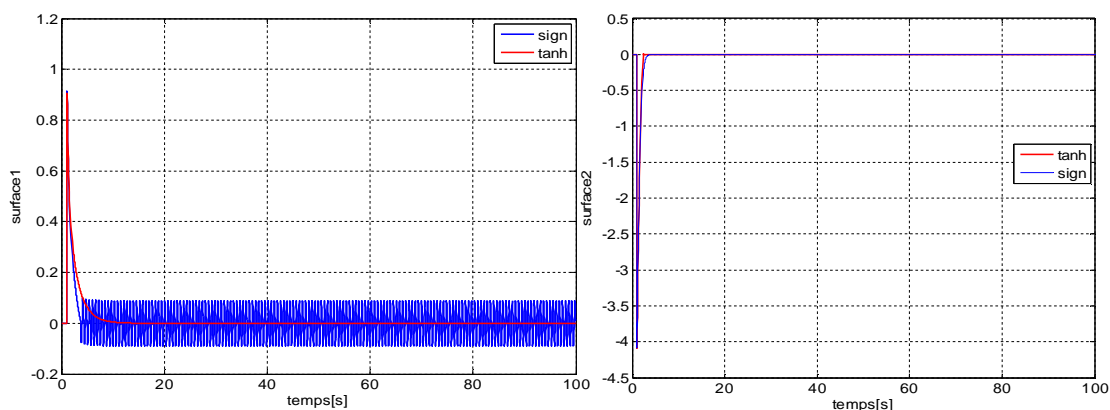


Fig III.11 : surfaces de glissement S1et S2

Les courbes des figures (III.9), (III.10), (III.11) représentent l'équilibre et l'angle de direction du robot et les surfaces de glissement S1 et S2, on remarque que le robot arrive à sa position

d'équilibre stable après quelque secondes de démarrage, le phénomène de chattering est éliminer on remplacons la fonction signe par la fonction tangente hyperbolique deans les graphes d'entrée de système .

III.8.4.2 Resultats de simulation avec une perturbation appliquée sur l'entrée du robot d'une durée de 1s [20s à 21s]:

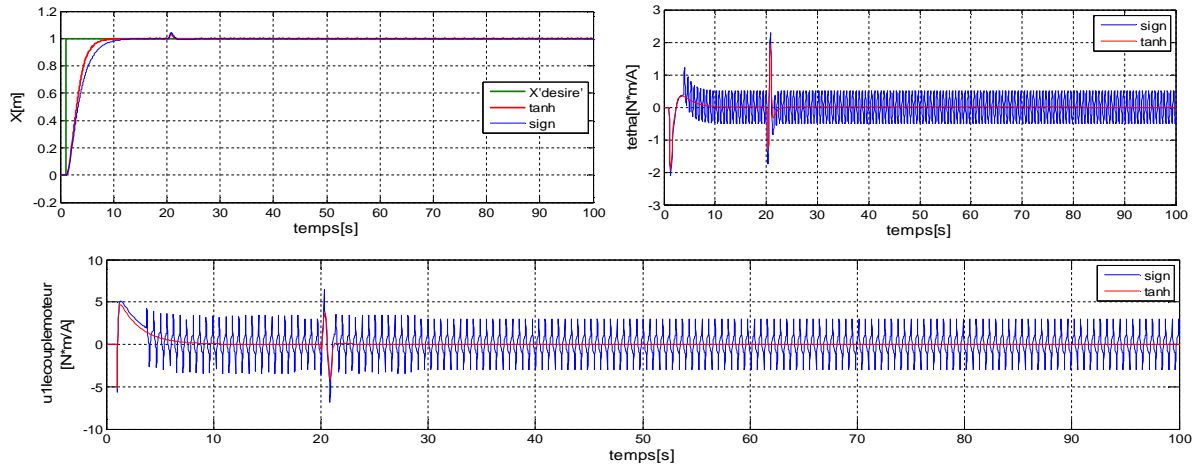


Fig III.12 : L'équilibre du robot.

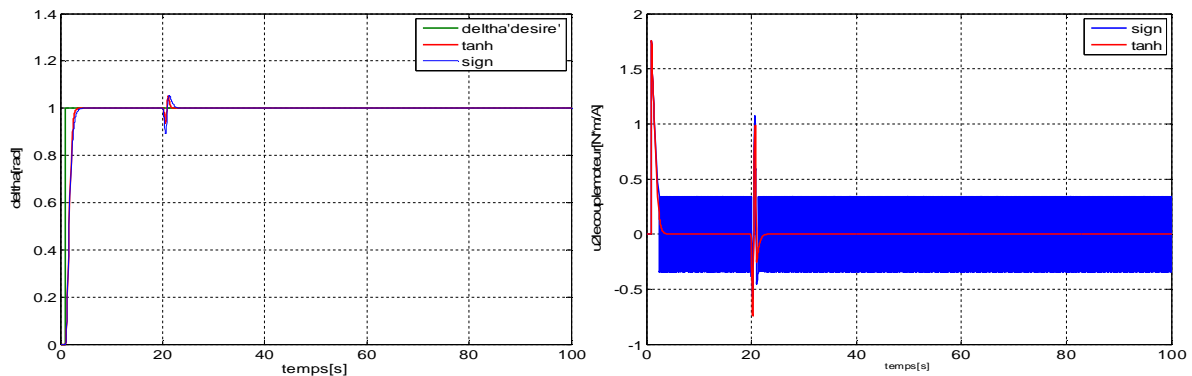


Fig III.13 : direction du robot

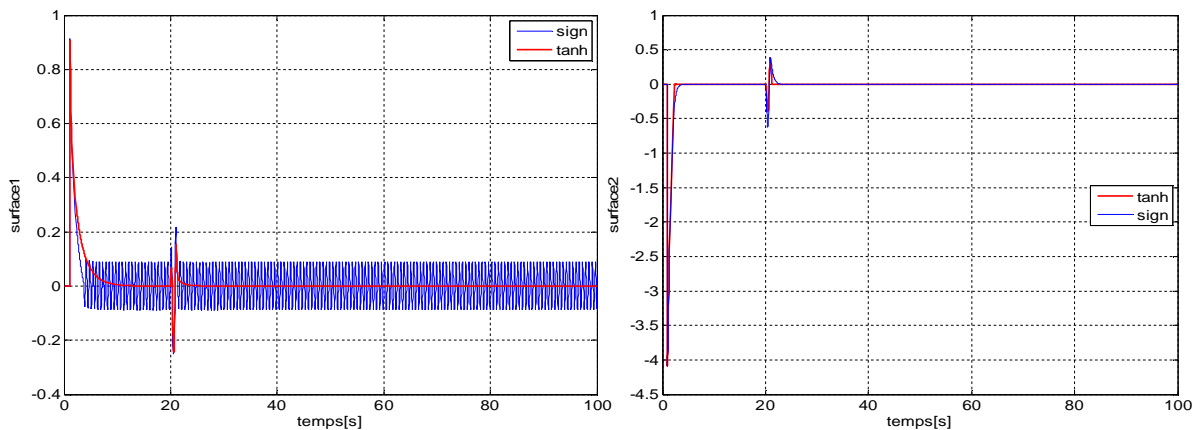


Fig III.14 : surface de glissement S1et S2

Les figures (III.12), (III.13) ,(III.14) le cas d'application d'une perturbation en entrée sur le robot, à l'instant $t=20$ sec jusqu'à l'instant $t=21$ sec, le système répond avec des oscillations très faible et négligable et le déplacement du robot ne dépasse pas 0.2 mètre par rapport à la référence. Le regulateur reagit et corrige cette perturbation et stabilise le système après 4 sec à la disparition de la perturbation, et les surfaces de glissement reste stable, le phénomène de chattering est éliminer on remplacons la fonction signe par la fonction tangante hyberbolique deans les graphes d'entrée de système.

III.8.4.3 Resultats de simulation avec une perturbation appliquée sur la sortie du robot d'une durée de 1s [20sec à 21sec]:

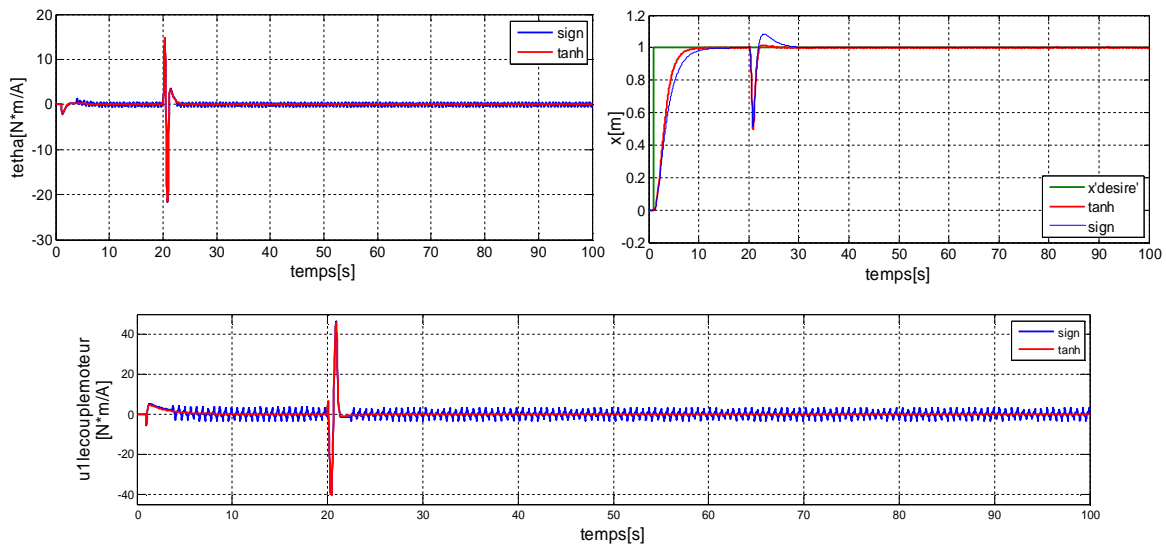


Fig III.15 : L'équilibre de robot.

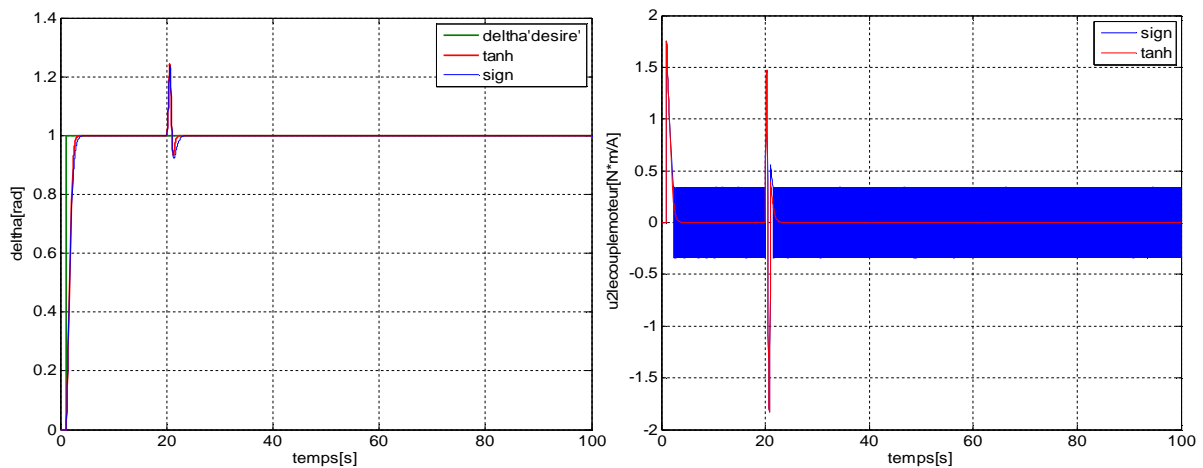


Fig III.16 : direction du robot.

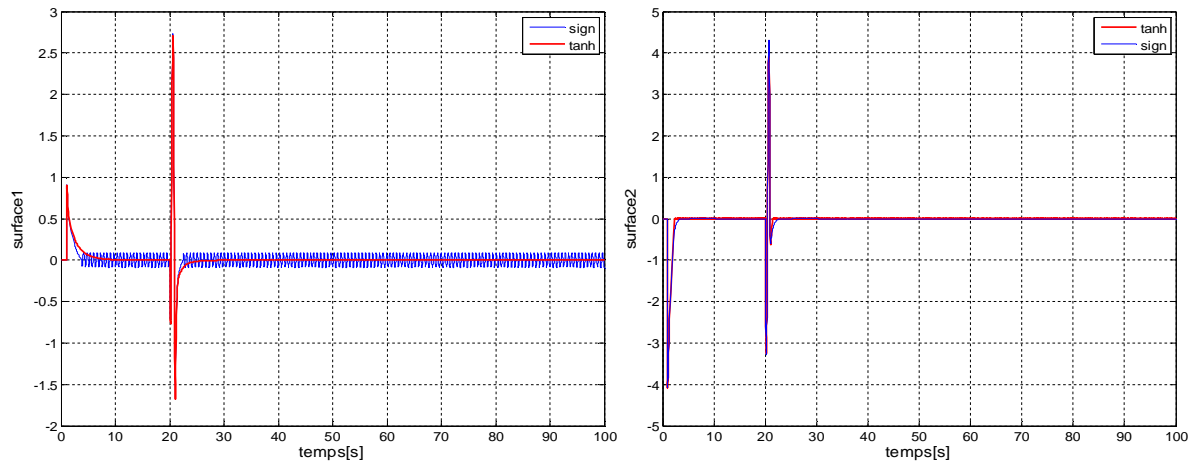


Fig III.17 : surface de glissement S1 et S2

Les figures (III.15), (III.16), (III.17) lorsque nous appliquons une perturbation à la sortie du robot. D'une durée $t=1$ sec, on remarque que le système répond avec des oscillations faibles et le déplacement du robot en le ramenant à sa position initiale avec un déplacement maximal de 0.5 m. Le régulateur réagit et corrige cette perturbation et stabilise le système après 5 sec à la disparition de la perturbation. Le robot est dans les limites physiques de déplacement [0.5m,0.5m], et les surfaces de glissement s'annulent après quelques secondes. Le phénomène de chattering est éliminé on remplace la fonction signe par la fonction tangente hyperbolique dans les graphes de sortie de système.

III.8.4.4 Résultats de simulation avec une perturbation aléatoire (Gaussienne) appliquée sur la sortie du robot:

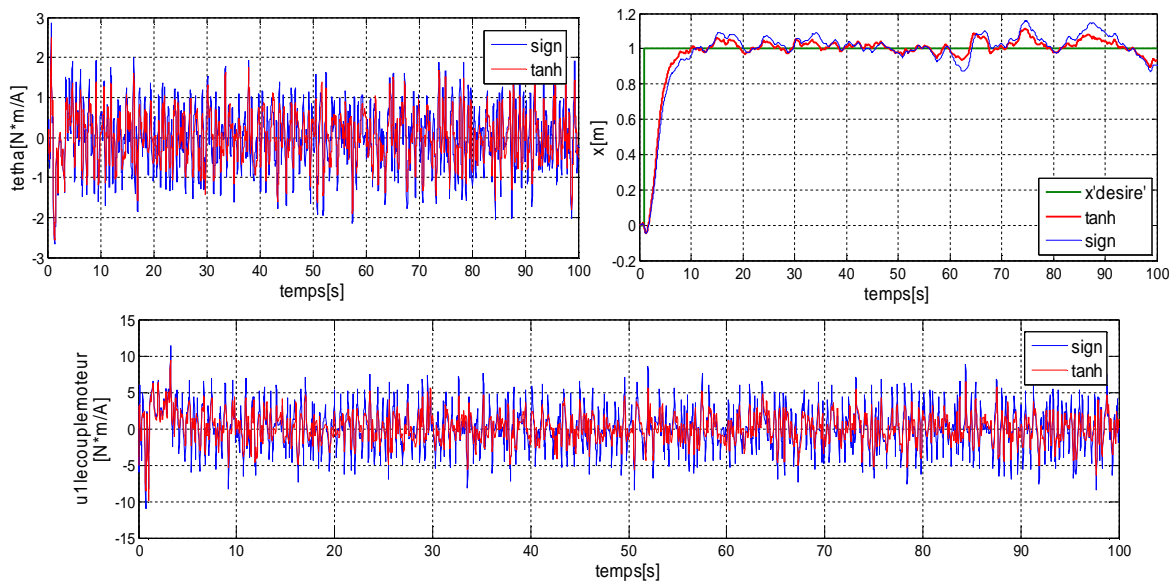


Fig III.18 : L'équilibre du robot x , θ , u_1

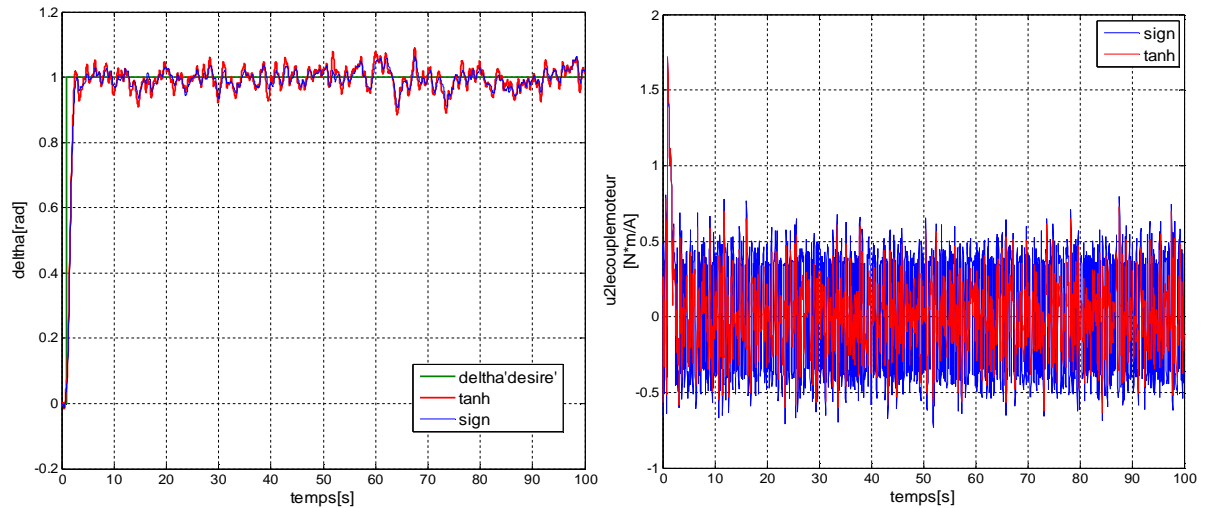


Fig III.19 : direction du robot

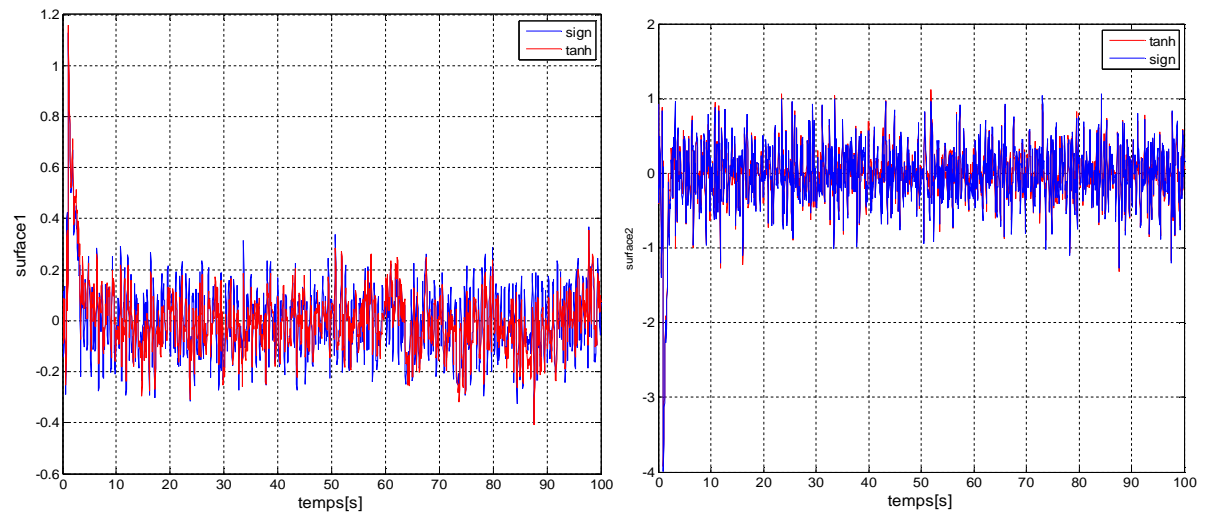


Fig III.20 : surface de glissement S1 et S2

Les figures ci-dessus : (III.18), (III.19), (III.20) lorsque nous appliquons une perturbation aléatoire (Gaussian) sur la sortie du robot, on remarque que le robot répond avec des oscillations très fortes et considérables. et le déplacement du robot reste entre $[-0.15, 1.15]$ par rapport à la référence. Le régulateur réagit avec cette perturbation de manière de maintenir le suivi de la référence et stabilise le système, la réapparition de phénomène de chattering avec la fonction tangente hyperbolique.

La commande par mode glissant montre une stabilisation du robot en point d'équilibriste acceptable, elle présente un temps de réponse très faible. Par contre, cette méthode consomme beaucoup d'énergie dans la commande à cause de l'effet de chattering. (Broutement)

Dans la poursuite de trajectoire, la commande par mode glissant assure la poursuite de la trajectoire.

III.9 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre l'application de la technique de commande par mode glissant pour la régulation du robot équilibriste. Cette technique trouve une place importante dans le contexte industrielle où les variations mécaniques sont fréquentes.

La commande par mode glissant montre que les performances sont meilleures autour du point de fonctionnement, aussi bien par rapport à les variations paramétriques. Et qui présente la caractéristique essentielle de cette technique est la robustesse, vis-à-vis a ces variations.

Les résultats de simulations montrent que cette technique présente des avantages majeurs dans la mesure qu'elle compense l'influence des paramètres. Mais cette technique de commande présente un inconvénient qui est le phénomène de chatterring.

Donc, nous proposons d'utiliser les techniques d'intelligence artificielle, tel que la commande par logique floue.

Pour contourner le problème de chatterring (broutement) de la commande précédente, on combine entre la commande par logique floue et la commande robuste, pour tester cette nouvelle commande hybride (la commande par mode glissant floue) sera l'intérêt du chapitre suivant.

Chapitre IV :

Commande par mode glissant floue d'un robot équilibriste

IV.1 Introduction :

La commande par logique floue permet d'obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire des études théoriques approfondies, mais elle souffre d'inconvénients entre autre, on énumère : le nombre de règles lorsque il est grand entraîne la complexité de l'analyse.

Aussi le manque en outils théoriques se ressent lors de l'analyse des performances et de la stabilité pour le système à commander.

La commande par mode glissant a largement prouvé son efficacité à travers les études théoriques rapportées, l'avantage que procure une telle commande et qui la rend aussi importante est sa robustesse vis-à-vis des perturbations et des incertitudes du modèle. Cependant, ces performances sont obtenues au prix de certains inconvénients : un phénomène de chattering qui peut causer l'instabilité et qui a un effet néfaste sur les actionneurs.

Parmi les solutions proposées à ces problèmes, on a choisi d'utiliser la commande par mode glissant flou, qui est une commande qui combine la logique floue et le mode glissant afin d'obtenir une commande robuste et lisse. [38]

IV.2 La logique floue :

La logique humaine est un enchaînement d'idées, de concepts concrets ou abstraits aboutissant à des conclusions qui peuvent entraîner des décisions ou rester à l'état de résultats prêts à être exploités le moment opportun. Depuis l'antiquité de nombreux penseurs comme Aristote, ont cherché à trouver les mécanismes de la logique, moteur de la déduction et l'action. Vingt siècles plus tard en effet, la logique aristotélicienne a été présentée par monsieur Boole sous forme algébrique, celle de la théorie des ensembles avec de nombreuses propriétés et principes, notamment les deux principales : [39]

La non contradiction, une proposition est vraie ou fausse sans nuances

Le tiers exclu, pas de valeur de vérité intermédiaire entre le vrai et le faux.

Le premier à avoir remis en cause cette loi est Platon, indiquant l'existence d'une troisième région située entre le vrai et le faux, et où ces deux notions opposées se mélangent. Au début du 20^e siècle, Lukasiewicz a décrit une logique tri-valuée, dont la troisième valeur pourrait être traduite par possible. En 1965 Lofti Zadeh, a introduit la notion de sous-ensemble floue (fuzzy sets) généralisant ainsi l'algèbre de la théorie classique des ensembles et aussi la logique tri-valuée, cette notion est en concordance avec la théorie classique, sauf sur les deux principes précédents. A présent, le tiers n'est plus exclu ; il existerait une vérité intermédiaire entre le vrai et le faux. Le degré d'une vérité est plus important que la vérité elle-même.

En effet la théorie des sous-ensembles flous permet d'une part de représenter et de manipuler des connaissances imprécises et/ou vaguement décrites et d'autres part d'établir une interface entre des données décrites symboliquement (avec des mots) et numériquement. [38]

IV.2.1 Théorie des sous-ensembles flous : [40], [41]

La logique floue s'appuie sur la théorie des sous-ensembles flous. La notion de sous-ensemble flou (SEF) est essentiellement fondée sur l'hypothèse que la relation '1 est un élément de n'est pas seulement vraie ou fausse, mais que son ensemble de valeurs est un intervalle réel [0,1].

Elle permet ainsi d'intégrer et de traiter le caractère approximatif ou vague de la connaissance humaine en utilisant des catégories aux limites mal définies comme celui de 'grande vitesse' ou 'petite taille', des situations intermédiaires entre le vrai et le faux et d'introduire un passage progressif d'une propriété à une autre. ce qui autorise à des éléments de n'appartenir complètement ni à un ensemble ni à l'autre, ou encore à appartenir partiellement à chacun.

Soit X, un ensemble dénombrable ou non. Un sous-ensemble flou A de X est caractérisé par sa fonction d'appartenance μ_A , telle que :

$$\begin{aligned} \mu_A: X &\rightarrow [0,1] \\ x &\rightarrow \mu_A(x) \end{aligned}$$

Où $\mu_A(x)$ représente le degré d'appartenance de x à l'ensemble flou A.

IV.2.2 Fonctions d'appartenance :

Chaque ensemble flou peut être représenté par sa fonction d'appartenance.

En général, la forme de la fonction d'appartenance dépend de l'application et peut être monotone, triangulaire, trapézoïdale, sigmoïde, gaussienne.

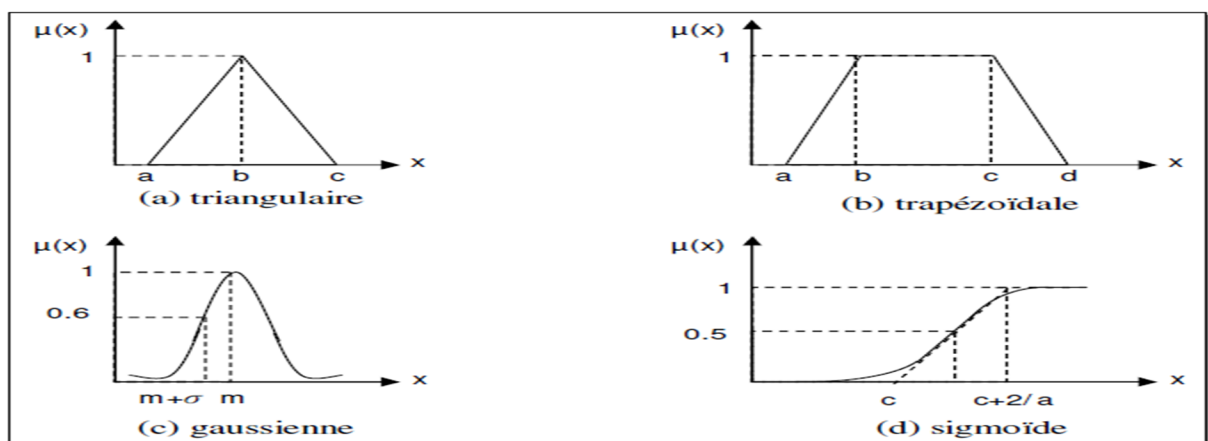


Fig IV.1 : Exemples de fonction d'appartenance

IV.2.3 Caractéristiques d'un sous-ensemble flou :

Pour montrer dans quelle mesure un sous-ensemble flou A d'un référentiel X diffère d'un sous-ensemble classique, nous définissons les caractéristiques suivantes.

✓ **Support d'un sous-ensemble floue :**

Le support d'un sous-ensemble flou A est caractérisé par l'ensemble des éléments de X, qui sont à des degrés divers dans A, et que l'on note par Supp(A) défini par :

$$Supp(A) = \{x \in X | \mu_A(x) \neq 0\} \quad (IV-1)$$

✓ **Noyau d'un sous-ensemble floue :**

Le noyau d'un sous-ensemble flou A est caractérisé par l'ensemble des éléments de X qui sont réellement dans A, et que l'on note par N(A) défini par :

$$N(A) = \{x \in X | \mu_A(x) = 1\} \quad (IV-2)$$

✓ **Hauteur d'un sous-ensemble floue :**

La hauteur H d'un sous-ensemble flou A est définie à l'aide de l'opérateur Supremum, telle que :

$$H(A) = \sup_{x \in X} \mu_A(x) \quad (IV-3)$$

IV.2.4 Opérations sur les sous-ensembles flous : [42]

Les variables linguistiques sont liées entre elles par des opérateurs ET, OU ou NON (complément, négation, inverse). Il s'agit d'opérateurs de la logique floue qui interviennent sur les fonctions d'appartenance représentant les variables linguistiques. Zadeh a donné une généralisation aux opérations d'égalité, d'inclusion, de complémentation, d'union et d'intersection, des sous-ensembles flous.

1. **Égalité :** Soient A_i et A_j deux éléments de l'ensemble $F(x)$. $F(x)$ est l'ensemble de tous les sous-ensembles flous de X.

$$A_i = A_j \Leftrightarrow \forall x \in X, \mu_{A_i}(x) = \mu_{A_j}(x) \quad (IV-4)$$

2. **Inclusion :** Soient A_i et A_j deux éléments de l'ensemble $F(X)$.

$$A_i \subset A_j \Leftrightarrow \forall x \in X, \mu_{A_i}(x) \leq \mu_{A_j}(x) \quad (IV-5)$$

3. **Intersection :** Soient A_i et A_j deux éléments de l'ensemble $F(x)$. L'intersection de A_i avec A_j définit un nouveau sous-ensemble flou A_k , ayant pour fonction d'appartenance μ_{A_k} , définie par:

$$\mu_{A_k}(x) = \min(\mu_{A_i}(x), \mu_{A_j}(x)), \forall x \in X \quad (IV-6)$$

4. **Union :** Soient A_i , et A_j , deux éléments de l'ensemble $F(x)$. L'union de A_i , avec A_j , définit un nouveau sous-ensemble flou A_k , ayant pour fonction d'appartenance μ_{A_k} , définie par :

$$\mu_{A_k}(x) = \max(\mu_{A_i}(x), \mu_{A_j}(x)), \forall x \in X \quad (IV-7)$$

5. **Complémentarité** : Soit A_i un élément de l'ensemble $F(x)$. Le complémentaire \bar{A}_i de A_i a pour fonction d'appartenance $\mu_{\bar{A}_i}$ telle que : $\mu_{\bar{A}_i}(x) = 1 - \mu_{A_i}(x), \forall x \in X$

IV.2.5 Variables linguistiques : [43]

Une variable linguistique est représentée par un triplet (V, X, T_v) , dans lequel V est la variable (la taille par exemple) définie sur un ensemble de référence X . On note $T_v = (A_1, A_2, \dots)$ un ensemble fini ou infini, de sous-ensembles flous de X qui sont utilisés pour caractériser V , définissant des restrictions des valeurs que prend V dans X . Par exemple: $\{T, [0m, 2m], ("très petit", "petit", "moyen", "grand", "très grand")\}$ est une variable linguistique (figure IV 1). Les valeurs de T "petit"... sont appelées valeurs linguistiques ou termes linguistiques ou encore termes flous.

Généralement, les supports des sous-ensembles flous associés aux valeurs linguistiques ne sont pas disjoints et leur union recouvre tout l'univers de discours.

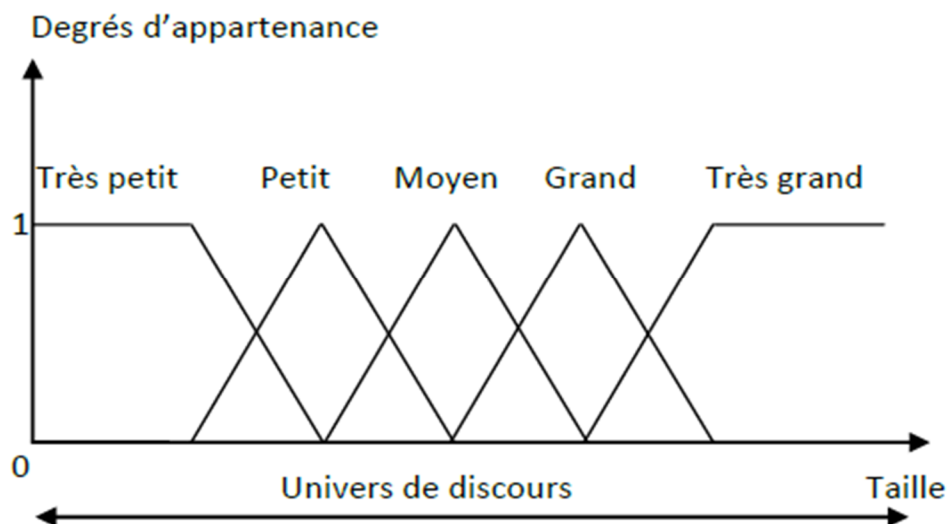


Fig IV.2 : Représentation de variable linguistique

IV.2.6 Raisonnement en logique floue : [42]

La représentation des connaissances fondée sur la théorie des sous-ensembles flous conduit à un traitement souple des connaissances, elle évite la rigidité des règles et autorise le traitement de certaines incomplétudes.

Les Systèmes d'Inférences Floues (SIF) sont utilisés aujourd'hui dans de nombreux domaines. On peut citer notamment le domaine du contrôle-commande où le recours aux SIF permet de s'abstraire d'une modélisation mathématique qui n'est pas toujours facile à réaliser.

Associés aux concepts fondamentaux du raisonnement flou. Nous allons voir que les SIF constituent une approche très intéressante pour aborder la commande de systèmes complexes, en offrant notamment la possibilité de construire une commande "transparente", c'est à dire explicite et donc interprétable.

IV.2.7 Règles floues :

On définit une règle floue comme une proposition floue correspondant à la mise en relation de deux propositions floues par une implication.

Une proposition floue est dite élémentaire, si elle n'est constituée que d'un prédicat de la forme "x est A". La composition de deux ou plusieurs variables linguistiques constitue une proposition floue.

L'expression linguistique générale d'une règle floue peut être formalisée de la manière suivante :

Si v est A alors w est B

Où A et B sont des sous-ensembles flous et v et w sont des variables linguistiques. On appelle prémisse, la première partie de la règle (v est A) et conclusion, la second partie (w est B).

D'une manière générale, on peut combiner des propositions floues de type "v est A" par des opérateurs logiques de conjonction et de disjonction ("ET" et "OU"), mis en œuvre respectivement par des T-normes et T-Conormes. On peut alors construire des règles floues plus complexes, dont la partie prémisse et la partie conclusion correspondent à une combinaison de propositions, par exemple :

Si V1 est A1 et V2 est A2 alors w est B

IV.2.8 Implication floue :

L'implication floue entre deux propositions floues élémentaires "v est A" et "w est B" est une proposition floue concernant le couple de variable (v, w), dont la valeur de vérité est donnée par la fonction d'appartenance μ_R d'une relation floue R entre X et Y définie pour tout (x, y) de $X \times Y$ par :

$$V \text{ est } A \xrightarrow{\mu_R} w \text{ est } B$$

Avec : $\mu_R(x, y) = \Phi(\mu_a(x), \mu_b(y))$ pour une fonction Φ de $[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$.

IV.3 La commande floue :

Actuellement la commande floue est très répandue et trouve son application dans tous les domaines. Ceci s'explique fondamentalement par la difficulté de modélisation des systèmes réels de plus en plus sophistiqués et l'incapacité des commandes classiques à leurs assurer de bonnes performances.

Un contrôleur flou (FLC) en revanche n'exige pas de modèle du système et par sa qualité d'approximation non linéaire universel, peut approcher le comportement d'un correcteur classique et même son extrapolation sur d'autres plages de fonctionnement. Le PI, PD, et PID flous en sont des exemples concrets [44], [45], [46]

L'aide à la conduite, la commande mono-variable et la commande multi-variable sont les trois types de situation où la commande floue peut être envisagée. De nos jours la commande floue connaît un tel développement et diversification qu'on ne peut pas énumérer toutes les variantes existantes ; génétique-flou, neuro-floue, mode de glissement-flou,...etc.

IV.3.1 Synthèse de contrôleur par la logique floue :

Un système flou de commande est caractérisé par (figure. IV.3) :

Une base de connaissances exprimée sous forme de règles du type :

Règle i : Si X_i est A_{i_1} et.....est X_n est A_{i_n} alors Y est B_i

Où les X_i sont les variables d'entrées, Y est la variable de sortie, les A_{i_n} et les B_i sont des sous-ensembles flous. Les règles sont connectées par des "Sinon ". Une méthode d'évaluation des entrées par rapport aux sous-ensembles flous (fuzzification) et une méthode de passage du flou au réel pour la sortie Y (défuzzification), un mécanisme d'inférence permettant d'évaluer l'ensemble des règles et d'en tirer une conclusion.

a. La fuzzification :

La fuzzification est la traduction des valeurs numériques relatives aux entrées du système en termes d'appartenance à des sous-ensembles flous pour pouvoir appliquer les règles, A une variable, on associe les degrés d'appartenance correspondant à chaque sous-ensemble flou (ce qui dépend bien sûr de la description floue adoptée).

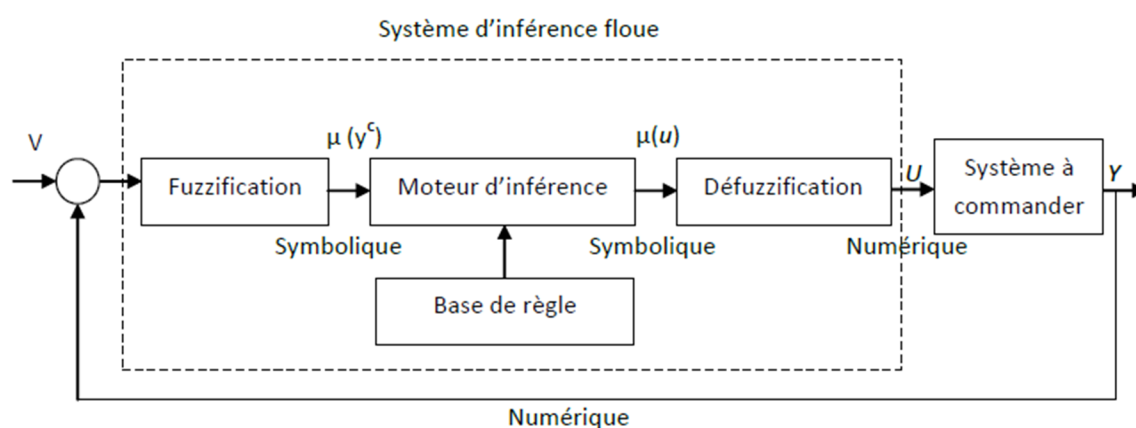


Fig IV.3 : Schéma générale de la commande floue.

b. L'inférence floue :

L'inférence floue est l'application de la caractérisation symbolique du système aux règles floues et la déduction d'un certain nombre de résultats locaux, également exprimés sous forme symbolique concernant les variables de sortie du système. Le but de cette étape est d'arriver à déterminer des sorties floues, en partant d'entrées floues et en utilisant une base de règles.

Pour pouvoir utiliser cette base de règles, on a besoin de trois opérateurs mathématiques, pour réaliser la conjonction (ET), l'implication (Si...Alors) et l'agrégation (Sinon).

Il est utile de montrer une représentation qui visualise les règles : la matrice de règles. Cette représentation sert à synthétiser le cœur du régulateur flou. A chaque case de la matrice correspond une règle (Table 2). Par exemple, la case en gras correspond à la règle suivante :

Si e_1 est Z et e_2 est Z alors Y est Z

$e_1 \backslash e_2$	N	Z	P
N	N	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	P

TAB IV.1: Exemple de matrice des règles

c. La défuzzification :

Elle a pour but l'obtention d'une valeur numérique pour chaque variable de sortie à partir des valeurs de sortie des différentes règles. Dans le cas de règles de type Takagi -Sugeno, le calcul se fait simplement par une somme normalisée des valeurs associées aux règles. Dans le cas de règles de type Mamdani, une valeur numérique doit être obtenue à partir de l'union des sous-ensembles flous correspondant aux différentes conclusions. Parmi les nombreuses possibilités pour réaliser cette étape, nous pouvons citer [47] :

- La méthode du centre de gravité : C'est la méthode de défuzzification la plus courante.
- La méthode du premier des maxima.
- La méthode de la moyenne des maxima.

d. Synthèse d'un FLC :

Un FLC est un système flou avec les modules expliqués précédemment.

La synthèse d'un FLC passe par les étapes suivantes :

Obtention de la base de connaissance : elle provient d'un expert, de l'expérience ou même de l'apprentissage. C'est la partie la plus importante du contrôleur.

Le choix des entrées et sorties : quand les règles floues sont assez suffisantes, les choix sont imposés naturellement. Le plus souvent ce n'est pas le cas, il y a généralement besoin d'ajouter d'autres règles à ajuster par des méthodes d'optimisation ou d'apprentissage pour améliorer les performances.

Toutefois un choix d'entrées très particulièrement utilisé est l'erreur et sa variation.

Choix des ensembles flous : suivant la plage de variation des entrées et sorties, la dynamique du système à commander, la fréquence de traitement..., la nature et le nombre d'ensembles flous peut varier. Il est souvent conseillé d'utiliser des fonctions triangulaires car le nombre de règles actives à la fois est considérablement réduit et les calculs sont relativement simples.

Choix des opérateurs flous : suivant le but recherché et les contraintes évoquées précédemment, on peut choisir un parmi les opérateurs existants. Pour des calculs simples la T-norm et l'inférence en Min peuvent faire l'affaire.

Les gains de normalisation : après détermination des limites des variables, il est préférable de les diviser par leurs valeurs maximales pour travailler sur des ensembles normalisés $[-1,1]$. Ceci permet de constater plus facilement l'influence relative de chaque entrée sur la commande.

e. Les contrôleurs flous usuels : [48]

Un contrôleur flou est un système d'inférence floue (SIF) employé dans une technique d'automatisation. Son rôle est de générer une valeur numérique à appliquer au système à partir d'un jeu de variables physiques. Il existe plusieurs types de SIF, selon les choix sur les opérateurs de conjonction, d'implication, d'agrégation des règles et selon la forme des conclusions. On peut se limiter à l'étude de deux SIF, les plus utilisés actuellement, celui du type Mamdani et celui du type Takagi-Sugeno. Pour exposer le principe de fonctionnement de chacun d'eux, on considère l'exemple d'une base de règles de la forme :

Règle i : Si X_i est A_{i_1} et.....et X_n est A_{i_n} alors Y est B_i sont des sous-ensembles flous.

La méthode Mamdani est la plus connue et elle présente ces caractéristiques :

- ❖ Elle est intuitive ;
- ❖ Elle est largement utilisée ;
- ❖ Elle simule le raisonnement humain etc....

La méthode de Takagi-Sugeno se caractérise par une sortie des règles non floues. A chaque règle, on associe une sortie définie sous forme numérique comme étant une combinaison linéaire des entrées. Les règles utilisées sont du type précédant (dans le cas d'un système d'inférence flou d'ordre zéro) mais les valeurs B_i sont des valeurs réelles (non floues).

Il a été montré expérimentalement que la méthode de Takagi-Sugeno donne des résultats très voisins de celle de Mamdani tout en permettant une réduction sensible du temps de calcul.

IV.4 Avantages et désavantages du réglage par la logique floue : [49]

Évidemment, le réglage par logique floue réunit un certain nombre d'avantages et de désavantages. Les avantages essentiels sont:

- i. Le non nécessité d'une modélisation (cependant, il peut être utile de disposer d'un modèle convenable).
- ii. La matrice de système à régler avec un comportement complexe (fortement non linéaire et difficile à modéliser).
- iii. L'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non linéaire).
- iv. La disponibilité de système de développement efficace, soit pour microprocesseur ou PC (solution logicielle), soit pour circuit intégrés (processeurs dédiés, fuzzy processors).

Par contre les désavantages sont :

- i. Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification).
- ii. L'approche artisanale et non systématique (implémentation des connaissances de l'opérateur, est souvent difficile).
- iii. L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toute généralité (en l'absence d'un modèle valable).
- iv. La précision du réglage souvent peut élever
- v. La cohérence des inférences non garantie à priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible).

Dans la partie suivante, nous allons présenter un contrôleur flou-glissant, ce contrôleur se base sur la fuzzification du terme discontinu de la commande glissante

IV.5 Structure du contrôleur glissant-floue :

Le contrôleur glissant-floue est composé de deux blocs (figure.4.4). Un bloc pour le calcul de la commande équivalente et la surface de glissement. Le deuxième bloc est un régulateur floue, dont l'entrée est la surface et la sortie est la commande attractante. La sortie du contrôleur flou-glissant est la somme de la commande équivalente et la commande attractante.

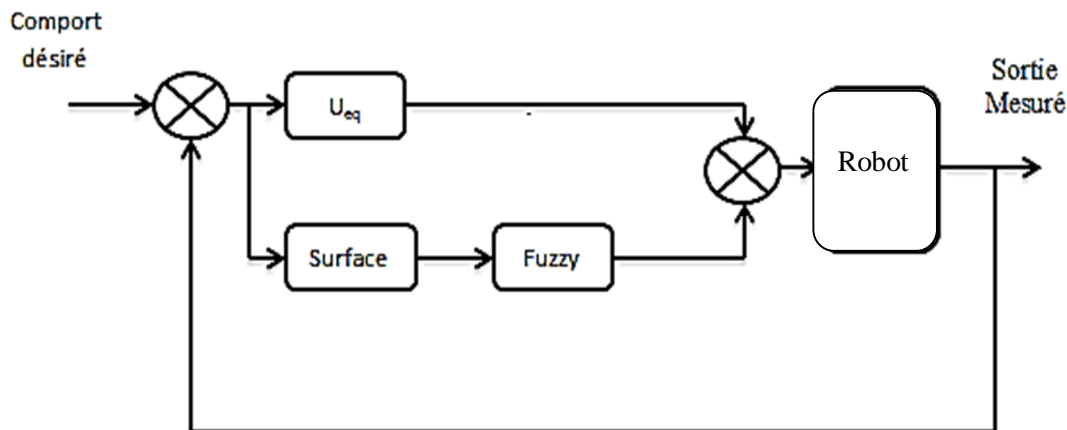


Fig IV.4 : Structure du régulateur glissant-floue.

IV.5.1 Application de la commande par mode glissant floue sur le robot équilibré :

Dans cette approche, la logique floue et le mode de glissement sont combinés entre eux pour donner naissance à un nouveau concept de contrôleurs. Le contrôleur ainsi obtenu est fait partie de la famille des contrôleurs flou-glissant. Celui-ci présente la même structure de commande du SMC donnée dans la partie mode glissant, mis à part le terme $k \text{sign}(s)$ qui sera remplacé par un contrôleur floue. [50]

Il est clair que la partie discontinue de la loi de commande par mode de glissement explique la stratégie de contrôle suivante :

« Si l'erreur est négative, alors la sortie du système est poussée vers la direction positive ».

Pour cela, le terme $k \text{sign}(s)$ peut être remplacé par un contrôleur flou. Ce contrôleur possède une entrée et une sortie, et la base de règle sert à établir une connexion entre s et u_n «la commande discontinue ». Ceci est interprété par des règles de la forme :

- ❖ **R1** : Si s est N Alors u_n est P.
- ❖ **R2** : Si s est Z Alors u_n est Z.
- ❖ **R3** : Si s est P Alors u_n est N.

Avec :

- N : Négative.
- Z : Zéro.
- P : Positive.

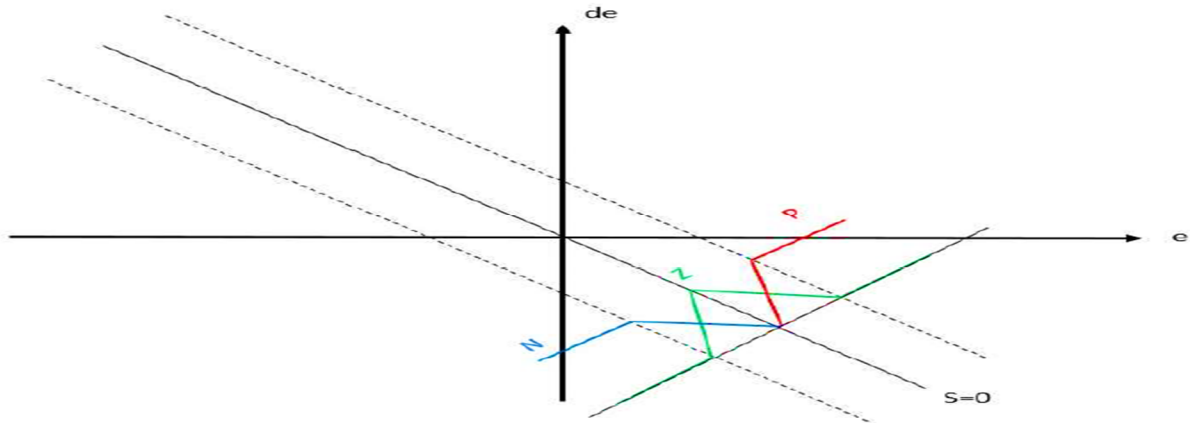


Fig IV.5 : Partition floue de l'espace autour de la surface de glissement.

Le contrôleur flou ayant une entrée s de trois fonctions d'appartenance et une sortie u_n de trois fonctions d'appartenance qui sont représentées dans les figures IV.6 et IV.7 respectivement.

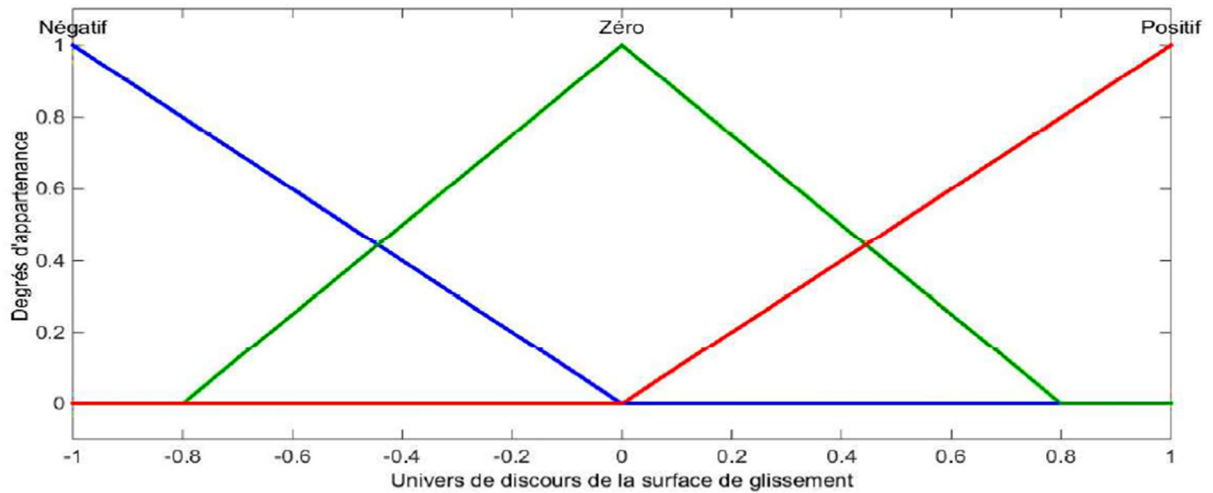


Fig IV.6 : Les fonctions d'appartenances d'entrée s .

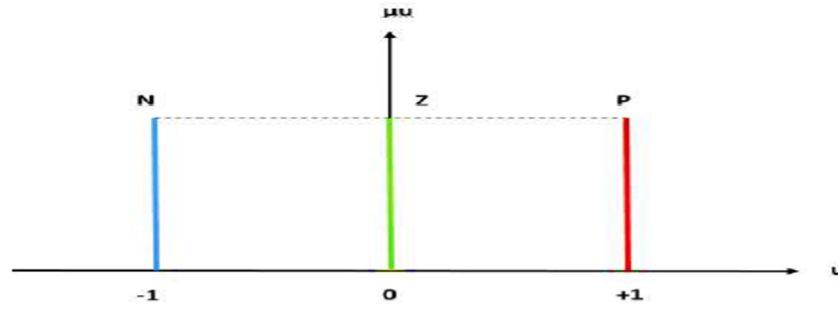


Fig IV.7 : Les fonctions d'appartenances d'entrée u.

IV.6 Résultat de simulation sous MATLAB :

Les résultats des simulations représentent l'évolution respective d'équilibre, l'angle de direction par rapport à la consigne par un régulateur Sugeno à 3 règles.

IV.6.1. Simulations de l'inclinaison et le déplacement du robot équilibré :

IV.6.1.1 Model simulink:

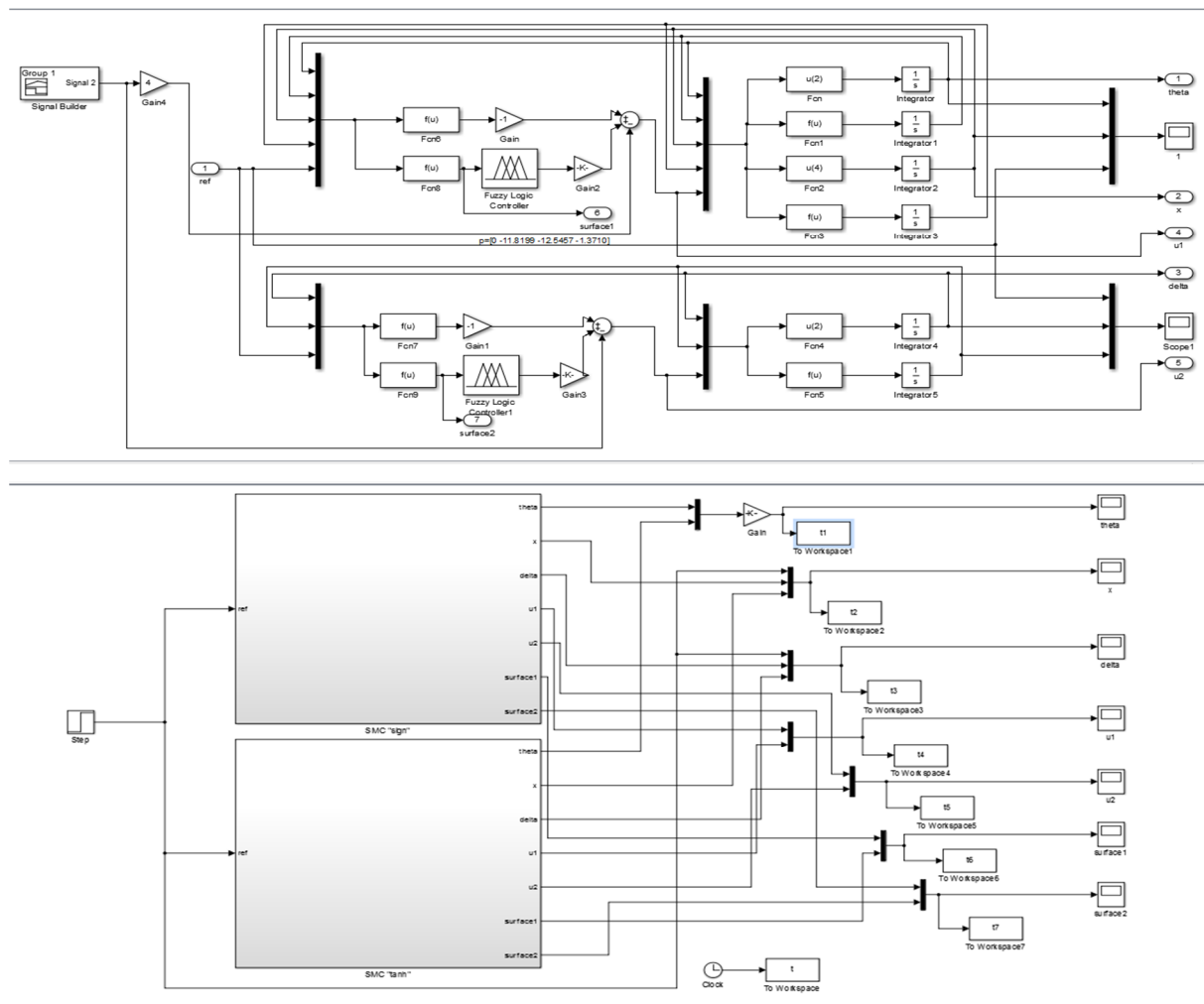


Fig IV.8 : Model simulink du robot équilibré.

IV.6.1.2 Resultats de simulation sans perturbation :

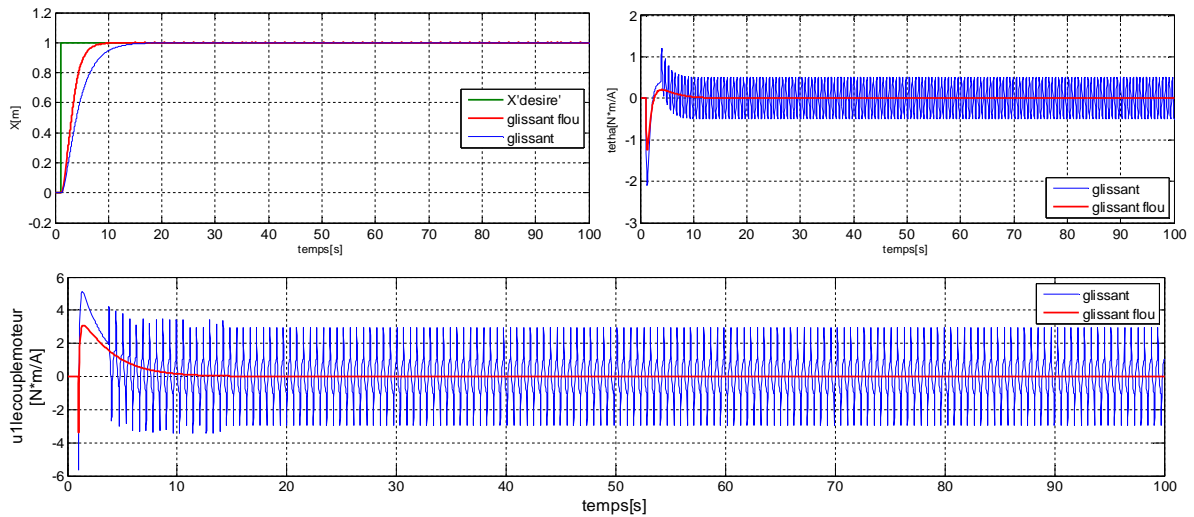


Fig IV.9 : L'équilibre du robot.

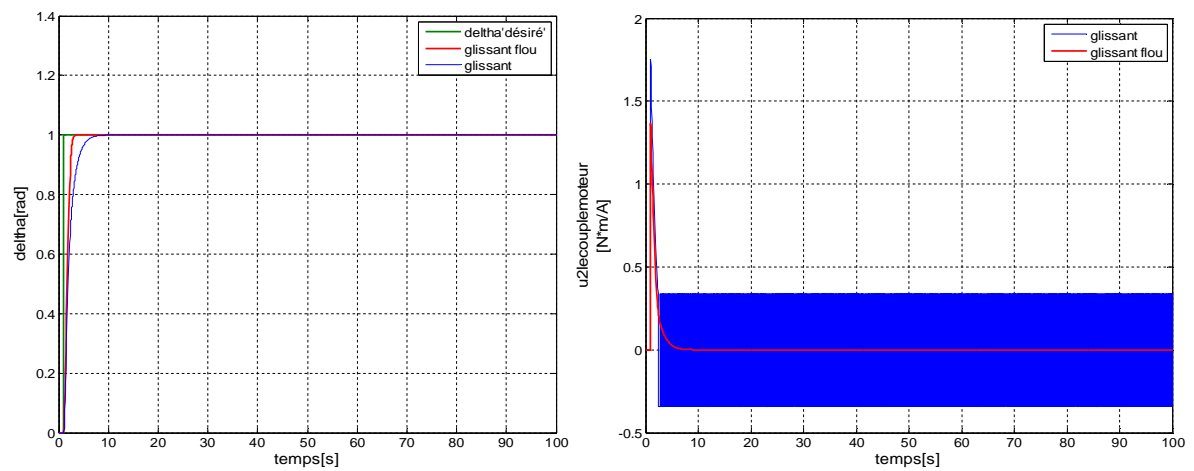


Fig IV.10 : l'angle de direction du robot

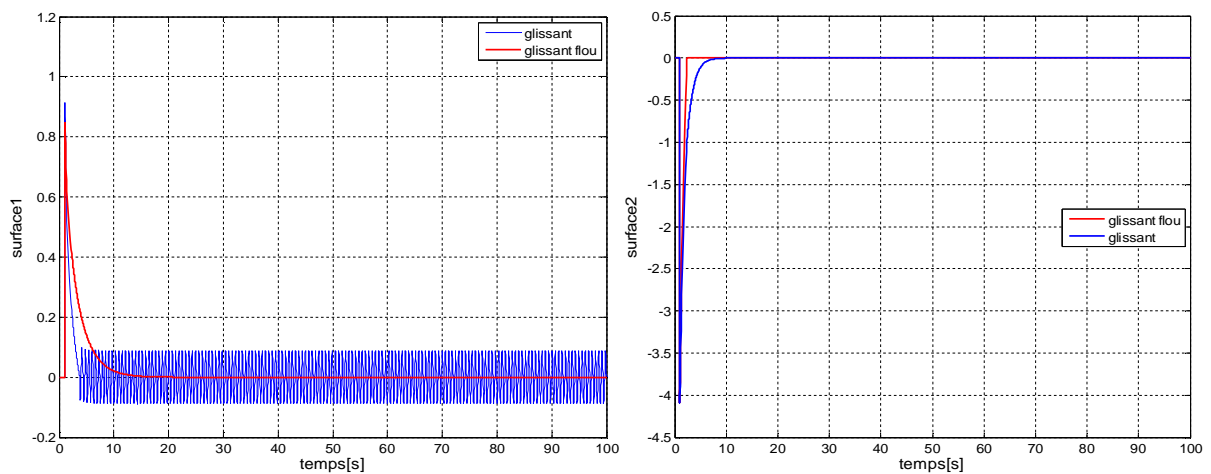


Fig IV.11 : surfaces de glissement S1 et S2.

Les courbes des figures (IV.9), (IV.10), (IV.11) représentent l'équilibre et l'angle de direction du robot et les surfaces de glissement S1 et S2, on remarque que le robot arrive à sa position

d'équilibre stable après quelques secondes de démarrage, le phénomène de chattering est éliminé on remplace la fonction signe par un contrôleur flou dans les graphes d'entrée de système .

IV.6.1.3 Résultats de simulation avec une perturbation appliquée sur l'entrée du robot d'une durée de 1 sec [20 sec à 21 sec]:

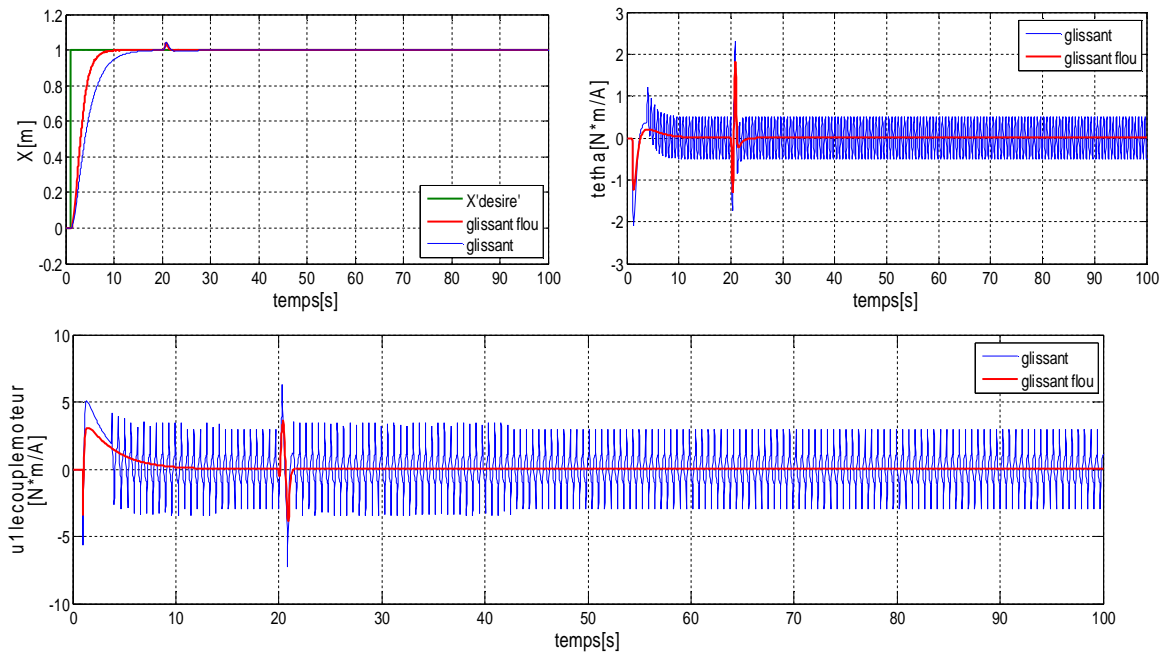


Fig IV.12 : L'équilibre du robot.

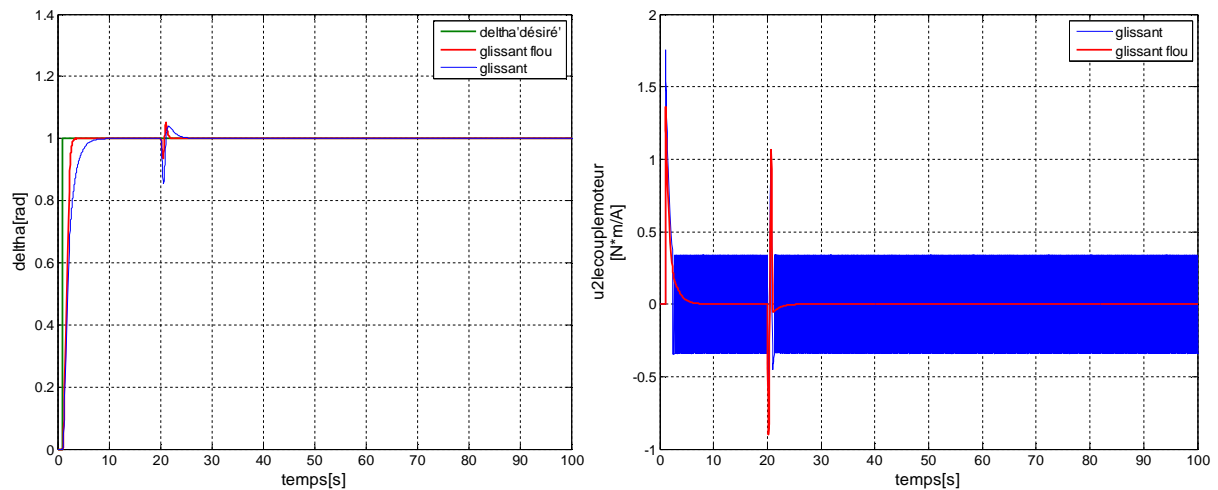


Fig IV.13 : l'angle de direction du robot.

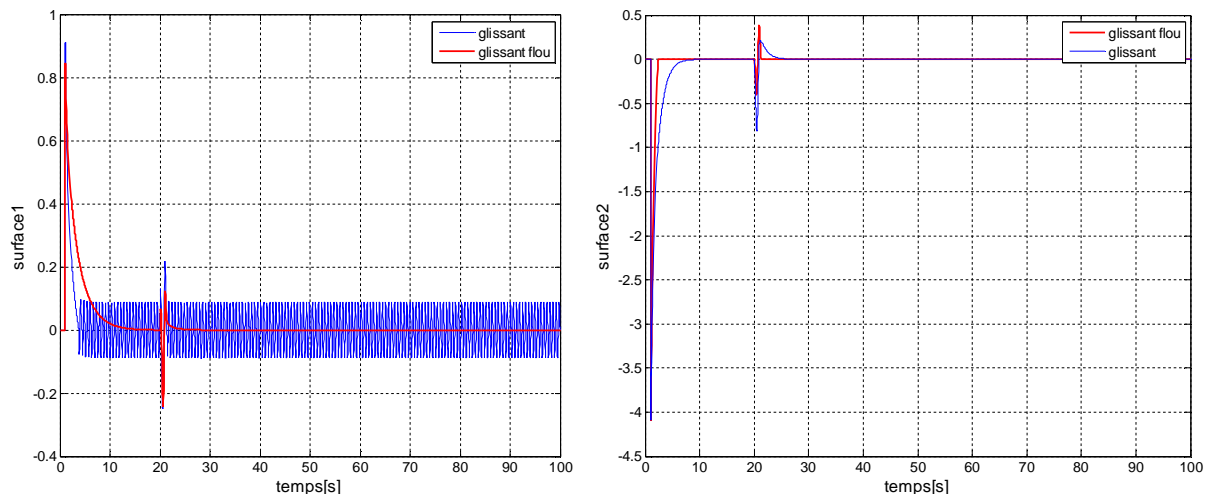


Fig IV.14 : surfaces de glissement S1 et S2

Les figures (IV.12), (IV.13), (IV.14) le cas d'application d'une perturbation en entrée sur le robot, à l'instant $t=20$ sec jusqu'à l'instant $t=21$ sec, le système répond avec des oscillations très faibles et négligeables et le déplacement du robot ne dépasse pas 0.07 mètre par rapport à la référence. Le régulateur réagit et corrige cette perturbation et stabilise le système après 3 sec à la disparition de la perturbation, et les surfaces de glissement restent stables, le phénomène de chattering est éliminé en remplaçant la fonction signe par la fonction de contrôle flou dans les graphes de sortie du système.

IV.6.1.4 Résultats de simulation avec une perturbation appliquée sur la sortie du robot d'une durée de 1 sec [20 sec à 21 sec]:

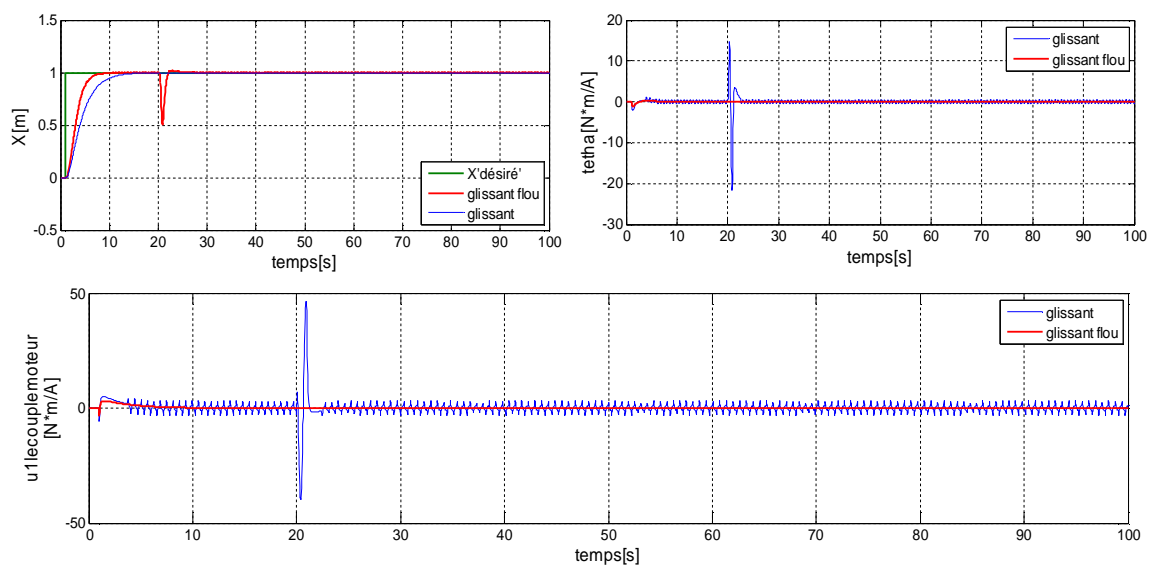


Fig IV.15 : L'équilibre du robot.

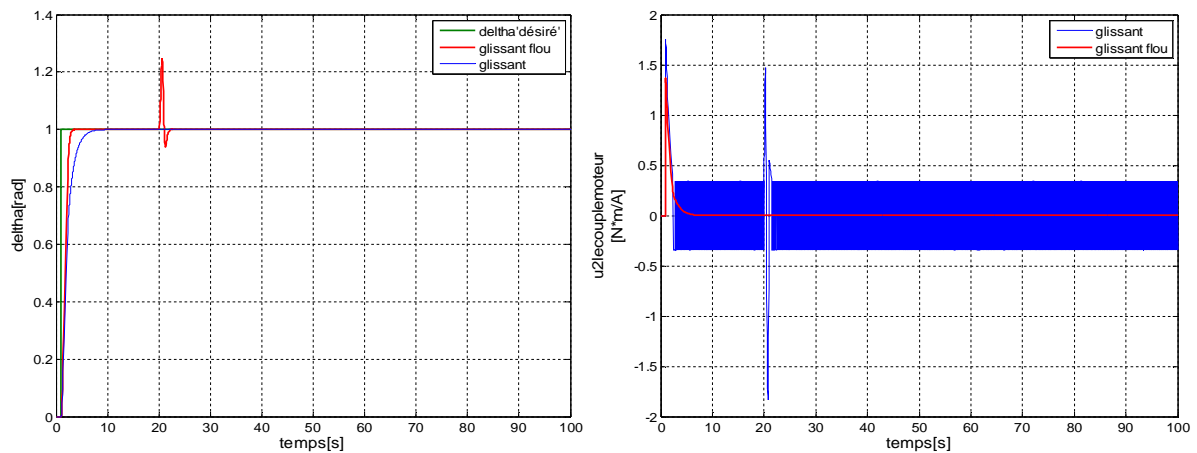


Fig IV.16 : l'angle de direction du robot

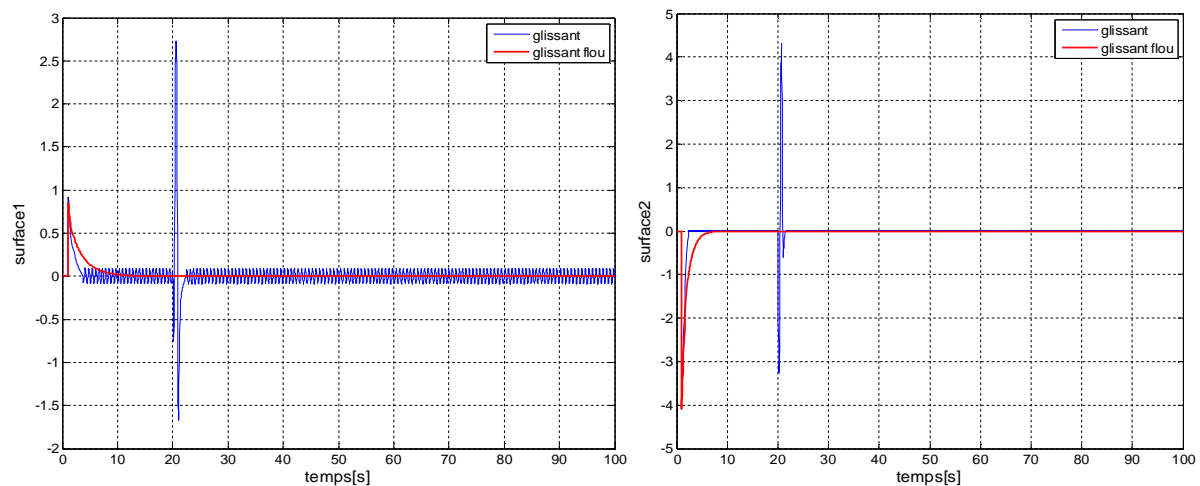


Fig IV.17 : surfaces de glissement S1et S2

Les figures (IV.15), (IV.16), (IV.17) lorsque nous appliquons une perturbation à la sortie du robot. D'une durée $t=1$ sec, on remarque que le système répond avec des oscillations faible et le déplacement du robot en le ramenant à sa position initiale avec un déplacement maximal de -0.5 m. Le regulateur reagit et corrige cette perturbation et stabilise le système après 4 sec à la disparition de la perturbation. le robot est dans les limites physiques de déplacement $[-0.5m,0.5m]$, et les surfaces de glissement s'annulent après quelque seconde. Le phénomène de chattering est éliminer on remplacons la fonction signe par un controleur flou dans les graphes d'entrée de système.

IV.6.1.5 Resultats de simulation avec une perturbation aléatoire(Gaussian) appliquée sur la sortie du robot:

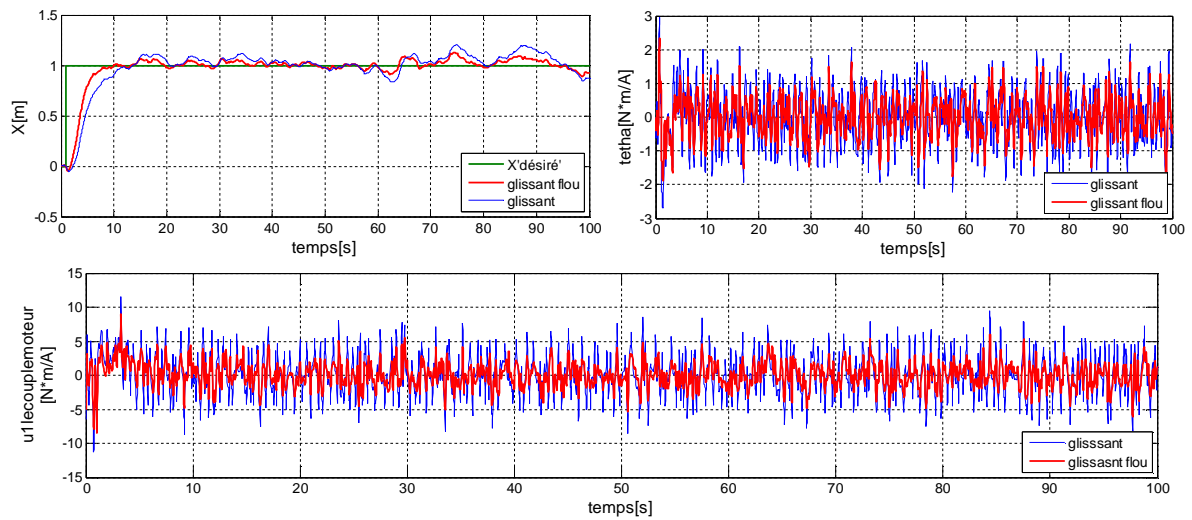


Fig IV.18 : L'équilibre du robot.

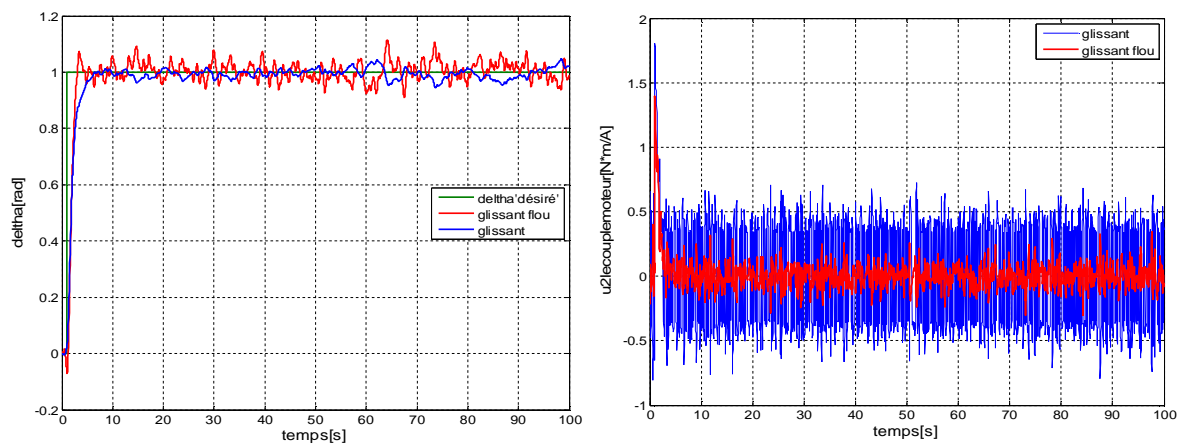


Fig IV.19 : l'angle de direction du robot.

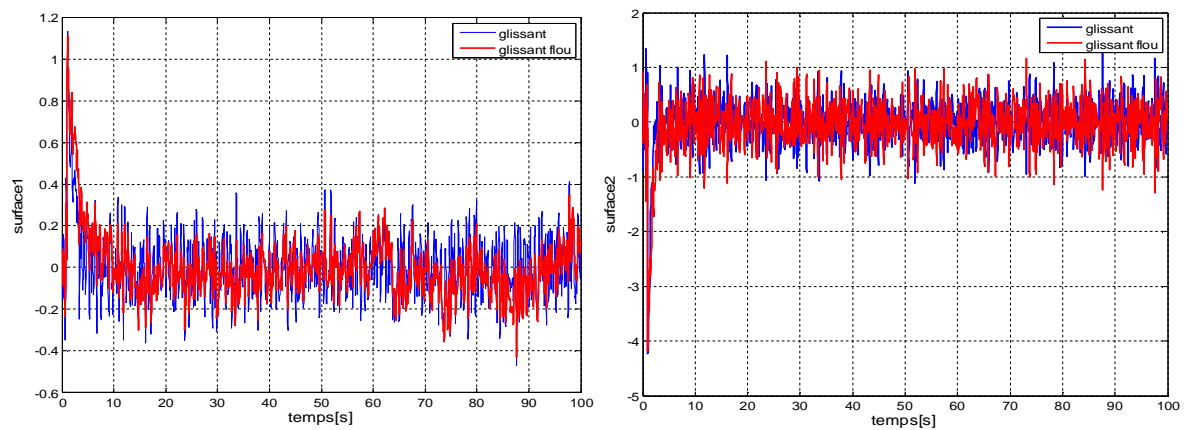


Fig IV.20 : surfaces de glissement S1et S2

Chapitre IV Commande par mode glissant floue d'un robot équilibriste

Les figures ci-dessus : (IV.18), (IV.19), (IV.20) lorsque nous appliquons une perturbation aléatoire (Gaussian) sur la sortie du robot, on remarque que le robot répond avec des oscillations très forts et considérables. et le déplacement du robot reste entre $[-0.1\text{m}, 1.2\text{m}]$ par rapport à la référence. Le régulateur réagit avec cette perturbation de manière de maintenir le suivi de la référence et stabilise le système, la réapparition de phénomène de chatter avec la fonction tangente hyperbolique.

la commande par mode glissante-floue ne consomme pas beaucoup d'énergie dans la commande et assure la stabilité et la poursuite d'une trajectoire. L'objectif est d'utiliser une loi de commande qui permet de suivre les trajectoires de référence en temps fini, avec une grande précision, une bonne robustesse et une diminution de la réticence.

IV.7 Conclusion :

Dans ce chapitre une commande par mode glissante-floue ont été développée et testée aussi bien en simulation. Ceci a permis de résoudre le problème du broutement de la commande par mode de glissement appliqué au robot équilibriste. En plus l'hybridation de la commande à présenter des très bonnes robustesses contre les variations paramétriques du modèle ainsi que la dynamique désirée du système en boucle fermée est définie par les surfaces de glissement proposé au préalable. La dynamique des sous-systèmes du robot équilibriste avec la commande par mode glissant floue donne des résultats satisfaisants. En effet, nous constatons que la commande appliquée au système est moins oscillatoire que celle calculée par mode de glissement tout seul.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude se situe dans le domaine de la commande des robots équilibriste. Nous sommes particulièrement intéressés aux méthodes les plus utilisées au niveau de l'industrie et des instituts de recherche. Cette méthode est l'association de la logique floue, au régulateur du mode glissant. Il s'agit de développer une loi de commande par mode glissant floue pour résoudre les problèmes de poursuite des systèmes incertains, perturbés et réduire le phénomène de chatterring.

L'instabilité pour l'équilibre du corps est les principales difficultés dans le contrôle des systèmes basé sur le principe du pendule inversé. Des nombreuses solutions ont été développées par les chercheurs de façon à être robustes vis à vis de ces problèmes. La plupart d'entre elles sont basées sur la commande par mode glissant. La commande par mode glissant floue permet d'associer les qualités de robustesse devant l'instabilité du corps. Ils ont une relative simplicité d'implantation sur des systèmes réels, d'où l'importance de ces techniques.

Pour améliorer la robustesse du système bouclé, nous avons présenté. Dans le chapitre 3, la commande par mode glissant, les principaux avantages de cette technique est la simplicité de conception, la robustesse vis-à vis des perturbations externes, Nous rappelons également le principal inconvénient de ce type commande à savoir, l'existence d'un phénomène important de chatterring.

L'approche de commande par logique floue a été choisie dans ce travail. Comme il s'agit d'une méthode de commande nouvelle, les notions de bases ont été présentes au début du chapitre 4. Ensuite nous avons proposé une méthode de façon de combiné l'approche de la commande floue et les techniques de commande par modes glissants. Le choix de ces deux stratégies a été motivé par les objectifs de stabilité et de robustesse qu'elles offrent. La combinaison de la floue avec le mode glissant donne la possibilité de remédier l'inconvénient de chatterring, Cette commande fournira prévision de la performance même si le modèle du système n'est très connu est nécessaire. Des simulations ont été présentées pour mieux illustrer les améliorations apportées par cette approche.

Comme perceptives, nous pouvons proposer les points suivants :

- Tester expérimentalement les résultats théoriques et des simulations obtenus est toujours notre objectif.

Conclusion générale

- Utiliser une méthode de commande nouvelle combinant l'approche de la commande nouserons floue et les techniques de commande par modes glissants.

Références bibliographiques

- [1] Un historique de la robotique O. Labbani-Igbida, E. Mouaddib.
- [2] SLIMANE, Noureddine. *Système de localisation pour robots mobiles*. 2005. Thèse de doctorat. Université El Hadj Lakhdar de Batna.
- [3] Wikipedia, Pendule inverse, [http://fr.wikipedia.org/wiki/Pendule inverse](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pendule_inverse).
- [4] Contribution à la modélisation et la commande robuste de robots manipulateurs à articulations flexibles. Applications à la robotique interactive. Maria Makarov.
- [5] Conception électronique et informatique d'un robot mobile pour usage dans un environnement domiciliaire.
- [6] Projet Pendule Inversé Inverse Pendulum Balancing Project Par: Dominic Robillard Mark Janelle Isabelle Brulé.
- [7] Philo, YAL : robot équilibriste http://www.freelug.org/article.php3?id_article=211.
- [8] BENARIBA, Hassan. *Commande d'un robot mobile (Mobrob) sur deux roues*. 2013. Thèse de doctorat.
- [9] C.A. Patel, (*Building a Test Bed for mini Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle with protective Shroud*), Master Thesis of Science, Graduate School of Wichita, USA July 2006.
- [10] S. Bouabdallah, "*Design and control of quadrotors with application to autonomous flying*", thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, suisse, 2007.
- [11] A. Dzul P. Castillo and R. Lozano. "*Real-time stabilization and tracking of a four-rotor mini rotorcraft*". IEEE Transaction on Control System Technology, 12(4):510 – 516, USA, July 2004. 2.
- [12] R. Lozano P. Castillo and A. Dzul."*Stabilization of a mini rotorcraft having four rotors*". Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pages 2693 – 2698, JAPAN, 2004.
- [13] S. Bouabdallah, A. Noth and R. Siegwart, "*PID vs LQ Control Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor*", Autonomous Systems Laboratory Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, Switzerland, 2004.
- [14] Tommaso Bresciani, "Modelling, *Identification and Control of a Quadrotor Helicopter*", Master Thesis, Lund University, Sweden, October 2008.
- [15] J. Dunfied, M. Tarbouchi, G. Labonte, "*Neural Network Based control of a Four Rotor Helicopter*", IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) 2004.
- [16] LOZEAU, Mathieu. *Commande par supervision de systèmes mécatroniques via internet*. 2009. Thèse de doctorat. Ecole Polytechnique de Montréal.
- [17] H. R. Memarbashi et H. R. Memarbashi, « Design and parametric control of co-axes driven two-wheeled balancing robot: a thesis presented in partial fulfilment of the

Références Bibliographie

requirements for the degree of Master of Engineering in Mechatronics at Massey University, School of Engineering and Advanced Technology, Albany, New Zealand », 2010.

[18] R. C. Ooi, « Balancing a two-wheeled autonomous robot », *University of Western Australia*, vol. 3, 2003.

[19] L. Fadhila « Etude comparative de la commande par mode glissant et la commande vectorielle d'une machine asynchrone ». ICEEE'2004 Algeria, 2nd International Conference on Electrical April/2004.

[20] L. Fridman et A. Levant. "High-Order Sliding Modes Sliding Modes Control in Engineering", Ed. W. Perruquetti, J.P. Barbot, M. Dekker, Inc. New York, 2002.

[21] LENAIN, R. Contribution à la modélisation et à la commande de robots mobiles en présence de glissement. 2005. *Université Blaise Pascal-Clermont II (France)*.

[22] TOUFOUTI, Riad, MEZIANE, S., et BENALLA, H. Direct torque control for induction motor using fuzzy logic. *Power Electronics*, 1997, vol. 12, no 3.

[23] HUSSAIN, Ayman. *Contribution à la commande adaptative robuste par modes glissants*. 2008. Thèse de doctorat. Reims.

[24] AISSAOUI, ABDEL GHANI, ABID, HAMZA, ABID, MOHAMED, *et al.* Commande par la logique floue et mode Glissant d'une machine synchrone autopilotée. *Rev. Roum. Sci. Techn. –Électrotechn. et Énerg*, vol. 52, no 1, p. 89-104.

[25] J.J.E. Slotine and J.A. Coetsee, « Adaptive sliding controller synthesis for non-linear systems », *Int.J. Control*, N°6, p.1631-1651, 1986.

[26] W.Gao, J. C. hung, « variable structure control system », *IEEE Trans. Indust. Applic.* Vol., N°1, pp45-55, 1993.

[27] Derafa L, Madani t. and Benallegue A " *Dynamic modelling and experimental identification of four rotor helicopter parameters* " CIT Mumbai, India, 2006.

[28] H. Bouadi, "***Synthèse de lois de commande stabilisantes pour un UAV type Quadrotor étude et application***", Thèse de Magister, Ecole Militaire Polytechnique, ALGERIE 2007.

[29] IMEN, Deghboudj Imen Deghboudj. **COMMANDE DES SYSTEMES NON LINEAIRES PAR MODE GLISSANT D'ORDRE SUPERIEUR.**

[30] H.Tamrbed et T.Azarobr « Réglage par mode glissant d'une machine asynchrone » *proceedings de la conférence CEE'00*, pp.136-141, 2000.

[31] M. Hamata Omar et M. Louchen Nouridine « Contribution à la commande vectorielle de la machine asynchrone double alimentation » *Mémoire d'ingénieur, université de Batna*, 2003.

Références Bibliographie

- [32] KECHICH, Abderrahmane et MAZARI, Benyounes. La commande par mode glissant: Application à la machine synchrone à aimants permanents (approche linéaire). *Afrique Science*, 2008, vol. 4, no 1, p. 21-37.
- [33] S.V. Emilyanov, «Sliding mode control systems», Nauka, Moscow, 1967.
- [34] V.I.Utkin, «Variable structure systems with sliding mode» , IEEE.TAC, Vol. AC-22, N°2, p.212-222, 1977.
- [35] OUIGUINI, R., BOUZID, R., et SELLAMI, Y. Une commande robuste par mode glissant flou Appliquée à la poursuite de trajectoire d'un robot mobile non holonome. In : *Conférence internationale sur les systemes de télécommunications, d'électronique médicale et d'automatique, CISTEMA, Tlemcin, Algérie*. 2003. p. 27-29.
- [36] L'UNIVERSIT, E. PAUL VERLAINE-METZ. Modélisation et Commande de vol d'un hélicoptère drone soumise une rafale de vent. 2008.
- [37] VIDAL, Paul-Étienne. Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation. 2004.
- [38] MARTINI, Adnan. *Modélisation et commande de vol d'un hélicoptère soumis à une rafale de vent*. 2008. Thèse de doctorat. Université de Metz.
- [39] RACOCEANU, Daniel. Contribution à la surveillance des Systèmes de Production en utilisant les Techniques de l'Intelligence Artificielle. *Habilitation à diriger des recherches, Université de FRANCHE COMTÉ de Besançon, France*, 2006/
- [40] Robert Babuska, "fuzzy and neural control Disc course lecture notes (2001) Delft University of technology, Delft, the Netherlands publication copyright 2001.
- [41] Hung T. Nguyen, Albert A. Walker "A first course in fuzzy logic" second edition chapma, and Hall / CRC 2000.
- [42] FERHAT, LAHOVAZI. *Mise en oeuvre d'une stratégie de commande neuro-floue. Application à un pendule inversé*. Thèse de doctorat. Université Mouloud Maameri de Tizi Ouzou.
- [43] C. C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. Part1", *IEEE Transactions on systems Man and Cybernetics*, Vol. 20, 1990, pp. 404-418/
- [44] A. Mokhtari and A. Benallegue "**Dynamic feedback controller of euler angles and wind parameters estimation for a quadrotor unmanned aerial vehicle**" Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2359 – 2366, 2004.
- [45] A. Benallegue, V. Mister and N. K. M'Sirdi "**Exact linearization and noninteracting control of a 4 rotors helicopter via dynamic feedback**" IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 586 – 593, 2001.

Références Bibliographie

- [46] T. Hamel, N. Guenard and R. Mahony “*A practical visual servo control for a unmanned aerial vehicle*” IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1342 – 1348, 2007.
- [47] R. Lozano, P. Castillo and A. Dzul “*Stabilization of a mini rotorcraft having four rotors*” Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2693 – 2698, 2004.
- [48] **Takagi, T., and Sugeno, M.**, Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 15, N°. 1, pp. 116-132, 1985.
- [49] RACOCEANU, Daniel. Contribution à la surveillance des Systèmes de Production en utilisant les Techniques de l’Intelligence Artificielle. *Habilitation à diriger des recherches, Université de FRANCHE COMTÉ de Besançon, France*, 2006.
- [50] AOUCHAR, Najet et BEKHALED, Chafika. Application des systèmes hybrides neuro-flous au diagnostic des huiles de transformateur. *Projet de Fin d’Etudes, Département Génie électrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger*, 2005, p. 45-50.

Annexes

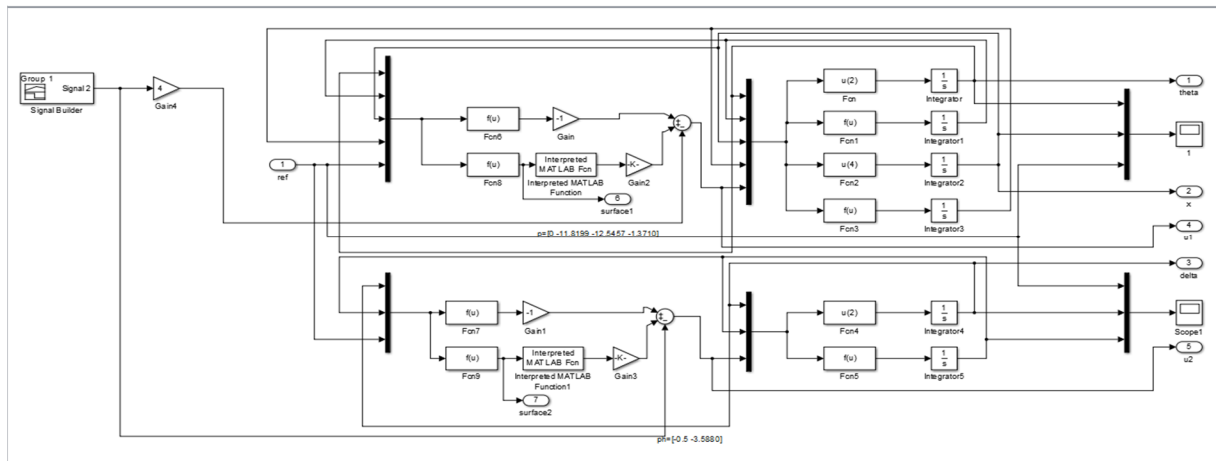
A. Programme matlab :

```

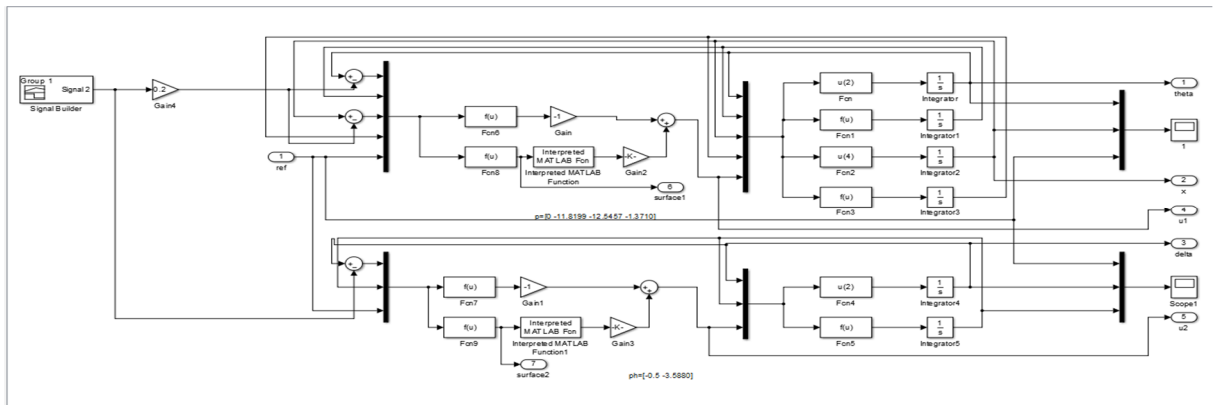
%----- définition des paramètres-----%
% Rw=4.575*10^-2 ; rayon des roues (cm)
% M=1.076 ;      masse de la moitié robot, y compris une roue (kg)
% Mb=1.054 ;      masse de la moitié du corps du robot (kg)
% Mw=0.022 ;      masse de l'une des roues (kg)
% Jb=43.47*10^-4 ; moment d'inertie de la moitié du corps du robot (kg.cm2)
% Jd=108.21*10^-04 ; moment d'inertie du robot autour de l'axe Z (kg . cm2)
% Jw=0.04269*10^-4 ; moment d'inertie de l'une des roues (kg . cm2)
% D=6.19252*10^-2 ; distance entre l'arbre du moteur et le centre de
gravité (cm)
% S=22.9*10^-2 ;      distance entre les roues (cm)
% Kt=0.0552 ;      constante de couple des moteurs (n.m/a)
% Ke=0.0552 ;      constante de force électromotrice des moteurs (v.s/rad)
% Ra=41.5 ;      résistance d'armature des moteurs (ohm)
% Rg=6 ;      rapport de la boîte de réduction (n/a)
% N=0.8 ;      efficacité de la boîte de réduction(%)
% Cf=0.001 ;      constante de friction(n.m.s/rad)
% G=9.81;      la gravite
%-----les matrices d'espace d'état-----%
%-----Inclinaison et déplacement linéaire-----%
% A=[0,1,0,0;Mb*G*D/Jb,-(N*(Rg^2)*(Ke^2)+(Cf*Ra))/(Ra*Jb),0,-
(N*(Rg^2)*(Ke^2)+(Cf*Ra))/(Ra*Rw*Jb);0,0,0,1;0,-
(N*Rw*(Rg^2)*(Ke^2)+(Cf*Ra*Rw))/(Ra*(Jw+(M*(Rw^2)))),0,-
(N*(Rg^2)*(Ke^2)+(Cf*Ra))/(Ra*(Jw+(M*(Rw^2))))]
% B=[0;(N*Rg*Ke)/(Ra*Jb);0;N*Rw*Rg*Ke/(Ra*(Jw+(M*(Rw^2))))]
% P=[-17.9838 -8.8287 -1.3338 -0.2847]
% K=place(A,B,P)
% Ac=A-B*K
% syms S1 S2 S3 S4
% S=[S1;S2;S3;S4]
% Ac'*S
% -inv(S'*B)
%----- Angle de direction-----%
% Ah=[0,1;0,-
(N*(S^2)*(Rg^2)*(Ke^2)+((S^2)*Cf*Ra))/(Ra*(2*Jd*(Rw^2)+(Jw*(S^2))))];
% Ah=[0,1;0,-3.5880]
% Bh=[0;2*N*Rw*Rg*Ke*S/(Ra*(2*Jd*(Rw^2)+(Jw*(S^2))))]
% p=[-1.3338 -3.3692]
% K=place(Ah,Bh,p)
% Ac=Ah-Bh*K
% syms S1 S2
% S=[S1;S2]
% Ac'*S
% -inv(S'*Bh)

```

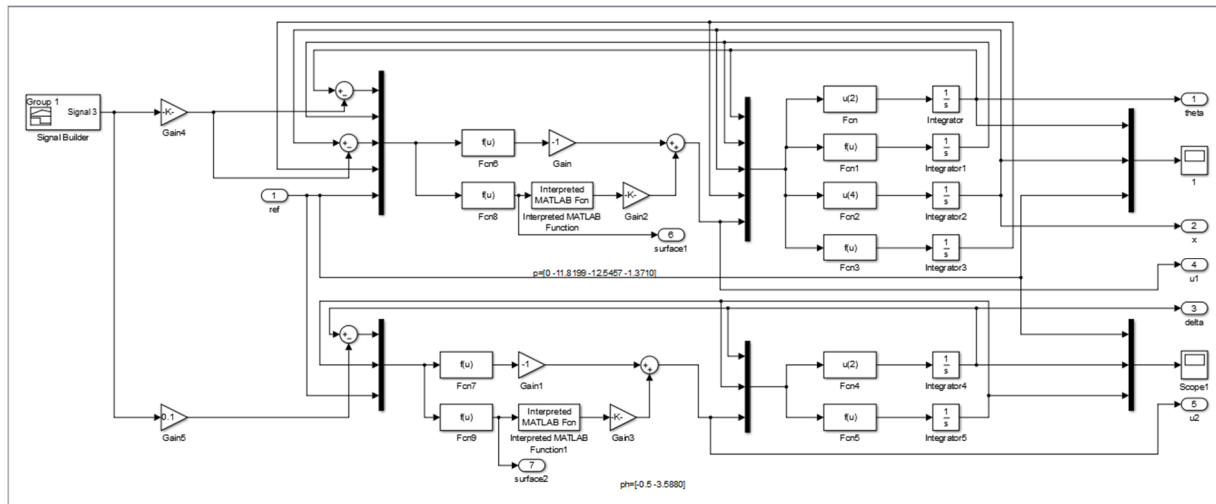
B. Le fichier simulink de notre système :



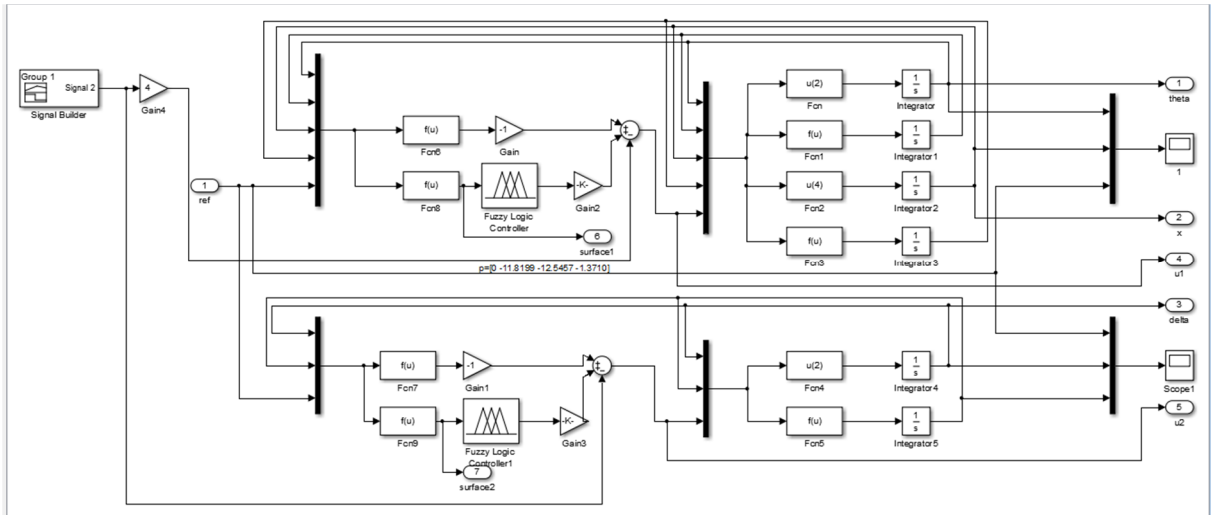
III.1 Le fichier simulink avec une perturbation appliquée sur l'entrée du robot.



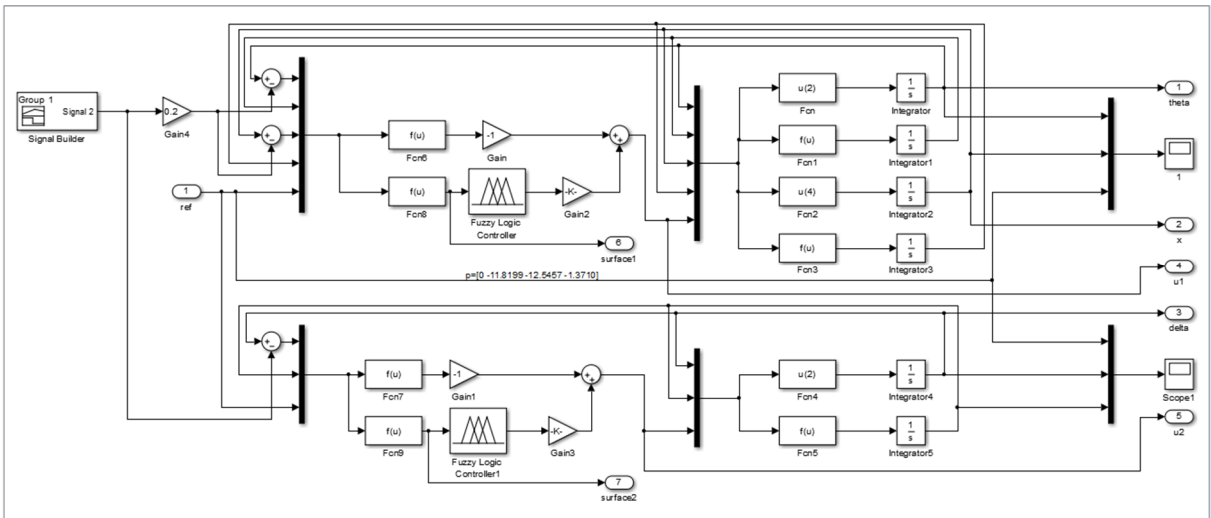
III.2 Le fichier simulink avec une perturbation appliquée sur la sortie du robot.



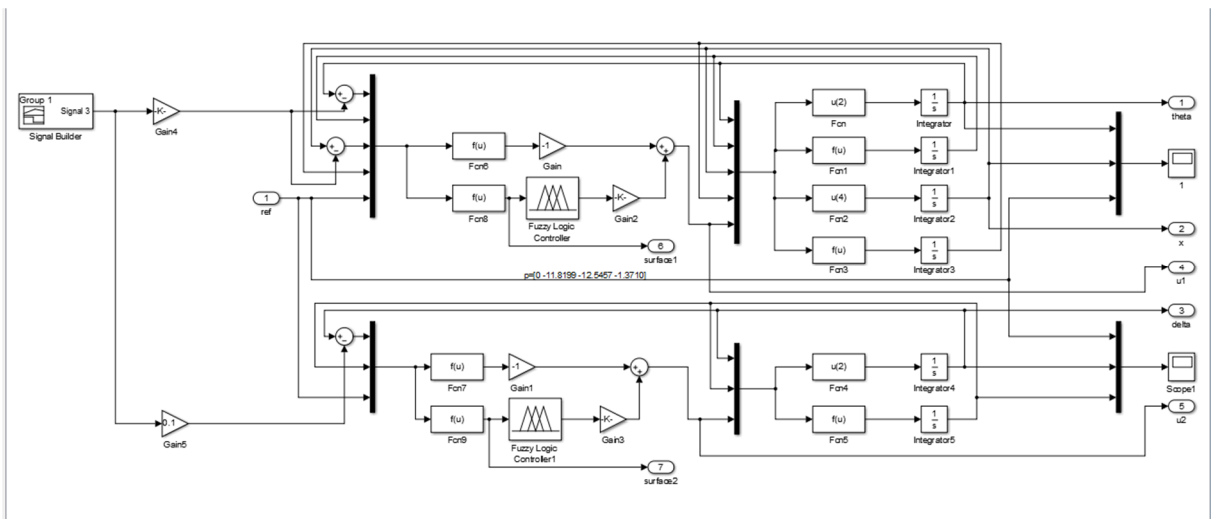
III. 3 Le fichier simulink avec une perturbation appliquée aléatoire(Gaussian) sur la sortie du robot.



IV.1 Le fichier simulink avec une perturbation appliquée sur l'entrée du robot.



IV.2 Le fichier simulink avec une perturbation appliquée sur la sortie du robot.



IV.3 Le fichier simulink avec une perturbation aléatoire(Gaussian) appliquée sur la sortie du robot.

الملخص:

تتمحور مذكرة التخرج حول موضوع النمذجة والتحكم في الروبوت المتوازن. حيث نقدم نبذة حول هذه الروبوتات وتطبيقاتها. ثم نقوم بإنشاء المعادلة العامة للحركة الحركية والديناميكية، ثم نحدد نموذجين ومتمثل في كل من توجيه الروبوت وتوازنه. للتحكم في الروبوت المتوازن، نقترح قانون مراقبة من قبل المتحكم المنزلق الغامض. ويستخدم هذا الأسلوب للسيطرة على أنظمة موازنة. لتقييم منهجية المراقبة، يتم تنفيذ المحاكاة على الروبوت للحركة في كل من توجيه الروبوت وتوازنه.

كلمات مفتاحية:

روبوت متوازن، النواس المقلوب، المنطق الضبابي، ومراقبة غامضة، المتحكم المنزلق

Résumé

Ce travail de fin d'études aborde le sujet de la modélisation et la commande d'un robot équilibriste. Nous présentons un état de l'art des robots équilibriste et leurs applications. Nous établissons une équation générale du mouvement cinématique et dynamique, ensuite nous définissons les modèles dans les deux plans direction et d'équilibre. Afin de commander le robot dans les deux plans, nous proposons une loi de commande par mode glissant flou. Cette approche est employée pour la commande des systèmes équilibriste. Afin d'évaluer la méthodologie de commande, des simulations sur le robot sont effectuées pour le mouvement dans les deux plans.

Mots-Clés : Robot équilibriste, pendule inversé, logique floue, commande floue, commande par mode glissant.