

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTROTECHNIQUE

OPTION : COMMANDES ELECTRIQUES

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : Ben kihoul Abde ssamed

Intitulé

Contribution à La Commande Non Linéaire D'un
Bras Manipulateur

Soutenu le 02/07/2022, devant le jury composé de :

BOUGUERRA Abderrahmen	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Président
LOUKAL Keltoum	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Rapporteur
ROUBACHE Toufik	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Examineur

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous remercions avant tout le bon *Dieu* de nous avoir donné la force et la volonté pour achever ce travail.

Je tiens à adresser mes plus vifs remerciements à notre promotrice M^{me} *LOUKAL Keltoum*, pour son aide, son soutien et ses conseils et suivi, et sa disponibilité à chaque instant qui m'ont fourni une grande motivation à accomplir ce travail.

Je tiens également à remercier mon professeur *BOUGUERRA Abderrahmen* et tous les enseignants qui nous aider pendant la période d'étude à l'université.

En fin, Je tiens à exprimer toute ma gratitude à tous ceux qui ont contribué, de près où de loin, à la concrétisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

- A mes chers parents.
- A mes chers frères et sœurs.
- A toute ma famille.
- A tous mes amis.
- A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.

Table des matières

Table des matières	I
Liste des figures	V
Liste des Tableaux.....	VII
Symboles	VIII
Introduction générale.....	1

Chapitre 01 : l'état de l'art et modélisation d'un bras manipulateur à 1ddl

1.1 Introduction	3
1.2 Historique	3
1.3 Définition d'un robot.....	3
1.4 Type de robot	3
1.4.1 Robot manipulateur	4
1.4.1.1 Applications des robots manipulateurs	4
1.4.2 Robot mobile	4
1.5 Robot industriel.....	5
1.6 Constituants d'un robot manipulateur	6
1.6.1 Un organe terminal	6
1.6.2 Une structure mécanique articulée	6
1.7 Description du robot manipulateur.....	6
1.8 Mouvement de robot	7
1.8.1 Les degrés de liberté (l.d.d.l)	7
1.8.2 Espace des coordonnées	7
1.8.2.1 Coordonnées opérationnelles (géométriques).....	7
1.8.2.2 Coordonnées généralisées (articulaires)	8
1.9 Les Avantages et inconvénients du robot.....	8

Table des Matières

1.9.1 Les Avantages.....	8
1.9.2 les inconvénients.....	8
1.10 Modélisation d'un bras manipulateur.....	8
1.10.1 Modélisation géométrique	8
1.10.1.1 Modèle géométrique direct (MGD)	9
1.10.1.2 Modèle géométrique inverse (MGI)	9
1.10.2 Modélisation cinématique.....	10
1.10.2.1 Modèle cinématique direct.....	10
1.10.2.2 Modèle cinématique inverse	10
1.10.3 Modélisation dynamique	11
1.10.3.1 Formalisme de Lagrange.....	12
1.10.4 Modélisation dynamique d'un bras manipulateur à 1 ddl	12
1.10.4.1 Simulation en boucle ouverte du bras manipulateur à 1 ddl.....	14
1.11 Commande PID	15
1.11.1 Application de la commande par PID d'un bras manipulateur à 1 ddl.....	16
1.11.2 Résultats de simulations	16
1.11.3 Interprétation les résultats de simulation	18
1.12 Conclusion.....	18

Chapitre 02 : Commande par mode glissant d'un bras manipulateur à 1ddl

2.1 Introduction	19
2.2 Principe de la commande par mode de glissement	19
2.3 Système à structure variable.....	20
2.4 Conception de la commande par mode glissant	21
2.5 Choix de la surface de glissement	21
2.6 Condition d'existence et de convergence.....	22

Table des Matières

2.7 La Fonction directe de commutation.....	22
2.8 La Fonction de Lyapunov	22
2.9 Calcul de la commande	23
2.10 le broutement (chattering).....	25
2.11 Solutions pour atténuer le phénomène de réticence :.....	26
2.11.1 Solution de couche limite :	26
2.11.2 Solution par des lois d’approche :	27
2.12 Application de la commande par mode de glissement au bras manipulateur à 1 ddl ...	28
2.12.1 Principe de fonctionnement	28
2.12.2 Présentation des résultats de simulation	29
2.12.3 Résultats de simulation.....	29
2.12.4 Commentaires sur les résultats	30
2.13 Conclusion.....	31

Chapitre 03 : commande par Logique floue type-1 et type-2 d’un bras manipulateur à 1ddl

3.1 Introduction	32
3.2 Historique	32
3.3 Domaines d’application.....	33
3.4 La logique floue type1.....	33
3.4.1 Introduction	33
3.4.2 Les concepts de bases	33
3.4.2.1 L’ensemble flou	33
3.4.2.2 Univers de discours.....	34
3.4.2.3 Les variables et les valeurs linguistiques	34
3.4.2.4 Fonction d’appartenance	34
3.4.2.5. Opérateurs de la logique floue	36

Table des Matières

3.4.2.6 Règles linguistiques	36
3.5 Structure d'un régulateur flou type 1	36
3.5.1 Fuzzification	37
3.5.2 Base de règle.....	37
3.5.3 Mécanisme d'inférence flou	38
3.5.4 Défuzzification	39
3.6 Logique floue type 2	39
3.6.1 Introduction	39
3.6.2 Concept de base.....	40
3.6.2.1 Les ensembles flous	40
3.6.3 Différents types d'ensembles flous type-2	42
3.6.4 Opération sur les ensembles flous type 2	43
3.7 Structure d'un contrôleur flou type 2	44
3.7.1 Fuzzification	44
3.7.2 Mécanisme d'inférence.....	44
3.7.3 Réduction de type	45
3.7.4 Défuzzification	46
3.8 Application de la commande logique floue type 1 du bras manipulateur à 1 ddl	46
3.9 Résultats de simulation de la commande floue type 1 du bras manipulateur à 1 ddl.....	48
3.10 Application de la commande logique floue type 2 du bras manipulateur à 1 ddl	50
3.11 Résultats de simulation de la commande floue type 2 du bras manipulateur à 1 ddl.....	51
3.12 Interprétation les résultats de simulation.....	54
3.13 Étude comparative entre les résultats de simulations des différentes lois de commande développées	54
3.14 Conclusion.....	56
Conclusion Générale	57
Annexe	58
Référence Bibliographiques	59

Liste des figures

Chapitre 01

Figure 1.1 Robot manipulateur.....	4
Figure 1.2 Robot Mobile	5
Figure 1.3 robots industriels de type SCARA.....	5
Figure 1.4 Structure générale du robot manipulateur.....	6
Figure 1.5 Description du robot manipulateur	6
Figure 1.6 bras manipulateur à 1 ddl.....	12
Figure 1.7 Schéma bloc du bras manipulateur à 1 ddl	14
Figure 1.8 la réponse du bras manipulateur à 1 ddl en BO.	15
Figure 1.9 Schéma block de régulateur PID	15
Figure 1.10 Schéma block de la commande PID d'un bras manipulateur à 1 ddl	16
Figure 1.11 Les réponses en BF pour une entrée échelon.....	17
Figure 1.12 Les réponses en BF pour une entrée sinusoïdale	18

Chapitre 02

Figure 2.1 Différents modes de convergence pour la trajectoire d'état	19
Figure 2.2 Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase	20
Figure 2.3 Représentation de la commande discontinue	24
Figure 2.4 Schéma de la commande par mode glissant	24
Figure 2.5 Le phénomène de broutement	25
Figure 2.6 Fonction saturation	25
Figure 2.7 fonction tangente hyperbolique	26
Figure 2.8 schéma block de la commande par la technique de mode glissant.....	28
Figure 2.9 Résultats de simulation de la commande par mode glissant, pour une entrée échelon.	29
Figure 2.10 Résultats de simulation de la commande par mode glissant, pour une entrée sinusoïdale.....	30

Chapitre 03

Figure 3.1 Schéma synoptique d'un contrôleur flou type 1	37
Figure 3.2 Représentation schématique d'un ensemble flou type-2 intervalle.	42
Figure 3.3 la région de l'incertitude	42
Figure 3.4 Schéma synoptique d'un contrôleur flou type 2	44
Figure 3.5 Opérations d'entrée d'un système flou type-2 avec fuzzification type singleton... ..	45
Figure 3.6 schéma block de la commande par logique floue type 1 d'un bras manipulateur à 1ddl.....	46
Figure 3.7 fonction d'appartenance de l'erreur.	47
Figure 3.8 fonction d'appartenance de la dérivée de l'erreur.....	47
Figure 3.9 fonction d'appartenance de la sortie.....	47
Figure 3.10 résultats de simulation de la commande par logique floue type 1, pour une entrée échelon	48
Figure 3.11 Résultats de simulation de la commande par logique floue type 1, pour une entrée sinusoïdale.....	49
Figure 3.12 schéma block de la commande par logique floue type 2 d'un bras manipulateur à 1 ddl.....	50
Figure 3.13 fonction d'appartenance de l'erreur	50
Figure 3.14 fonction d'appartenance de la dérivée de l'erreur.....	51
Figure 3.15 fonction d'appartenance de la sortie.....	51
Figure 3.16 résultats de simulation de la commande par logique floue type 2, pour une entrée échelon	52
Figure 3.17 résultats de simulation de la commande par logique floue type 2, pour une entrée sinusoïdale.....	53
Figure 3.18 La commande u et l'erreur e de la commande PID du bras manipulateur à 1 ddl.....	55
Figure 3.19 La commande u et l'erreur e de la commande par mode glissant du bras manipulateur à 1 ddl.....	55
Figure 3.20 La commande u et l'erreur e de la commande par la logique floue type-1 du bras manipulateur à 1 ddl.....	55
Figure 3.21 La commande u et l'erreur e de la commande par la logique floue type-2 du bras manipulateur à 1 ddl.....	56

Liste des Tableaux

Tableau 3.1 fonctions d'appartenance de la logique floue type 1	35
Tableau 3.2 Matrice d'inférence floue	38
Tableau 3.3 fonctions d'appartenance la logique floue type 2.....	43
Tableau 4.1 Étude comparative entre les commandes développées pour le bras manipulateur à 1 ddl.....	54

Symboles

$\boldsymbol{\tau}$: Le vecteur des couples/forces des actionneurs.

\boldsymbol{q} : Le vecteur des positions articulaire.

$\dot{\boldsymbol{q}}$: Le vecteur des vitesses articulaires.

$\ddot{\boldsymbol{q}}$: Le vecteur des accélérations articulaires.

n : Nombre de degré de liberté.

L : Lagrangien du système.

E_C : Énergie cinétique totale du système.

E_P : Énergie potentielle totale du système.

$\boldsymbol{\theta}$: Position angulaire.

l : Longueur du bras manipulateur.

m : La masse du bras manipulateur.

u : Couple moteur.

g : Accélération de la pesanteur.

J : Moment d'inertie du bras manipulateur.

K_d : Gain dérivé d'un PID.

K_i : Gain intégral d'un PID.

K_p : Gain proportionnel d'un PID.

s : La surface de glissement.

λ : Une constante positive.

r : Un degré relatif.

U : La commande par mode de glissement.

Symboles

U_{eq} : La commande équivalente.

U_n : La commande discontinue.

$U_A(x)$: Fonction d'appartenance d'une variable floue.

\bar{A} : Le complément de A de l'ensemble floue.

Min : Minimum.

Max : Maximum.

GN : Grand négatif.

PN : Petit négatif.

ZR : Zéro.

PP : Petit positif.

GP : Grand positif.

Introduction générale

Un robot est une science interdisciplinaire, est une machine capable d'effectuer des tâches et de manipuler des objets selon un programme de façon automatique. Ils sont généralement utilisés pour remplacer les humains dans des situations où ces derniers sont incapables d'effectuer le travail, des situations plus dangereuses, de haute précision ou répétitives. Ils sont de plus en plus utilisés en industrie, car ils sont très rapides et précis. La robotique comprend la mécanique, l'automatisation, l'électrotechnique, le traitement du signal, l'informatique, les communications... [4].

Actuellement, de plus en plus de robots sont créés dont la technicité et les compétences s'améliorent régulièrement.

La commande par modes glissants est une commande à structure variable. Elle est par nature une commande non linéaire. La commande par mode glissant a largement prouvé son efficacité à travers les études théoriques rapportées, ces principaux domaines d'application sont la robotique et les moteurs électriques. 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, comme le phénomène de chattering ou réticence provoquée par la partie discontinue de cette commande et qui peut avoir un effet néfaste sur les actionneurs [1].

La logique floue classique appelée aujourd'hui logique floue type-1 a été généralisée vers une nouvelle logique floue appelée logique floue type-2. Ces dernières années, Mendel et ses collègues ont beaucoup travaillé sur cette nouvelle logique et ils ont bâtis son fondement théorique [43][39][1].

La logique floue type-2 est très efficace dans les circonstances où il est très difficile de déterminer des fonctions d'appartenance exactes pour un système floue, par conséquent, cette Nouvelle logique va nous permettre d'incorporer des incertitudes dans les règles, ce qui va agir positivement sur la sortie du système [39][1].

L'objectif de ce travail est :

- Modélisation d'un bras manipulateur à 1ddl.
- Etude de la commande non linéaire et la synthèse des lois de commande.
- Application de la commande non linéaire sur d'un bras manipulateur à 1ddl.
- Etude comparative entre les différentes commandes proposées.

Ce mémoire, décomposé en quatre chapitres, est organisé de la façon suivante :

Introduction générale

Chapitre 1 : Nous avons présenté dans ce chapitre Généralités et la modélisation des Robots manipulateurs à 1ddl et simulation en boucle ouverte et la commande par PID.

Chapitre 2 : portera sur la théorie de la commande par mode glissant. On présentera l'application du principe de commande par mode glissant sur le modèle d'un bras manipulateur à 1ddl.

Chapitre 3 : Dans ce chapitre nous étudions une technique d'intelligence artificielles qui est la logique floue type 1 et type 2, nous présentons toutes les notions et les définitions nécessaire pour comprendre cette technique, ainsi nous définirons les contrôleurs flous, et nous appliquons ces commandes du bras manipulateur à 1ddl.

Chapitre 4 : étude comparative entre ces commandes est exposée en chapitre quatre celle-ci est accomplie sur la base des résultats obtenus par les simulations.

Enfin on terminera cette mémoire par une conclusion générale et les perspectives.

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les concepts, généraux théoriques et technologiques nécessaires pour mieux comprendre le fonctionnement des robots et quelques façons de créer un modèle de bras manipulateur.

Quel que soit l'objectif qu'on se fixe, concevoir, simuler ou commander un système mécanique, il est nécessaire, entre autres, de disposer de modèles du mécanisme à traiter. Plusieurs niveaux de modélisation sont possibles, qui dépendent des spécifications du cahier des charges de l'application envisagée : modèles géométriques, cinématiques ou dynamiques à partir desquels peuvent être engendrés les mouvements du robot, ou bien des modèles statiques qui décrivent les interactions du mécanisme avec son environnement.

1.2 Historique

1947 : Premier manipulateur électrique télé opéré.

1954 : Premier robot programmable.

1961 : Utilisation d'un robot industriel, commercialisé par la société UNIMATION (USA),
Sur une chaîne de montage de General Motors.

1961 : Premier robot avec contrôle en effort.

1963 : Utilisation de la vision pour commander un robot.

1973 : premier robot mobile à roues [1].

1.3 Définition d'un robot

D'après l'Association Française de Normalisation (AFNOR), un robot est un manipulateur commandé en position, reprogrammable, polyvalent, à plusieurs degrés de liberté, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés, au cours de mouvement variable et programmés pour l'exécution d'une variété de tâches.

Il a souvent l'apparence d'un ou plusieurs bras se terminant par un poignet. Son unité de commande utilise, notamment, un dispositif de mémoire et éventuellement de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances.

Ces machines polyvalentes sont généralement étudiées pour effectuer la même fonction de façon cyclique et peuvent être adaptées à d'autres fonctions sans modification permanente du matériel [2].

1.4 Type de robot

Il existe deux types des robots :

- Robot manipulateur.
- Robot mobile.

1.4.1 Robot manipulateur

La structure mécanique d'un robot manipulateur se compose d'une séquence de corps rigides (liens) interconnectées au moyen d'articulations, le manipulateur se caractérise par un bras qui assure la mobilité, un poignet qui confère de la dextérité et un effecteur qui effectue la tâche demandée au robot. Le robot manipulateur est un robot ancré physiquement sur leur lieu de travail et généralement mis en place pour une tâche précise répétitive [3].



Figure 1.1 : Robot manipulateur [3].

1.4.1.1 Applications des robots manipulateurs

Dans les entreprises manufacturières, des tâches pénibles, répétitives réalisées par des opérateurs humains, peuvent être avantageusement confiées à des systèmes mécaniques articulés (les manipulateurs) dont la dextérité est sans égaler celle de l'homme, suffisamment proches de celui-ci pour exécuter des mouvements complexes à l'image de ceux d'un bras humain [4].

1.4.2 Robot mobile

La principale caractéristique des robots mobiles est la présence d'une base mobile qui permet au robot de se déplacer librement dans l'environnement. Les robots mobiles peuvent se déplacer de manière autonome (dans une installation industrielle, un laboratoire, une surface planétaire, etc.) ç'est à dire sans l'aide d'opérateurs humains externes [3].



Figure 1.2 : Robot Mobile [3].

1.5 Robot industriel

Selon AFNOR (Association française de normalisation) Le robot industriel c'est un manipulateur commande en position, reprogrammable, polyvalent, à plusieurs degrés de liberté capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils ou des dispositifs spécialisés au cours des mouvements variables, et programme pour l'exécution d'une variété de tâches. Ils ont souvent l'apparence d'un ou plusieurs bras se terminant par un poignet. Son unité de commande utilise notamment un dispositif de mémoire et éventuellement de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances [5].

La figure ci-après illustre deux exemples des robots industriels [6] :



(a): robot EPSON. (b): robot SAMSUNG.

Figure 1.3 : robots industriels de type SCARA [6].

1.6 Constituants d'un robot manipulateur

Les bras manipulateurs est constitué de deux parties distinctes :

1.6.1 Un organe terminal

C'est un dispositif d'interaction fixé à l'extrémité mobile de la structure mécanique, il regroupe les procédés destinés à manipuler des objets, ou à les transformer, il s'agit donc d'une interface permettant au robot d'interagir avec son environnement [7].

1.6.2 Une structure mécanique articulée

Les membres rigides, liaisons articulées par des joints mécaniques à son extrémité l'outil ou effecteur (organe terminal) [7].

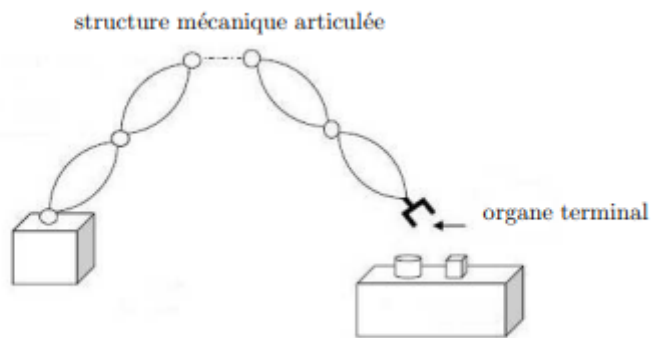


Figure 1.4 : Structure générale du robot manipulateur [7].

1.7 Description du robot manipulateur

Description du robot dans son environnement en quatre composantes interagissant figure 1.4

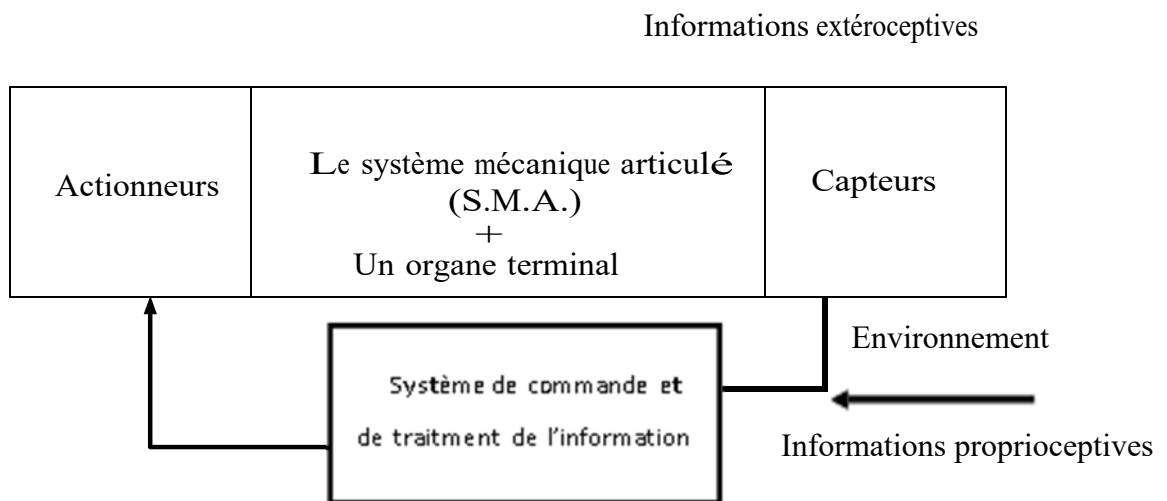


Figure 1.5: Description du robot manipulateur [8].

- **Système mécanique articulé** : C'est une chaîne cinématique, à corps généralement rigides (segments), assemblés par des liaisons (articulations).

Les articulations sont des dispositifs se trouvant entre deux segments. Ils lient deux corps successifs ; cette disposition permet le mouvement entre ces corps, ce qui a comme conséquence l'obtention d'un mouvement relatif des segments voisins. Cette structure articulée supporte l'organe terminal à situer, son rôle est de l'amener à une position et une orientation donnée [8].

- **Actionneurs** : C'est l'organe qui anime la structure mécanique par la conversion de l'énergie source en énergie mécanique. On dispose de deux types d'actionneurs [9] :

a) Actionneurs électriques : Essentiellement des moteurs, leurs types différents suivant le domaine d'utilisation, on trouve les moteurs à courant continu, pas à pas, hybrides, synchrones ou autos pilotées, etc....

b) Actionneurs pneumatiques et hydrauliques : Le transfert de l'énergie est réalisé par des vérins linéaires, angulaires, rotatifs, simple effet, double effet, incrémentaux, etc....

- **Les capteurs** : Capteurs proprioceptifs dont le but est de fournir l'information sur la configuration du manipulateur.

Capteurs extéroceptifs dont le but est donné des informations sur l'environnement

- **Unité de contrôle** : Rôle d'information : collecter l'information venant des capteurs.
Rôle de décision : partant d'une tâche définie et tenant compte des données du système et de l'environnement, établir des actions rôle de communication [8].

1.8 Mouvement de robot

1.8.1 Les degrés de liberté (d.d.l)

En robotique, le nombre de degrés de liberté (N.D.L) d'un manipulateur est le nombre de paramètres indépendants nécessaire pour décrire la situation de l'organe terminal [9].

1.8.2 Espace des coordonnées

Pour définir correctement le mouvement de l'organe terminal (trajectoire, vitesse et accélération), il faut choisir un repère de coordonnées en rapport avec le nombre et le type des (d.d.l). On distingue deux types de coordonnées [10] :

1.8.2.1 Coordonnées opérationnelles (géométriques)

Elles permettent de caractériser et de mesurer les composantes de l'état (position et orientation) d'un repère orthonormé direct lié à l'organe terminal, par rapport à un repère fixe lié à la base du robot [9].

1.8.2.2 Coordonnées généralisées (articulaires)

On appelle coordonnées généralisées la quantité définissant le mouvement relatif du corps (segments) C_i par rapport au corps C_{i-1} , on note la variable articulaire q_i , elle peut être un angle autour d'un axe (liaison de translation).

L'ensemble q_i , permet de définir les différentes configurations d'un robot manipulateur [10].

1.9 Les Avantages et inconvénients du robot

1.9.1 Les Avantages

- Les robots augmentent la productivité, la sécurité, l'efficacité, qualité et cohérence des produits.
- Les robots peuvent traiter plusieurs tâches simultanément.
- Les robots peuvent fonctionner dans des environnements dangereux sans besoin [3].

1.9.2 Les inconvénients

- Les robots n'ont pas la capacité de répondre en cas d'urgence.
- Les robots sont coûteux, en raison du coût initial de l'équipement, coûts d'installation, besoin de périphériques, de formation et de programmation.
- Remplacement du travail humain (plus de chômage) [3].

1.10 Modélisation d'un bras manipulateur

Pour commander le comportement d'un système mécanique articulé (robot), on doit disposer d'un modèle à plusieurs niveaux de modélisation selon les objectifs, les contraintes de la tâche à réaliser et les performances recherchées. Les niveaux de modalisation des systèmes robotisés peuvent être résumés comme suit :

- Les modèles géométriques directs et inverses expriment la situation de l'organe terminal en fonction des variables articulaires et inversement.
- Les modèles cinématiques directs et inverses expriment les vitesses de l'organe terminal en fonction des variables articulaires et inversement.
- Les modèles dynamiques expriment les équations du mouvement du robot qui permettent d'établir les relations entre les couples ou forces exercées par les actionneurs et les positions, vitesses et accélérations des articulations [11].

1.10.1 Modélisation géométrique

La modélisation géométrique permet d'exprimer la situation de l'organe terminal en fonction de la configuration du mécanisme et inversement. On distingue deux modèles :

- Modèle géométrique direct.
- Model géométrique inverse.

1.10.1.1 Modèle géométrique direct (MGD)

Le modèle géométrique d'un mécanisme regroupe les contraintes géométriques qui doivent être respectées par les variables articulaires θ_i (ou bien q_i) afin d'établir la relation entre la configuration du mécanisme définie dans l'espace des coordonnées généralisées et la configuration du mécanisme décrite dans le repère cartésien [12].

Le modèle géométrique direct est unique et est donne sous forme d'équations explicites.

$$x_i = f(\theta_i) \quad (1.1)$$

Où :

$\theta = [\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_3]^T \in R^n$: Vecteur des variables articulaires.

$\theta = [x_1 + x_2 + \dots + x_3]^T \in R^n$: Vecteur des variables opérationnelles.

1.10.1.2 Modèle géométrique inverse (MGI)

Le modèle géométrique inverse permet de déterminer le vecteur des variables articulaires à partir du vecteur de coordonnées opérationnelles, le modèle s'écrit :

$$\theta = f^{-1}(x) \quad (1.2)$$

Parmi les méthodes utilisées pour déterminer le modèle géométrique inverse on cite :

- **Les méthodes géométriques** : permettent de déterminer le vecteur q par utilisation des transformations géométriques en prenant avantage de la structure particulière du manipulateur considéré.
- **Les méthodes algébriques** : permettent de déterminer le vecteur θ en effectuant des transformations algébriques sur l'équation (I.3). Parmi les méthodes utilisées on cite la méthode de Paul [7] qui consiste à multiplier successivement les deux membres du modèle géométrique direct par les matrices homogènes T_{i-1}^i avec ($i=1 \dots n-1$) permettant ainsi d'isoler et d'identifier les variables articulaires l'une après l'autre.

Lors de la résolution du problème géométrique inverse on rencontre pratiquement les situations suivantes [7].

- Solutions en nombre fini, lorsqu'elles peuvent être calculées sans ambiguïté.
- Aucune solution possible lorsque la position désirée ne peut être atteinte par le manipulateur.
- Plusieurs solutions possibles lorsque le manipulateur est redondant ou lorsqu'il passe par une configuration singulière.

1.10.2 Modélisation cinématique

Le modèle cinématique est, littéralement, un modèle des vitesses. Il exprime les relations entre les vitesses articulaires de chaque axe et les vitesses cartésiennes d'un point de la chaîne cinématique, généralement l'organe terminal.

Le modèle cinématique permet donc non seulement de compléter éventuellement le modèle géométrique en tenant compte des vitesses, mais aussi de remplacer le modèle géométrique [11].

1.10.2.1 Modèle cinématique direct

Le modèle cinématique directe permet de déterminer la vitesse de l'organe terminal dans l'espace opérationnel en fonction de la vitesse des variables articulaires.

Le modèle est décrit par l'équation :

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (1.3)$$

Où $J(q) \in R^{m \times n}$ est la matrice Jacobéenne. L'intérêt de la matrice jacobéenne est multiple [13] :

- Elle est à la base du modèle différentiel inverse, permettant de calculer une solution locale des variables articulaires q connaissant les coordonnées opérationnelles X ;
- En statique, on utilise le jacobéen pour établir la relation liant les efforts exercés par l'organe terminal sur l'environnement aux forces et couples des actionneurs ;
- Elle facilite le calcul des singularités et de la dimension de l'espace opérationnel accessible du robot.

L'une des méthodes utilisées pour le calcul de la matrice jacobéenne est la dérivation du modèle géométrique direct :

$$J(q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial q_n} \end{bmatrix}$$

1.10.2.2 Modèle cinématique inverse

L'objectif du modèle cinématique inverse est de calculer, à partir d'une configuration q donnée, les vitesses articulaires \dot{q} qui assurent au repère terminal une vitesse opérationnelle X imposée. Cette définition est analogue à celle du modèle différentiel inverse : ce dernier permet de déterminer la différentielle articulaire dq correspondant à une différentielle des coordonnées

opérationnelles dx spécifiée. Pour obtenir le modèle cinématique inverse, on inverse le modèle cinématique directe en résolvant un système d'équations linéaires.

Il existe plusieurs méthodes pour la détermination du modèle cinématique inverse en considérant trois cas, selon que le manipulateur est régulier, en configuration singulière ou redondant. Ces méthodes sont soit analytiques, soit numériques.

- La solution analytique : les méthodes analytiques conviennent pour résoudre le problème inverse lorsque la matrice jacobéenne associée au mécanisme est régulière. Leur mise en œuvre est simplifiée lorsque le poignet du mécanisme possède trois articulations rotondes d'axes concourants : le problème se réduit alors à l'inversion de deux matrices régulières d'ordre trois. Elle a l'avantage de diminuer considérablement le nombre d'opérations, mais on doit traiter séparément tous les cas singuliers [12].
- Les méthodes numériques : sont plus générales, la plus répandue étant fondée sur la notion de pseudo-inverse : les algorithmes traitent de façon unifiée les cas réguliers, singuliers et redondants. Elles nécessitent un temps de calcul relativement important.

1.10.3 Modélisation dynamique

Le modèle dynamique d'un bras manipulateur est décrit par un ensemble d'équations mathématiques portant sur les informations dynamiques de ce robot.

Ces équations peuvent être intégrées afin de simuler le comportement du robot pour une loi de commande sur un ordinateur et ce pour analyser les réponses et les performances ainsi que les objectifs de commande à atteindre [6].

L'établissement de ces équations dynamiques peut se faire par l'application des lois de la mécanique classique entre autres les lois d'Euler-Lagrange et de Newton-Euler.

Le modèle dynamique établit ainsi la relation entre les couples et/ou force développés par les actionneurs, d'une part, et les positions, vitesse et accélération articulaires d'autre part [6].

Pour un bras manipulateur à n degrés de liberté (n.ddl) sa relation a souvent la forme ci-après :

$$\tau = f(q, \dot{q}, \ddot{q}) \quad (1.4)$$

$\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T$: est le vecteur des couples/forces des actionneurs, selon que l'articulation est rotonde (mouvement de rotation) ou prismatique (mouvement de translation).

$q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$: est le vecteur des positions articulaire.

\dot{q} est le vecteur des vitesses articulaires ($\dot{q} = \frac{dq}{dt}$).

\ddot{q} est le vecteur des accélérations articulaires ($\ddot{q} = \frac{d^2q}{dt^2}$).

Plusieurs formalismes ont été utilisés pour obtenir le modèle dynamique des robots. Les formalismes les plus souvent utilisés sont :

- Le formalisme de Lagrange.
- Le formalisme de Newton-Euler.

On va se consacrer sur le premier formalisme car c'est la méthode la plus simple compte tenu de ces objectifs [6].

1.10.3.1 Formalisme de Lagrange

Le formalisme de Lagrange décrit les équations du mouvement en termes de travail et d'énergie du système, ce qui se traduit, lorsque l'effort extérieur sur l'organe terminal est supposé nul, par l'équation suivante [12] :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial l}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial l}{\partial q} = \tau_i \quad (1.5)$$

- $i = 1, \dots, n$.
- $n =$ nombre de degré de liberté.
- $L =$ lagrangien du système égal à $Ec - Ep$.
- $Ec =$ énergie cinétique totale du système.
- $Ep =$ énergie potentielle totale du système.

1.10.4 Modélisation dynamique d'un bras manipulateur à 1ddl

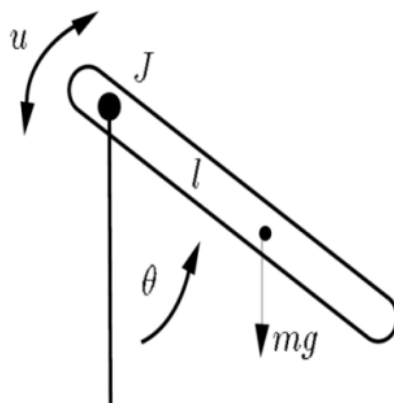


Figure 1.6: bras manipulateur à 1ddl.

- θ : Position angulaire.
- l : Longueur du bras.
- m : la masse.
- u : Couple moteur.
- g : Accélération de la pesanteur.
- $J = ml^2$: Moment d'inertie du bras.

Tout d'abord, on va décrire le comportement du bras manipulateur sous forme d'un modèle de connaissance, et pour cela on introduit le Lagrangien suivant :

$$L = E_c - E_p \tag{1.6}$$

$$E_c = \frac{1}{2}ml^2\dot{\theta}^2 \tag{1.7}$$

$$E_p = mg(1 - \cos(\theta)) \tag{1.8}$$

Tel que :

E_c : L'énergie cinétique.

E_p : L'énergie potentielle.

l : La longueur du bras manipulateur.

θ : Position angulaire.

On aura, donc :

$$L = \frac{1}{2}ml^2\dot{\theta}^2 - mg(1 - \cos(\theta)) \tag{1.9}$$

Soit l'équation d'Euler Lagrange suivante :

$$\tau_i = \sum_{i=1}^n \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial l}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial l}{\partial \theta_i} \tag{1.10}$$

$n = 1$: Pour un degré de liberté.

$\tau = u$: Commande à l'entrée du système.

Les équations différentielles sont données comme suit :

$$\frac{\partial l}{\partial \theta} = ml^2\dot{\theta} \tag{1.11}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial l}{\partial \dot{\theta}} \right) = ml^2 \ddot{\theta} \quad (1.12)$$

$$\frac{\partial l}{\partial \theta} = -mgl \sin(\theta) \quad (1.13)$$

D'après l'expression de Lagrange, on exprime l'équation du système comme suit :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial l}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial l}{\partial \theta} = u \quad (1.14)$$

$$ml^2 \ddot{\theta} + mgl \sin(\theta) = u \quad (1.15)$$

L'équation du système peut encore s'écrire :

$$\ddot{\theta} = -\frac{g}{l} \sin(\theta) + \frac{1}{ml^2} u \quad (1.16)$$

1.10.4.1 Simulation en boucle ouverte du bras manipulateur à 1ddl

Les paramètres du bras manipulateur à 1ddl :

$$l = 1\text{m} ; \quad g = 10 \text{ m/s}^2 ; \quad m = 0.25 \text{ kg}$$

$$T = 50 \text{ sec} ; \quad \theta_d = 5 \text{ degré}$$

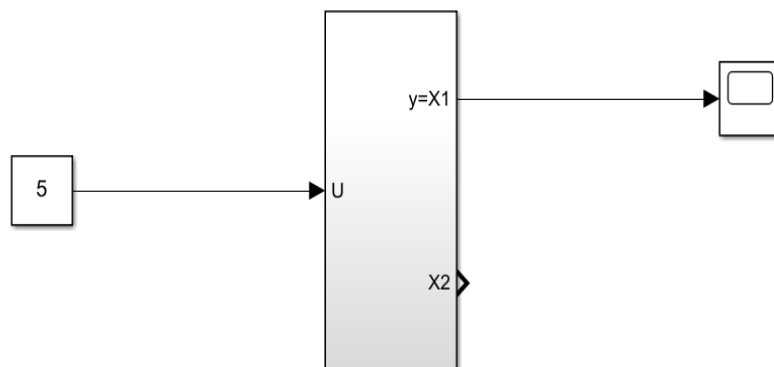


Figure 1.7 : Schéma bloc du bras manipulateur à 1ddl.

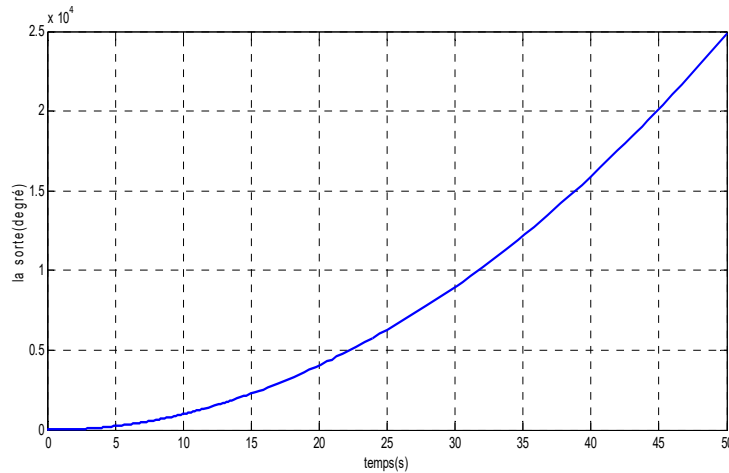


Figure 1.8 : la réponse du bras manipulateur à 1ddl en BO.

1.11 Commande PID

Un contrôleur PID est essentiellement un mécanisme de rétroaction en boucle fermée générique. Surveille l'erreur entre la sortie du système mesurée et le point de consigne souhaité. A partir de cette erreur, un signal de commande est calculé pour ajuster les performances du processus. L'équation différentielle du contrôleur PID est [14] :

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^{t_f} e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt}$$

Où k_p , k_i et k_d sont respectivement les gains proportionnels, intégral et dérivé. La superposition de ces trois actions constitue le mécanisme d'ajustement des performances des processus comme le montre la figure :

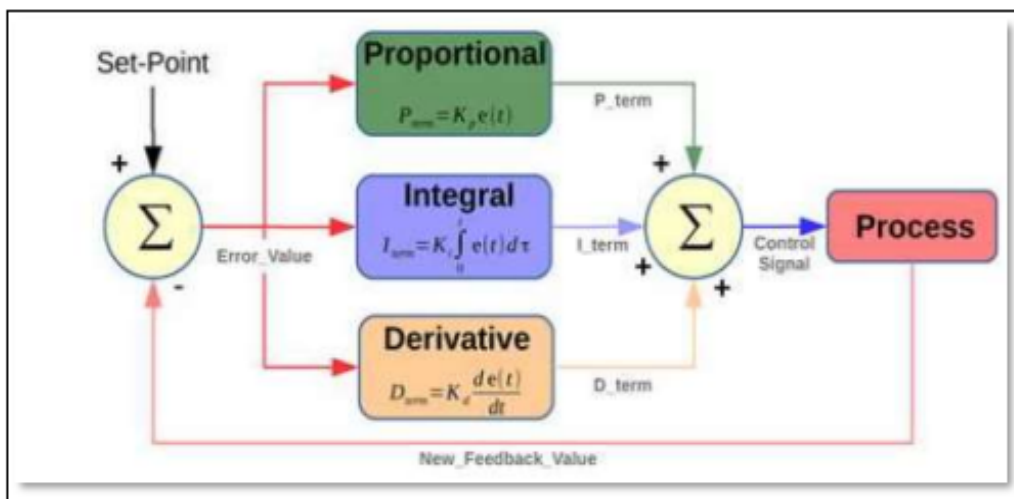


Figure 1.9 : Schéma block de régulateur PID [14].

1.11.1 Application de la commande par PID d'un bras manipulateur à 1ddl

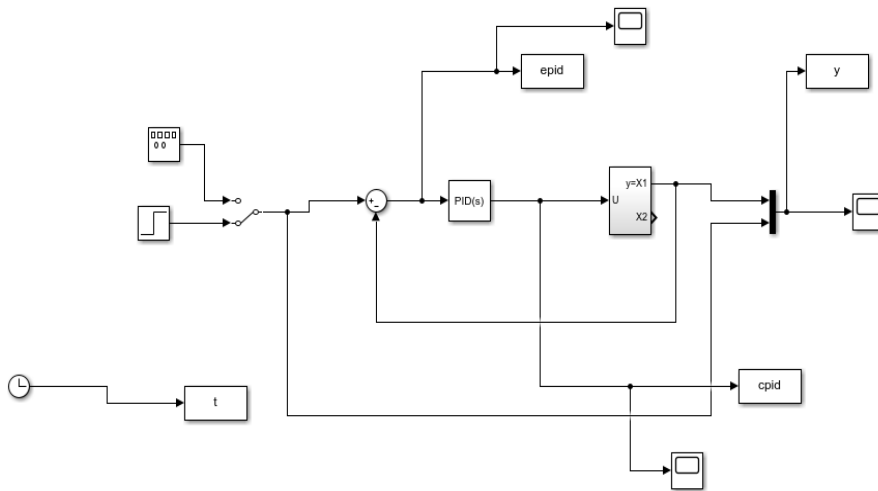
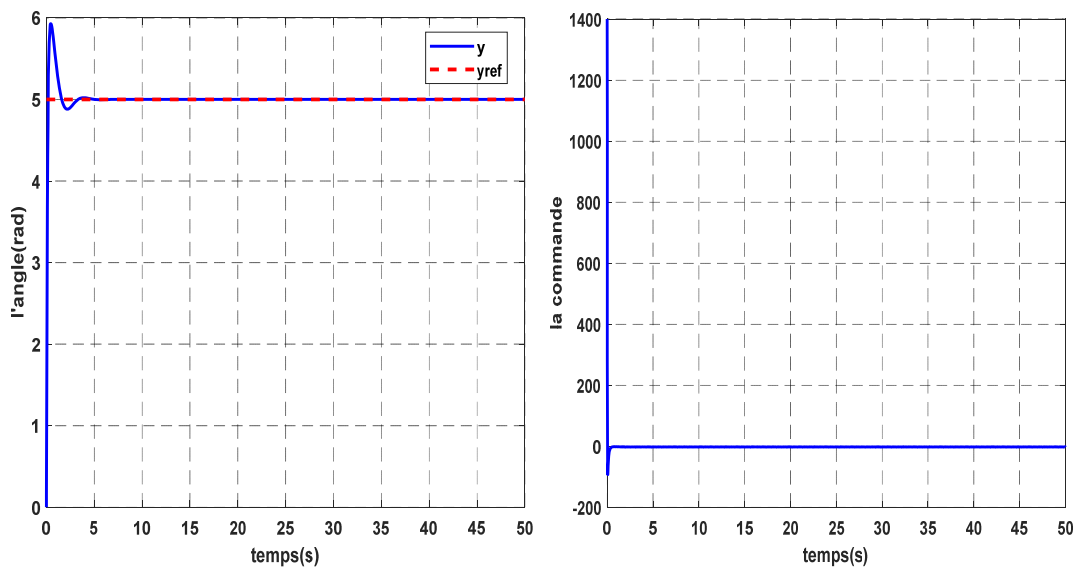


Figure 1.10 : Schéma block de la commande PID d'un bras manipulateur à 1ddl.

1.11.2 Résultats de simulations

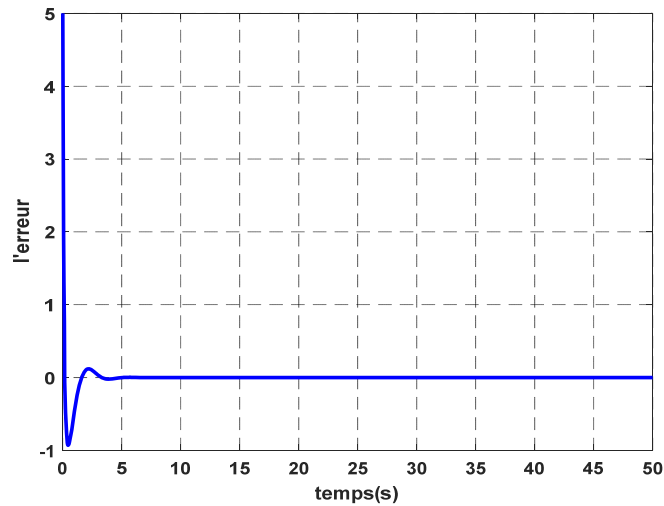
Les gains : $k_p = 5$; $k_i = 10$; $k_d = 2.75$

Les résultats de la position, la commande et l'erreur pour une référence échelon sont représentées par la figure 1.11 :



a) La sortie du système

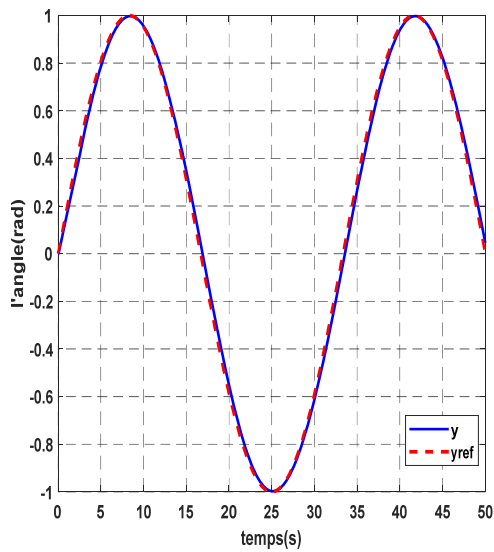
b) La commande



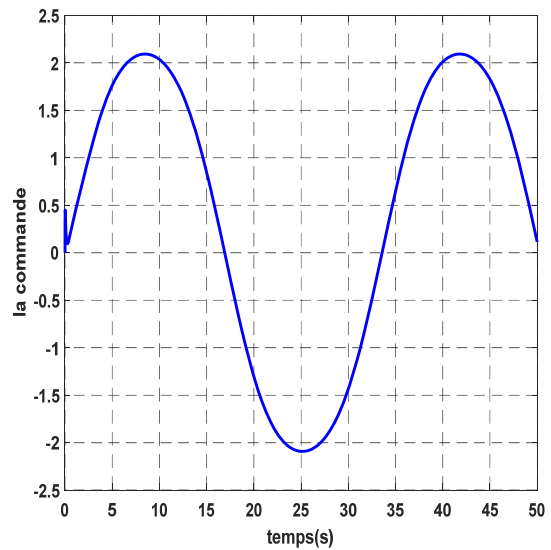
c) L'erreur

Figure 1.11 : Les réponses en BF pour une entrée échelon

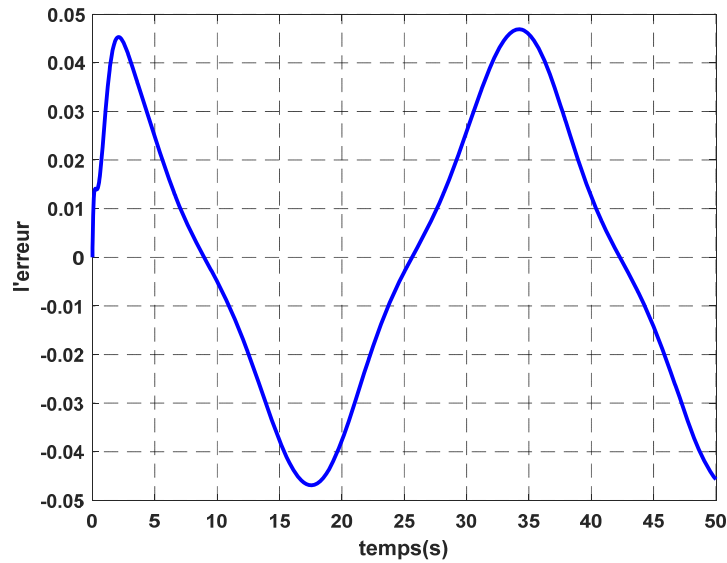
Les résultats de la position, la commande et l'erreur pour une référence sinusoïdale (amplitude 1 et la fréquence 0.03 Hz) représentées par la figure 1.12:



a) La sortie du système



b) La commande



c) L'erreur

Figure 1.12 : Les réponses en BF pour une entrée sinusoïdale.

1.11.3 Interprétation les résultats de simulation

A partir de ces figures nous pouvons constater, que les erreurs de régulation et de poursuite et la valeur du dépassement sont faibles (figures 1.11 et 1.12). Nous pouvons également constater que les signaux de commande sont relativement lisses.

1.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni des concepts de base et des définitions pour comprendre la robotique et nous expliquons les différents modèles utilisés pour décrire les mouvements articulés d'un bras manipulateur, dans le but de fournir des équations mathématiques qui permettent la programmation, le contrôle et l'exécution des tâches requises. Le bras manipulateur à 1ddl est un modèle non linéaire avec une seule entrée et une sortie. Un test de simulation en boucle ouverte est présenté pour illustrer le comportement du système par rapport aux variations de l'angle de position de sortie, alors notre système sera instable et nous avons fait la commande par le régulateur PID. Dans le chapitre suivant une approche utilisant un système de contrôle basé sur la commande par mode glissant sera introduite.

2.1 Introduction

Pour qu'un robot manipulateur accomplisse la tâche qui lui est assigné, il faut concevoir une commande bien adaptée. La commande par modes glissants est une commande à structure variable. Elle est par nature une commande non linéaire. La caractéristique principale des systèmes à structure variable est que la loi de commande se modifie d'une manière discontinue. La commande par mode glissant a largement prouvé son efficacité à travers les études théoriques rapportées, ces principaux domaines d'application sont la robotique et les moteurs électriques. 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, comme le phénomène de chattering ou réticence provoqué par la partie discontinue de cette commande et qui peut avoir un effet néfaste sur les actionneurs.

2.2 Principe de la commande par mode de glissement

La commande par mode glissant est une commande robuste qui se base sur le concept de changement de structure du contrôleur avec l'état du système afin d'obtenir la réponse désirée.

Le contrôle généré par la commande par mode glissant est du type tout ou rien.

Dans ce type de commande, l'état du système définit l'état de commutation de l'ordre de contrôle. L'idée est de diviser l'espace d'état par une frontière de décision appelée surface de glissement, qui délimite deux sous espaces correspondant à deux états possibles de l'organe de commande (Figure 2.1). La stabilisation sur la surface d'une commutation à chaque franchissement de la frontière de décision [15].

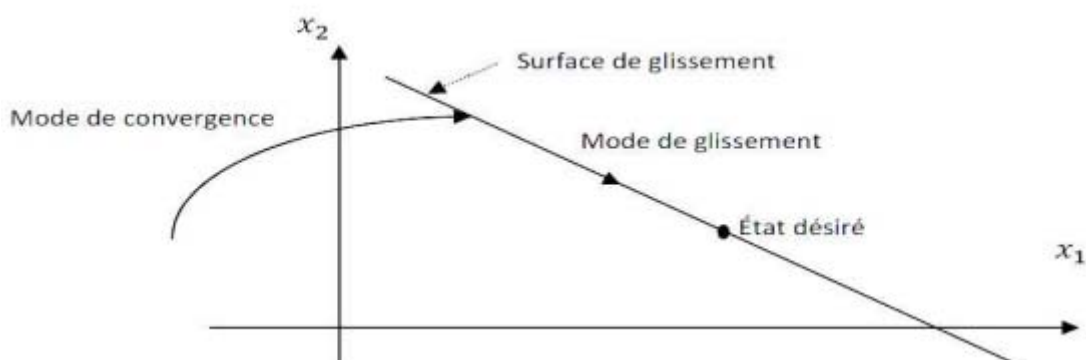


Figure 2.1: Différents modes de convergence pour la trajectoire d'état

2.3 Système à structure variable

Un système à structure variable est un système dont la structure change pendant son fonctionnement. Il est caractérisé par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à une autre à tout instant. De plus, un tel système peut avoir de nouvelles propriétés qui n'existent pas dans chaque structure.

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 et appelé mouvement de glissement [16].

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

- 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 le 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 du régime permanent (MRP) : ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine du plan de phase), il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande [1].

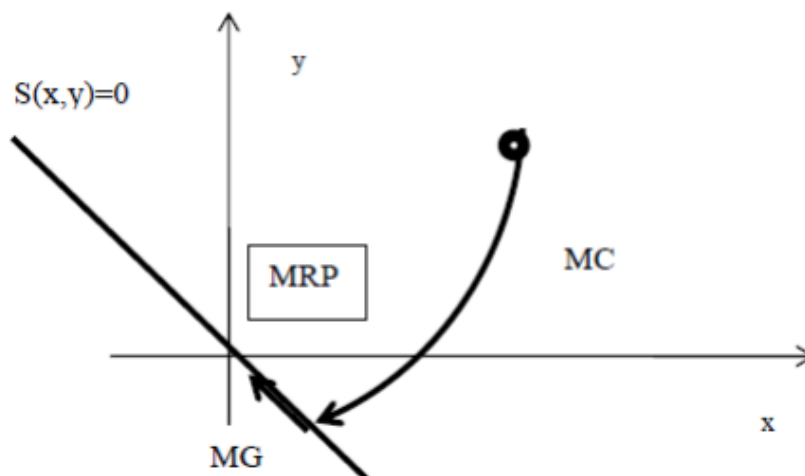


Figure 2.2: Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase [15].

2.4 Conception de la commande par mode glissant

Les avantages de la commande par mode glissant sont importants et multiples, entre autres, la haute précision, la bonne stabilité, la simplicité, l'invariance, la robustesse...etc. Ceci lui permet d'être particulièrement adaptée pour les systèmes ayant des modèles imprécis [17].

La conception de la commande peut être effectuée en trois étapes principales très dépendantes l'une de l'autre :

- Choix de la surface.
- Etablissement des conditions d'existence.
- Détermination de la loi de commande.

2.5 Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces mais également leur forme, en fonction de l'application et de l'objectif visé. En général, pour un système défini par l'équation d'état suivante [2] :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (2.1)$$

Il faut choisir « m » surfaces de glissement, pour un vecteur [U] de dimension « m ».

Pour ce qui est de la forme de la surface. Nous proposons une forme d'équation générale pour déterminer la surface de disc.

$$s(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right)^{r-1} e(x) \quad (2.2)$$

Avec :

- $e(x)$: est l'écart entre la variable à régler et sa référence.
- λ : est une constante positive.
- r : est un degré relatif, il présente le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire apparaitre la commande.

L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x)=0$ pour un choix convenable du paramètre, ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire qui est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart tout en respectant la condition de convergence.

2.6 Condition d'existence et de convergence

Les conditions d'existence de convergences sont les critères qui permettent en dynamique du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment à la perturbation. Il y'a deux considérations correspondantes au mode convergence de l'état du système [18].

2.7 La Fonction directe de commutation

C'est la première condition de convergence (attractivité). Elle est proposée et étudiée par EMILYANOV et UTKIN [19] [20].

Il s'agit de donner, à la surface une dynamique convergente vers zéro. Elle est formulée par :

$$\begin{aligned} \dot{s}(x) > 0 \text{ Lorsque } s(x) < 0 \\ \dot{s}(x) < 0 \text{ Lorsque } s(x) > 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Cette condition peut être donnée autrement par :

$$\dot{s}(x) s(x) < 0 \quad (2.4)$$

2.8 La Fonction de Lyapunov

La détermination du domaine de glissement peut se ramener à l'étude de la stabilité du système en régime glissant. Cette étude est basée sur l'utilisation de la fonction de Lyapunov [18].

La fonction de Lyapunov est une fonction scalaire positive ($v(x) > 0$) pour les variables d'états de système et la loi de commande doit faire décroître cette fonction ($\dot{v}(x) < 0$). L'idée de base est de choisir une fonction scalaire $s(x)$ pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence et de construire une commande U tel que le carrée de la surface correspond à une fonction de Lyapunov qui est définie par :

$$V(x) = \frac{1}{2} s^2(x) \quad (2.5)$$

En dérivant cette dernière, on obtient :

$$\dot{v}(x) = \dot{s}(x)s(x) \quad (2.6)$$

Pour que la fonction candidate de Lyapunov puisse décroître, il suffit d'assurer que :

$$\dot{v}(x) < 0$$

Pour que la fonction $v(x)$ décroisse, il faut s'assurer que sa dérivée est négative. Ceci n'est permis que si la condition (2.5) est vérifiée. L'équation (2.6) explique que le carrée de la distance vers la surface mesurée par $s_2(x)$ diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface dans les deux côtés [16].

2.9 Calcul de la commande

La forme de la commande par mode de glissement est constituée de deux parties :

La commande équivalente (u_{eq}) et la commande discontinue (u_n).

D'où :

$$u = u_{eq} + u_n \quad (2.7)$$

u_{eq} : corresponde donc à la commande proposée par UTKIN [20], elle sert à maintenir la dynamique du système commandé sur la surface de glissement $s(x) = 0$ et la dérivée de la surface de glissement soit nulle $\dot{s}(x) = 0$.

u_n : est déterminé pour vérifier la condition de convergence.

$$\dot{s}(x) = 0. \quad (2.8)$$

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial s}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (2.9)$$

En remplaçant (2.1) et (2.7) dans (2.9), nous trouvons :

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} (f(x) + g(x) u_{eq}) + \frac{\partial s}{\partial x} g(x) u_n \quad (2.10)$$

Avec :

$$u_n = -K \text{sign}(s(x, t))$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle, et par conséquent, sa dérivée ($\dot{s}(x) = 0$) et la partie discontinue sont aussi nulles ($u_n = 0$). D'où nous déduisons l'expression de la commande équivalente :

$$u_{eq} = \left(\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right)^{-1} \frac{\partial s}{\partial x} f(x) \quad (2.11)$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que

$$\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \neq 0$$

Durant le mode de convergence, et en remplaçant la commande équivalent par son expression dans (2.10), nous trouvons la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$\dot{s}((x, t)) = \frac{\partial s}{\partial x} g(x) u_n \quad (2.12)$$

Et la condition d'attractivité exprimée par (2.4) devient :

$$s(x, t) \frac{\partial s}{\partial x} g(x) u_n < 0 \quad (2.13)$$

Afin de satisfaire cette condition, le signe de u_{nn} doit être opposé à celui de $s(x, t) \frac{\partial s}{\partial x} g(x)$. La forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'un relais de la figure 2.3[6].

$$u_n = -K \operatorname{sign}(s(x, t)) \tag{2.14}$$

Le signe de K doit être différent de celui de $\frac{\partial s}{\partial x} g(x)$

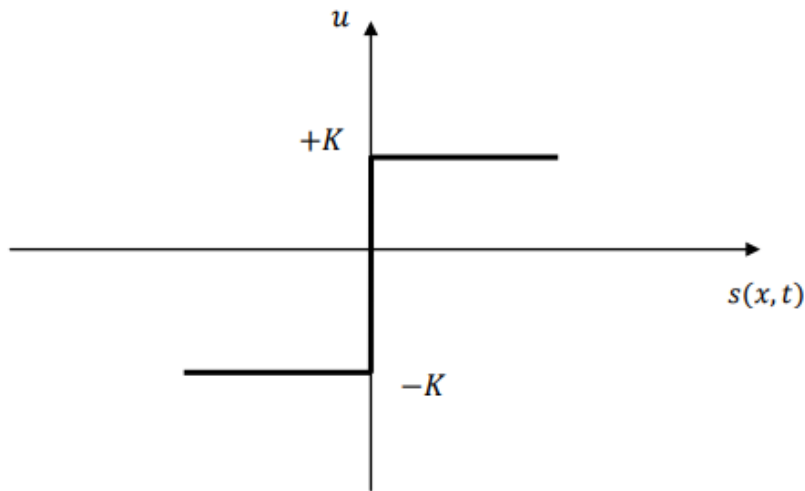


Figure 2.3: Représentation de la commande discontinue [6].

Donc la structure d'un contrôleur par mode glissant se compose de deux parties la linéarisation u_{eq} et l'autre stabilisante u_n .

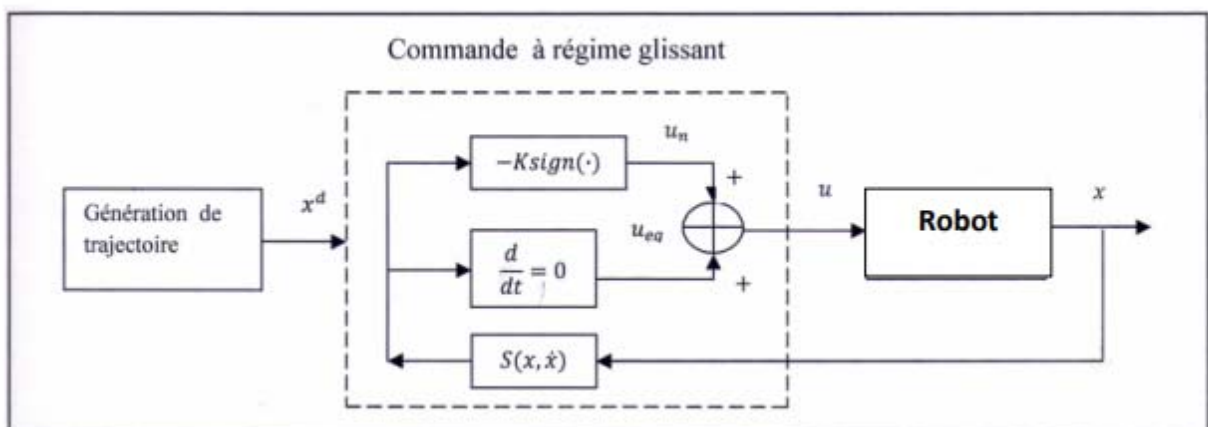


Figure 2.4: Schéma de la commande par mode glissant [18].

2.10 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 2.5). 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) [21].

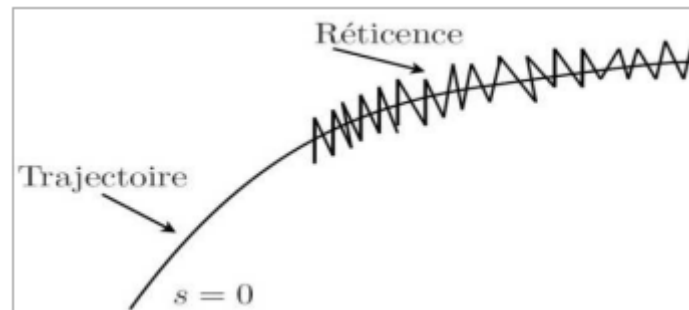


Figure 2.5: Le phénomène de broutement [21].

2.11 Solutions pour atténuer le phénomène de réticence

Dans le but de réduire ou d'éliminer ce phénomène, de nombreuses solutions ont été proposées, comme la solution de couche limite, fuzzy sliding mode, mode glissant d'ordre supérieur, approche Law, etc..... [16].

2.11.1 Solution de couche limite

Cette solution, connue aussi sous le nom de "boundary layer solution", consiste à remplacer la fonction signe par une approximation continue, de type grand gain, uniquement dans un voisinage de la surface. Parmi les fonctions utilisées nous citerons la fonction de saturation [22].

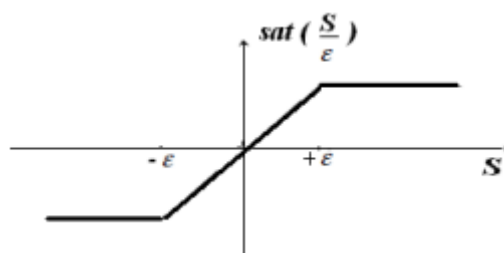


Figure 2.6: Fonction saturation [22].

$$sat(s) = \begin{cases} \frac{s}{\varepsilon} & si \left| \frac{s}{\varepsilon} \right| \leq 1 \\ sign(s) & si \left| \frac{s}{\varepsilon} \right| > 1 \end{cases} \quad (2.15)$$

ε : Largeur du seuil de la fonction de saturation.

D'autres fonctions existent telles que les fonctions, $\tan h(s/\varepsilon)$, $2\pi\arctan(s/\varepsilon)$)

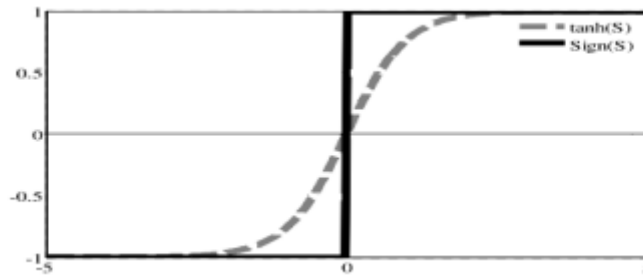


Figure 2.7: fonction tangente hyperbolique [22].

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 ε est petit, plus l'approximation tend vers la fonction signe, et donc meilleure est la robustesse, au détriment de la réduction du chattering [16].

2.11.2 Solution par des lois d'approche

Par ailleurs, une approche intéressante consiste à concevoir des lois de convergence non linéaires qui permettent une adaptation dynamique d'une composante de la commande en fonction de la variation de la fonction de glissement. Ainsi, plus le vecteur d'état est loin de la surface de glissement, plus cette composante est grande et tend à ramener le vecteur vers la surface de glissement, et inversement. Par conséquent, il est théoriquement possible de réduire les commutations haute fréquence en régime établi, sans toutefois affecter le temps de convergence ni même l'erreur de poursuite du système. Gao et Hung ont proposé notamment Deux lois d'atteinte possibles pour réduire les commutations [1].

La première loi d'atteinte contient un terme proportionnel à la fonction de glissement qui permet au système d'atteindre plus rapidement la surface de glissement lorsque celui-ci en est éloigné. De plus, le terme proportionnel allège le travail de la partie discontinue $sign(s)$ et permet par

conséquent une réduction des commutations sur la commande. Cette loi d'atteinte est donnée par :

$$\dot{s}(x) = -k \cdot \text{sign}(s) - Q \cdot s \quad (2.16)$$

Dans la deuxième loi de convergence figure une puissance fractionnaire de la fonction de glissement qui multiplie le signe de celle-ci, comme suit :

$$\dot{s}(x) = -k \cdot |s|^p \cdot \text{sign}(s) \quad (2.17)$$

Où p est un réel strictement compris entre 0 et 1. Il est par ailleurs démontré par Gao et Hung [22]. Que la loi de convergence (2.17) engendre un temps d'atteinte fini de la surface de glissement.

2.11.3 Solution par des modes glissants d'ordre supérieur

Les modes glissants d'ordre supérieur ont été introduits pour pallier au problème du chattering tout en gardant les propriétés de convergence en temps fini et de robustesse des commandes par modes glissants classiques. Dans cette approche, le terme discontinu n'apparaît plus directement dans l'expression de la commande synthétisée mais dans une de ses dérivées supérieures ce qui a le mérite de réduire le Chattering [21] [23].

2.12 Application de la commande par mode de glissement au bras manipulateur à 1ddl

2.12.1 Principe de fonctionnement

On a :

$$\ddot{\theta} = -\frac{g}{l} \sin(\theta) + \frac{1}{ml^2} u \quad (2.18)$$

En pose : $x_1 = \theta$ et $x_2 = \dot{\theta}$ donc :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{\theta} = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{\theta} = -\frac{g}{l} \sin(x_1) + \frac{1}{ml^2} u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (2.19)$$

Alors :

$$y = x_1 \quad (2.20)$$

$$y^{(1)} = \dot{x}_1 = x_2 \quad (2.21)$$

$$y^{(2)} = \dot{x}_2 = -\frac{g}{l} \sin(x_1) + \frac{1}{ml^2} u \quad (2.22)$$

$$r = 2$$

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{r-1} e$$

$$s = \dot{e} + \lambda e \quad (2.23)$$

$$e = x_{1d} - x_1 \quad (2.24)$$

$$\dot{e} = \dot{x}_{1d} - \dot{x}_1$$

$$\dot{e} = \dot{x}_{1d} - x_2 \quad (2.25)$$

$$\ddot{e} = \ddot{x}_{1d} - \dot{x}_2$$

$$\ddot{e} = \ddot{x}_{1d} + \frac{g}{l} \sin(x_1) - \frac{1}{ml^2} u \quad (2.26)$$

$$\dot{s} = \ddot{e} + \lambda \dot{e} \quad \text{et} \quad \dot{s} = -k \text{sign}(s)$$

$$\dot{s} = \ddot{x}_{1d} + \frac{g}{l} \sin(x_1) - \frac{1}{ml^2} u + \lambda(\dot{x}_{1d} - x_2) = -k \text{sign}(s) \quad (2.27)$$

La loi de commande est comme suit :

$$u = ml^2 \left(\ddot{x}_{1d} + \frac{g}{l} \sin(x_1) + \lambda(\dot{x}_{1d} - x_2) + k \text{sign}(s) \right) \quad (2.28)$$

2.12.2 Présentation des résultats de simulation

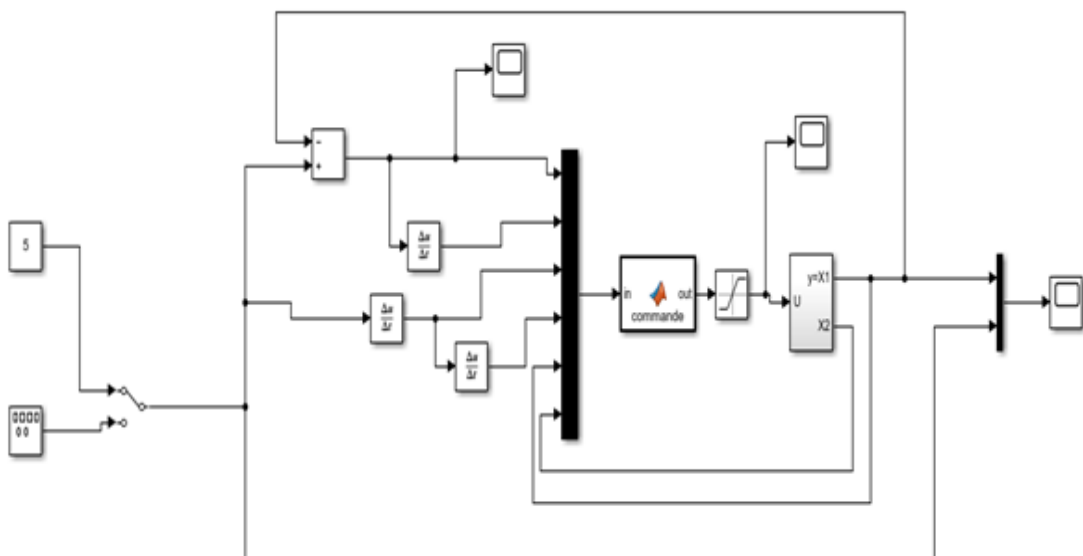


Figure 2.8 : schéma block de la commande par la technique de mode glissant

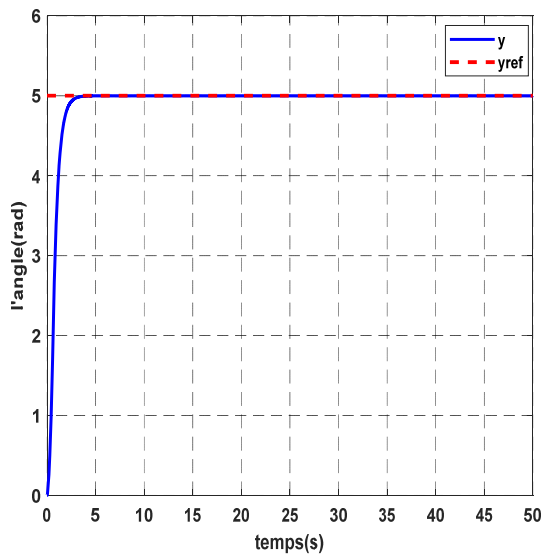
2.12.3 Résultats de simulation

Pour les paramètres de synthèse nous avons pris :

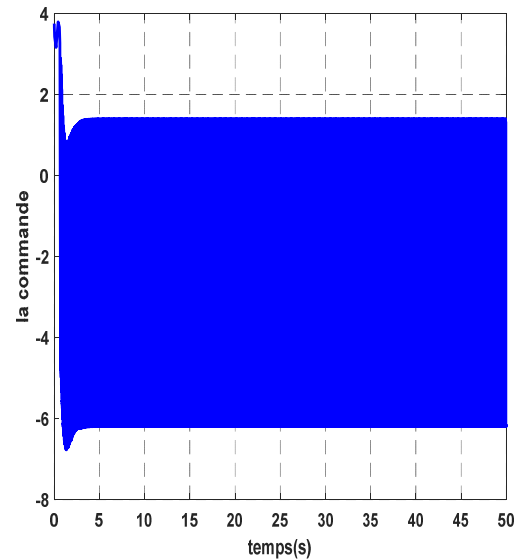
$$m = 0.25 \text{ kg} ; l = 1 \text{ m} ; g = 10 \text{ m/s}^2 ; t = 50 \text{ sec}$$

$$\lambda = 2 ; k = 15$$

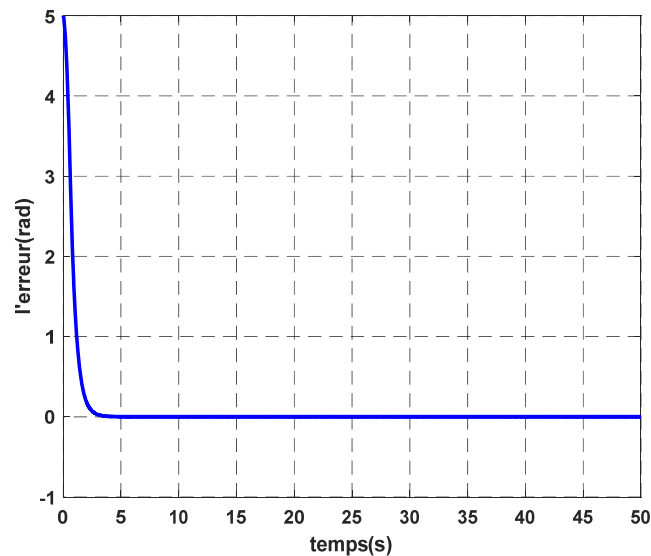
Les résultats de la position, la commande et l'erreur pour une référence échelon d'amplitude 5 sont représentées par la figure 2.9 :



a) La sortie du système



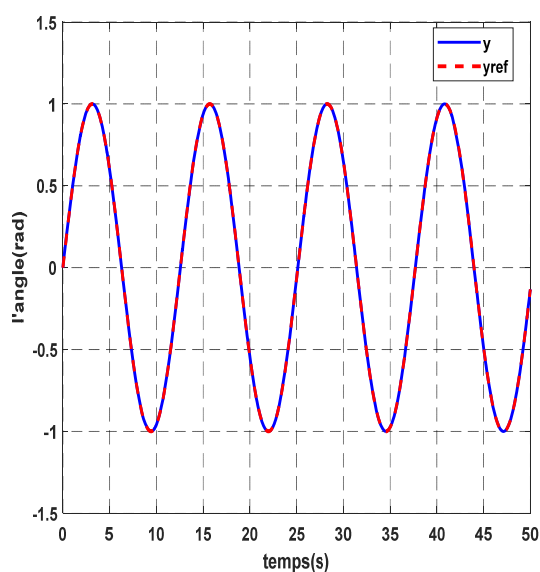
b) la commande



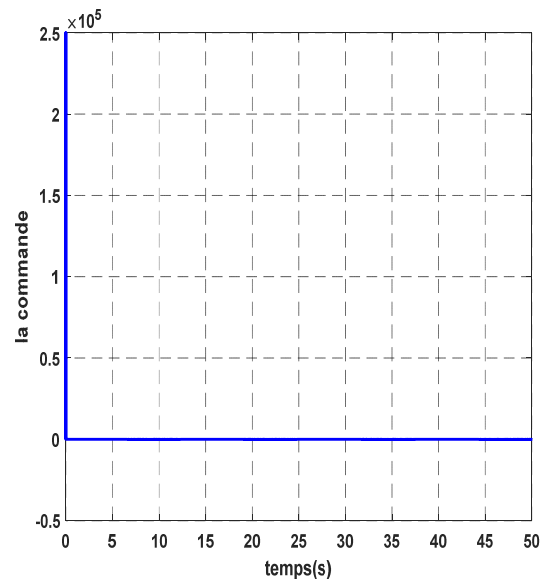
c) L'erreur

Figure 2.9 : Résultats de simulation de la commande par mode glissant, pour une entrée échelon.

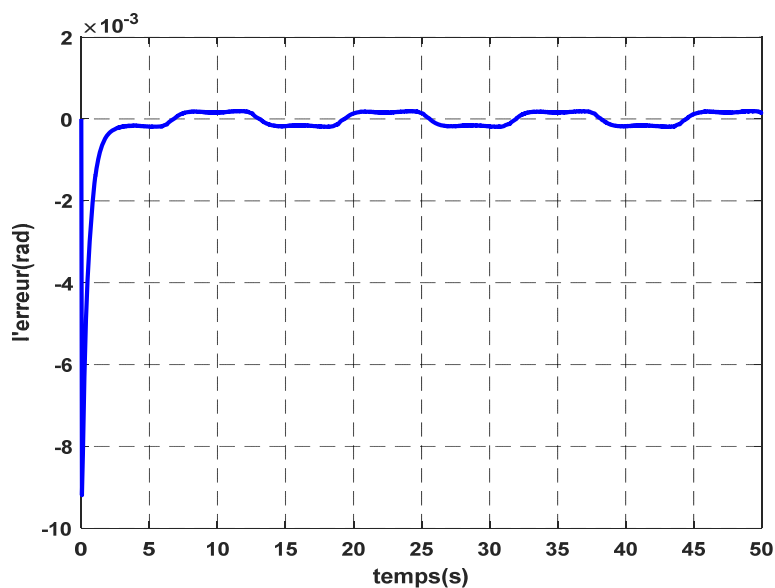
Les résultats de la position, la commande et l'erreur pour une référence sinusoïdale (amplitude 1 et la fréquence 0.5 rad/s) représentées par la figure 2.10 :



a) La sortie du système



b) la commande



c) L'erreur

Figure 2.10 : Résultats de simulation de la commande par mode glissant, pour une entrée sinusoïdale.

2.12.4 Commentaires sur les résultats

Les résultats obtenus nous montrent que la technique de commande par modes glissants permet de commander notre système avec des bonnes performances (court temps de réponse, un bon rejet de perturbation et une bonne précision en régime permanent) par rapport la technique PID.

2.13 Conclusion

Ce chapitre a été consacré dans un premier temps à une présentation générale des concepts de base de la commande par mode glissant (condition d'existence, calcul de commande, phénomène de Chattering...) et par la suite nous avons appliqué la commande par Mode Glissant au bras manipulateur à 1ddl.

Les résultats de la simulation montrent les avantages de la commande par mode glissant se situent à la robustesse qu'elle offre vis-à-vis des perturbations extérieures. On peut cependant noter que les performances du système peuvent être altérées à cause des oscillations fortes de l'organe de commande. Ce phénomène, appelé broutement (Chattering), a été réglé par la fonction de saturation. Dans le but d'améliorer les performances de commande (stabilité, précision...), et de prendre en considération la présence des incertitudes paramétriques et/ou des perturbations externes, on propose dans le chapitre suivant, d'utiliser des régulateurs flous type-1 et type-2.

3.1 Introduction

La logique floue (en anglais fuzzy logic) est de grande actualité aujourd'hui. En réalité, elle existait déjà depuis longtemps et nous pouvons diviser son histoire de développement en trois étapes. Ce sont les paradoxes logiques et les principes de l'incertitude d'Heisenberg qui ont conduit au développement de la « logique à valeurs multiples » ou « logique floue » dans les années 1920 et 1930. En 1937, le philosophe Max Black appliqua la logique continue, qui se base sur l'échelle des valeurs vraies $\{0, \frac{1}{2}, 1\}$, pour classer les éléments ou symboles. Les bases théoriques de la logique floue ont été établies en 1965 par le professeur Lotfi Zadeh [3].

Ce chapitre est divisé en deux parties principales. Dans la première partie on présente les éléments théoriques de la logique floue type-1 et type-2 ainsi que leurs applications à la commande non linéaire d'un bras manipulateur à 1ddl. La deuxième partie sera consacrée à la comparaison de ces techniques de commande non linéaire.

3.2 Historique

Développement de la logique floue [3] :

1961 : Lotfi Zadeh affirme dans son article pour un nouveau type de mathématiques « floues ».

1965 : Lotfi Zadeh introduit le concept de décor floue.

1969 : Marinos (Duke université) mène la première recherche visant à la mise en œuvre de la matérielle logique floue.

1972 : M. sugeno présente l'idée pour mesure floue.

1974 : E. Mamdani présente une application floue pour contrôler une machine à vapeur dans un cadre académique.

1980 : Yamakawa construire le premier circuit flou avec des composants bipolaires discret.

1983 : la première application industrielle dans un four à ciment au Danemark.

1984 : Togai et Watanabe présentent la première implémentation VLSI des contrôleurs flous.

1986 : Hitachi met en service un système de métro contrôle flou.

1987 : Yamakawa présente le premier contrôleur analogique flou.

1988 : Togai implémente les premiers processeurs numériques flous.

1989 : LIFE : le laboratoire de recherche internationale sur le flou en ingénierie commence au Japon.

1990 : Yamakawa crée l'Institut des Systèmes de Logique Floue (FLSI) au Japon.

1992 : la première conférence internationale de l'IEEE sur le système flou.

1993 : le premier numéro des transactions IEEE sur les systèmes flous.

3.3 Domaines d'application

Les domaines d'applications pratiques déjà connues sont innombrables, nous en citons quelques-uns [24] :

- L'intelligence artificielle.
- La robotique.
- Le contrôle des machines.
- L'informatique.
- Le traitement des données.
- La communication homme-machine.
- La reconnaissance des formes.
- La médecine.
- Les transports.

3.4 La logique floue type 1

3.4.1 Introduction

La théorie de la logique floue « fuzzy logic FL » a été développée par Lotfi Zadeh en 1960. C'est une méthodologie de calcul basée non pas sur des valeurs numériques mais sur des variables linguistiques prenant des valeurs linguistiques appartenant au langage humain.

Cette théorie a des applications dans plusieurs domaines les plus populaires sont dans le domaine automatique pour la commande est la modélisation des systèmes. Le premier contrôleur à la logique floue a été proposé par Mamdani en 1974, mais l'essor véritable de la commande à la logique floue commencé au Japon en début des années 1980 travaux de Takagi Sugeno et Tongin [25].

3.4.2 Les concepts de bases

3.4.2.1 L'ensemble flou

La théorie des ensembles flous est une théorie mathématique dont l'objectif principal est la modélisation des notions vagues et incertaines du langage naturel. Cette théorie permet d'exprimer l'idée d'une appartenance partielle d'un élément à un ensemble [26].

En théorie classique des ensembles, un sous ensemble A de B est défini par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ qui caractérise tout élément x appartenant à B. cette fonction prend la valeur 1 si x appartient à A et la valeur 0 dans le cas contraire [27].

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases} \quad (3.1)$$

En logique floue, un sous ensemble A de B est défini par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ pouvant prendre différentes valeurs comprises entre 0 et 1, selon le degré d'appartenance de l'élément x au sous-ensemble A.

$$\mu_A(x) \in [0 \ 1] \quad (3.2)$$

3.4.2.2 Univers de discours

C'est l'ensemble des valeurs réelles (l'intervalle numérique) qui peut prendre la variable floue, en général l'univers de discours est noté par des lettres en majuscule « U, W, ... ».

Les valeurs linguistiques seront alors projetées dans l'univers de discours pour définir le sous-ensemble associé à chaque valeur linguistique [28].

3.4.2.3 Les variables et les valeurs linguistiques

La logique floue se repose sur des variables floues dites variables linguistiques à valeurs linguistiques dans l'univers de discours U.

Une variable linguistique représente un état dans le système à régler ou une variable de réglage dans un contrôleur flou. Chaque valeur constitue un ensemble flou de l'univers de discours. Une variable linguistique est généralement caractérisée par [29] :

- Un nom de la variable linguistique.
- Un ensemble des valeurs linguistique qui peut prendre la variable linguistique.
- L'univers de discours, c'est-à-dire l'ensemble des valeurs numérique sur lesquelles est défini.

3.4.2.4 Fonction d'appartenance

Il s'agit d'établir une relation entre le degré de vérité de la variable floue et la grandeur d'entrée correspondante, les sous-ensembles flous sont ceux caractérisés par une fonction d'appartenance notée $\mu_A(x)$ définie sur [0,1].

Les fonctions d'appartenance les plus utilisées sont représentées dans le tableau suivant [30] [31] :

Fonction	Forme algébrique	Forme graphique

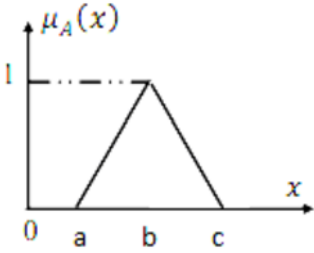
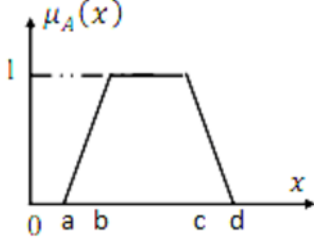
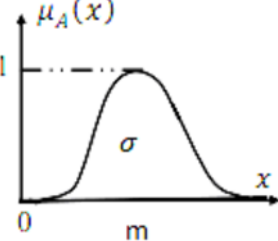
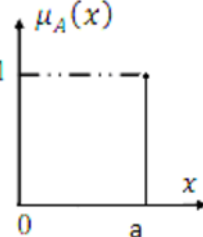
<p>Fonction triangulaire</p>	$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ \frac{d-x}{d-c} & b \leq x < c \\ 0 & x > c \end{cases}$	
<p>Fonction trapézoïdale</p>	$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x < d \\ 0 & x > d \end{cases}$	
<p>Fonction gaussien</p>	$\mu_A(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right)$	
<p>Fonction singleton</p>	$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & x = a \\ 0 & x \neq a \end{cases}$	

Tableau 3.1 : fonctions d'appartenance de la logique floue type 1

Le choix des formes des fonctions d'appartenance est arbitraire. Des études comparatives ont montré qu'avec les différentes formes des fonctions d'appartenance, les résultats sont pratiquement similaires en boucle fermée. La forme la plus fréquemment utilisée en commande floue est la forme triangulaire. Le nombre de fonctions d'appartenance est généralement impair et se répartissent autour de zéro. En général, on introduit pour une variable linguistique trois, cinq ou sept ensembles flous. Le choix du nombre dépend de la précision souhaitée. Les fonctions d'appartenance peuvent être symétriques, non symétriques et équidistantes ou non équidistantes [32].

3.4.2.5. Opérateurs de la logique floue

Soit d'ensemble flou A et B définies sur des univers de discours V et W, avec une fonction d'appartenance μ_A et μ_B respectivement [26] :

- **Union de l'ensemble floue (Union floue)**

La fonction d'appartenance d'union μ_A et μ_B est définie par :

$$\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A, \mu_B) \quad (3.3)$$

- **L'intersection floue**

La fonction d'appartenance de l'intersection μ_A et μ_B est donnée par :

$$\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A, \mu_B) \quad (3.4)$$

- **Le complément floue**

Le complément \bar{A} de A de l'ensemble floue inclue dans V avec la fonction d'appartenance définie par :

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A \quad (3.5)$$

3.4.2.6 Règles linguistiques

L'idée principale des systèmes basés sur la logique floue est d'exprimer la connaissance humaine sous la forme de règles linguistiques de forme si, alors. Chaque règle à deux parties [25] :

1. Partie antécédente (prémisse ou condition), exprimée par Si...
2. La partie conséquente (conclusion), exprimée par alors...

La Partie antécédente est la description de l'état du système.

La partie conséquente exprime l'action que l'opérateur qui contrôle le système doit exécuter.

Chaque règle floue est basée sur l'implication floue.

Zedah a été le premier à introduire la notion de règle floue sous la forme :

Règle : Si x est A alors y est B.

3.5 Structure d'un régulateur flou type 1

Il existe trois modules pour un régulateur à logique flou [30] :

1. La fuzzification des entrées et sorties.
2. L'inférence floue selon une base de règle.
3. La défuzzification des sorties.

L'architecture d'un contrôleur flou est donnée par le schéma suivant :

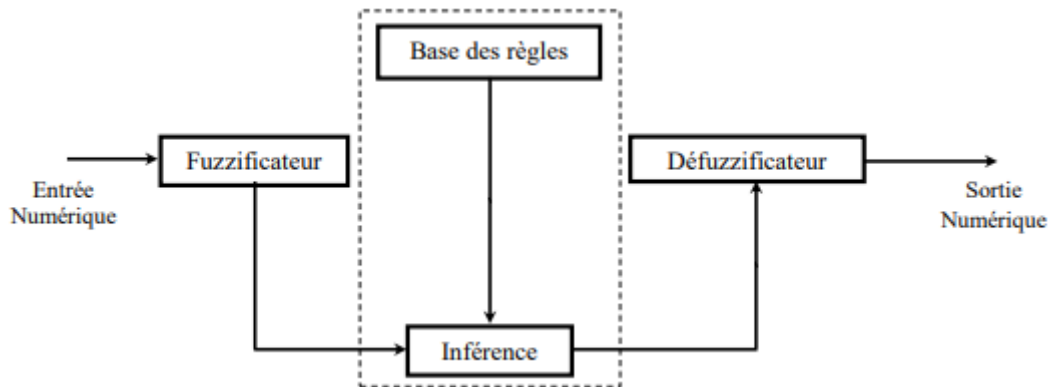


Figure 3.1 : Schéma synoptique d'un contrôleur flou type 1

3.5.1 Fuzzification

C'est le mécanisme réalisant l'interface "Numérique - linguistique". Les variables d'entrée et de sortie choisies pour modéliser ou commander un système sont des grandeurs numériques. L'étape de fuzzification consiste à transformer ces grandeurs réelles en variables linguistiques en vue d'un traitement d'inférence. Ainsi, à chaque variable d'entrée et de sortie est associé des ensembles caractérisant les termes linguistiques pris par ces variables. Ces termes seront utilisés pour écrire les règles d'inférence [32].

Le bloc de fuzzification effectue les fonctions suivantes :

- Définition des fonctions d'appartenance de toutes les variables d'entrées.
- Transformation des grandeurs physiques (réelles ou numériques) à des grandeurs linguistiques ou floues.
- Représentation d'échelle transférant la plage des variables d'entrées aux univers de discours correspondants.

3.5.2 Base de règle

Ce bloc est une base de connaissance qui correspond à l'expertise ou au savoir-faire de l'opérateur sur le comportement du système. Elle est composée de l'ensemble des informations et des connaissances dans le domaine d'application et le résultat de commande prévu. Elle permet de déterminer le signal de sortie du contrôleur flou et exprime la relation qui existe entre les variables d'entrées transformées en variables linguistiques et les variables de sortie converties également en variables linguistiques [28].

Ainsi, elle est constituée par une collection de règles données sous la forme « Si...Alors... ». D'une manière générale, on peut exprimer la $i^{\text{ème}}$ règle floue par la relation suivante :

- Modèle de Mamdani :

$$R^i : \text{si } x_1 \text{ est } F_1^i \text{ et } x_2 \text{ est } F_2^i \text{ et } \dots x_n \text{ est } F_n^i \text{ Alor } y_j \text{ est } G_j$$

- Modèle de Takagi Sugeno :

$$R^i : \text{si } x_1 \text{ est } F_1^i \text{ et } x_2 \text{ est } F_2^i \text{ et } \dots x_n \text{ est } F_n^i \text{ Alor } y_i = a_0^i + a_1^i x_1 + \dots + a_n^i x_n$$

Où :

- $i = 1, \dots, m$.

m est le nombre total des règles.

- F_1, F_2, \dots, F_n sont les ensembles flous (valeurs linguistique) des entrées (x_1, x_2, \dots, x_n)
- G_j est l'ensemble flou correspondant à la sortie y_j .
- Les $a_0^i, a_1^i, \dots, a_n^i$ sont paramètres ajustables des conséquences de la règle R^i .

On peut écrire les règles d'inférence sous forme d'une matrice appelée Matrice d'inférence, qui est généralement antisymétrique.

A titre d'exemple, si on considère un contrôleur flou à deux entrées.

Caractérisées par trois ensembles flous et une sortie, alors la matrice d'inférence peut prendre la forme suivante :

$x_2 \backslash x_1$	F_1^1	F_1^2	F_1^3
F_2^1	G_1	G_4	G_7
F_2^2	G_2	G_5	G_8
F_2^3	G_3	G_6	G_9

Tableau 3.2 : Matrice d'inférence floue [28].

3.5.3 Mécanisme d'inférence flou

L'inférence floue ou la logique de prise de décision est le cœur du contrôleur flou qui possède la capacité de simuler les décisions humaines et de déduire (inférer) les actions de commande floue à l'aide de l'implication floue et des règles d'inférence de la logique floue. Elle utilise les variables floues transformées par la fuzzification et les règles d'inférence pour créer et déterminer les variables floues de sortie, en se basant sur des opérations floues appliquées aux fonctions d'appartenance [33].

Comme on l'a mentionné, il existe plusieurs possibilités pour réaliser les opérateurs flous qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance. On introduit la notion de mécanisme ou méthode

d'inférence, qui dépend des relations utilisées pour réaliser les différents opérateurs dans une inférence, permettant ainsi un traitement numérique de cette dernière.

Pour le réglage par logique floue, on utilise en général l'une des trois méthodes suivantes :

- Méthode d'inférence Max - Min (Méthode de Mamdani).
- Méthode d'inférence Max - Produit (Méthode de Larsen).
- Méthode d'inférence Somme - Produit [33].

3.5.4 Défuzzification

La dernière étape pour avoir un système flou opérationnel s'appelle la défuzzification, c'est une interface "linguistique - Numérique". Lors de la seconde étape, on a généré un tas de commandes sous la forme de variables linguistiques (une commande par règle).

Le but de la défuzzification est de fusionner ces commandes et de transformer les paramètres Résultants en donnée numérique.

L'étape de défuzzification se déroule en deux temps [27] [33] : D'abord, il faut fusionner les variables linguistiques communes à l'aide d'un opérateur de la logique floue choisi par le concepteur du système.

Dans un second temps, nous pouvons réellement entamer la partie délicate de la défuzzification. On a une série de variables linguistiques qui caractérisent une seule et même donnée, défuzzifier la donnée revient donc à trouver la meilleure valeur quantitative en fonction des fonctions d'appartenances des variables linguistiques. Il existe plusieurs méthodes de défuzzification, la plus utilisée est la méthode du centre de gravité [34].

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} u_{ci}(y) \omega_i}{\sum_{i=1}^{N_c} u_{ci}(y)} \quad (3.6)$$

Où :

\bar{y} : la valeur numérique de sortie.

N_c : le nombre de valeur linguistique de conséquence.

ω_i : les sommets des ensembles flous de conséquence.

u : la valeur d'appartenance.

3.6 Logique floue type 2

3.6.1 Introduction

La notion des ensembles flous de type-2 a été proposée par Lotfi Zadeh comme extension aux ensembles flous types-1. Un ensemble flou type-2 est caractérisé par une fonction

d'appartenance, c.à.d. la valeur d'appartenance de chaque élément de l'ensemble est un nombre flou dans $[0,1]$. Les ensembles flous type-2 est utilisés dans les situations où l'incertitude se présente (par exemple l'incertitude sur la forme des fonctions d'appartenances).

Cette partie sera consacrée à la présentation des principes de base et le fondement théorique de la théorie de la logique floue type-2.

3.6.2 Concept de base

3.6.2.1 Les ensembles flous

3.6.2.1.1 Définition 1

Un ensemble flou type-2, noté \tilde{A} est caractérisé par une fonction d'appartenance tridimensionnelle

$u_{\tilde{A}}(x, u)$ c.à.d. :

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} u_{\tilde{A}}(x, u) / (x, u) J_x \subseteq [0 \ 1] \quad (3.7)$$

Avec \int dénote l'union de tous les éléments du produit cartésien sur x et u avec :

$$0 \leq u_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$$

A chaque point fixe x de X , J_x est l'appartenance primaire de x , et x appelé variable primaire [35].

3.6.2.1.2 Définition 2

A chaque valeur de x , notée $x = x'$, le plan dimensionnel dont les axes sont u et $u_{\tilde{A}}(x, u)$ est appelé tranche verticale (vertical slice) de $u_{\tilde{A}}(x, u)$. Une fonction d'appartenance secondaire est une tranche verticale de $u_{\tilde{A}}(x, u)$.

Donc pour $x' \in X$ et $\forall u \in J_{x'} \subseteq [0 \ 1]$ on a :

$$u_{\tilde{A}}(x = x', u) = u_{\tilde{A}}(x') = \frac{\int_{f_{x'}(u)} f_{x'}(u)}{u} J_{x'} \subseteq [0 \ 1] \quad (3.8)$$

Avec : $0 \leq f_{x'}(u) \leq 1$.

Puisque $\forall x'$, ce x' va appartenir à X , c.à.d. $x' \in X$, alors nous notons la fonction d'appartenance secondaire par $u_{\tilde{A}}(x)$ qui est une fonction d'appartenance flou type 1.

En se basant sur le concept des ensembles secondaires, on peut réinterpréter un ensemble flou type-2 comme l'union de tous les ensembles secondaires, c.à.d. en utilisant l'équation (3.8) [35] [36].

On peut écrire \tilde{A} sous la forme suivante :

$$\tilde{A} = \{(x, u_{\tilde{A}}(x)) / \forall x \in X\} \quad (3.9)$$

Ou comme : $\tilde{A} = \int_{x \in X} u_{\tilde{A}}(x) / x = \int_{x \in X} [\int_{u \in J_x} f_x(u) / u] / x \quad J_x \subseteq [0, 1]$

3.6.2.1.3 Définition 3

Le domaine de la fonction d'appartenance secondaire est appelé appartenance primaire de x noté J_x telle que $J_x \subseteq [0, 1] \quad \forall x \in X$

3.6.2.1.4 Définition 4

L'amplitude de la fonction d'appartenance secondaire est appelée degré d'appartenance secondaire notée $f_x(u)$.

3.6.2.1.5 Définition 5

Un ensemble flou type-2 intervalle est un ensemble flou type-2 dont toutes les fonctions d'appartenance secondaires sont des ensembles type-1 de formes intervalles, c.à.d. :

$$f_x(u) = 1, \quad \forall u \in J_x \subseteq [0, 1], \quad \forall x \in X \quad (3.10)$$

Les ensembles flous type-2 intervalle reflètent l'uniformité de l'incertitude au niveau de la fonction d'appartenance primaire, ce type de fonctions d'appartenance est le plus souvent utilisé dans les systèmes flous type-2. Notons que ce type de fonctions d'appartenance est représenté seulement par ses domaines (intervalles), qui peuvent être exprimés en termes de bornes de gauches et de droites $[l, r]$ ou par leurs centres et largeurs $[c-s, c+s]$ où $c = (l+r)/2$ et $s = (r-l)/2$ [37].

3.6.2.1.6 Définition 6

Supposons que chaque fonction d'appartenance secondaire d'un ensemble flou type 2 possède un seul degré d'appartenance unitaire. On définit alors une fonction d'appartenance principale comme l'union de tous ces points : [37] [38]

$$M_{\text{principale}}(x) = \int_{x \in X} u / x \quad \text{où} \quad f_x(u) = 1 \quad (3.11)$$

Pour un ensemble flou type-2 intervalle, nous définissons la fonction d'appartenance principale comme étant l'union de toutes les valeurs d'appartenance moyennes de la fonction d'appartenance Primaire. Notons que lorsque l'incertitude des fonctions d'appartenance disparaît, la fonction d'appartenance d'un ensemble flou type-2 se réduit à la fonction d'appartenance principale [37] [38].

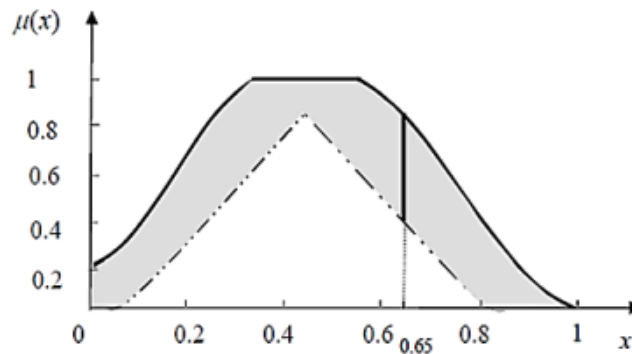


Figure 3.2 : Représentation schématique d'un ensemble flou type-2 intervalle [37] [38].

3.6.2.1.7 Définition 7

L'incertitude dans un ensemble flou type-2 \tilde{A} est représentée par une région bornée appelée « Footprint Of Uncertainty » FOU. C'est l'union de toutes les appartenances primaires : [36] [38]

$$\text{FOU}(\tilde{A}) = \bigcup_{x \in X} J_x \quad (3.12)$$

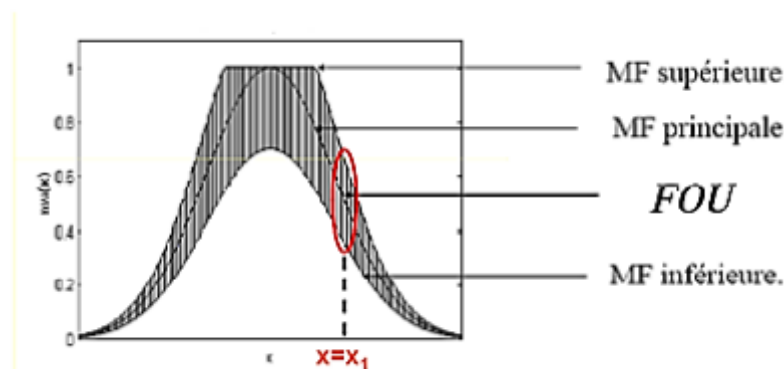


Figure 3.3 : la région de l'incertitude [36] [38].

3.6.3 Différents types d'ensembles flous type-2

- **Ensemble flou type-2 gaussien** : Le degré d'appartenance de chaque point est un ensemble flou type-1 gaussien dont le domaine de définition est inclus dans l'intervalle $[0, 1]$.
- **Ensemble flou type-2 triangulaire** : Le degré d'appartenance de chaque point est un ensemble flou type-1 triangulaire dont le domaine de définition est inclus dans l'intervalle $[0, 1]$.
- **Ensemble flou type-2 intervalle** : Le degré d'appartenance de chaque point est un ensemble ordinaire dont le domaine de définition est inclus dans l'intervalle $[0, 1]$.

Dans ce cas, les appartenances secondaires sont égales à 1. Les fonctions d'appartenance les plus utilisées sont représentées dans le tableau suivant :

Fonction	Forme algébrique	Forme graphique
Fonction triangulaire	$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x < c \\ 0 & x > c \end{cases}$ $\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x < (a + \alpha) \\ (1 - \alpha) \frac{x - (a + \alpha)}{b - (a + \alpha)} & (a + \alpha) \leq x < b \\ (1 - \alpha) \frac{x - (a + \alpha)}{b - (a + \alpha)} & b \leq x \leq (c - \alpha) \\ 0 & x > (c - \alpha) \end{cases}$	
Fonction trapézoïdale	$\overline{\mu_A(x, u)} = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x < d \\ 0 & x > d \end{cases}$ $\mu_{\tilde{A}}(x, u) = \begin{cases} 0 & x < (a + \alpha) \\ (1 - \alpha) \frac{x - (a + \alpha)}{b - (a + \alpha)} & (a + \alpha) \leq x < b \\ (1 - \alpha) \frac{(d - a) - x}{(d - a) - c} & b \leq x \leq (d - \alpha) \\ 0 & x > (d - \alpha) \end{cases}$	
Fonction gaussien	$\overline{\mu_A(x, u)} = \exp(-\frac{1}{2}(\frac{x-m}{\sigma})^2)$ $\mu_{\tilde{A}}(x, u) = (1 - \alpha) \exp(-\frac{1}{2}(\frac{x-m}{\sigma})^2)$	

Tableau 3.3 : fonctions d'appartenance la logique floue type 2[39].

3.6.4 Opération sur les ensembles flous type 2

Les degrés d'appartenance des ensembles flous type-2 sont des ensembles type-1 ; par conséquent, pour effectuer des opérations telles que l'union et l'intersection sur les ensembles

type- 2, nous devons faire appel aux opérations t-conorme et t-norme sur des ensembles de type1. Cela est réalisable en utilisant le principe d'extension de Zadeh [39].

3.7 Structure d'un contrôleur flou type 2

Il existe quatre modules pour un régulateur à logique flou :

1. La fuzzification des entrées et sorties.
2. L'inférence floue selon une base de règle.
3. La réduction de type.
4. La défuzzification des sorties. L'architecture d'un contrôleur flou est donnée par le schéma suivant :

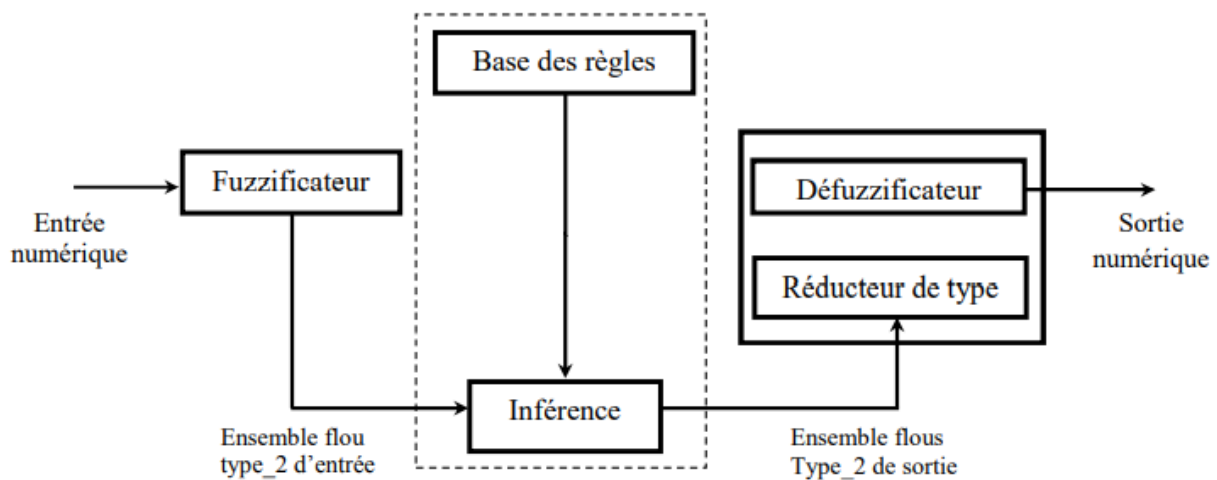


Figure 3.4 : Schéma synoptique d'un contrôleur flou type 2 [40].

Les systèmes flous type-2 sont dotés d'un nouveau module appelé réducteur de type, permettant de réduire des ensembles flous de type-2 à des ensembles flous de type-1.

3.7.1 Fuzzification

L'interface de fuzzification fait correspondre à l'entrée déterministe un ensemble flou qui peut être généralement un ensemble flou type 2. Cependant, dans notre travail la fuzzification de type singleton sera utilisée, en d'autres termes, l'entrée floue est un point singulier possédant une valeur d'appartenance unitaire [41].

3.7.2 Mécanisme d'inférence

La différence entre le type-1 et le type-2 réside seulement dans la nature des fonctions d'appartenance, donc, la structure des règles dans le cas du type-2 va rester exactement la même, la seule différence étant que quelques (ou toutes) les fonctions d'appartenance seront de type-2.

Il n'est pas nécessaire que toutes les fonctions d'appartenance des prémisses et des conséquences soient de type-2. Il suffit qu'une seule fonction d'appartenance dans une prémisse ou dans une conséquence soit de type-2 pour que tout le système le soit aussi [42].

- Théorème

Dans un système flou type-2 intervalle, avec une t-norm min ou prod, l'intervalle d'activation

$$F^l \in [\underline{f}^l, \overline{f}^l] \text{ de la } i^{\text{ème}} \text{ règle est :}$$

$$\underline{f}^l = \underline{u} \widetilde{F}_1^l(x_1) * \underline{u} \widetilde{F}_2^l(x_2) * \dots * \underline{u} \widetilde{F}_p^l(x_p) \tag{3.13}$$

$$\overline{f}^l = \overline{u} \widetilde{F}_1^l(x_1) * \overline{u} \widetilde{F}_2^l(x_2) * \dots * \overline{u} \widetilde{F}_p^l(x_p) \tag{3.14}$$

Ceci est clairement représenté sur la figure (3.7), où le nombre d'antécédents est $p = 2$.

Dans ce cas, le degré d'activation est un ensemble type-1 intervalle $[\underline{f}^l, \overline{f}^l]$ où :

$$\underline{f}^l = \underline{f}_1^l * \underline{f}_2^l$$

$$\overline{f}^l = \overline{f}_1^l * \overline{f}_2^l$$

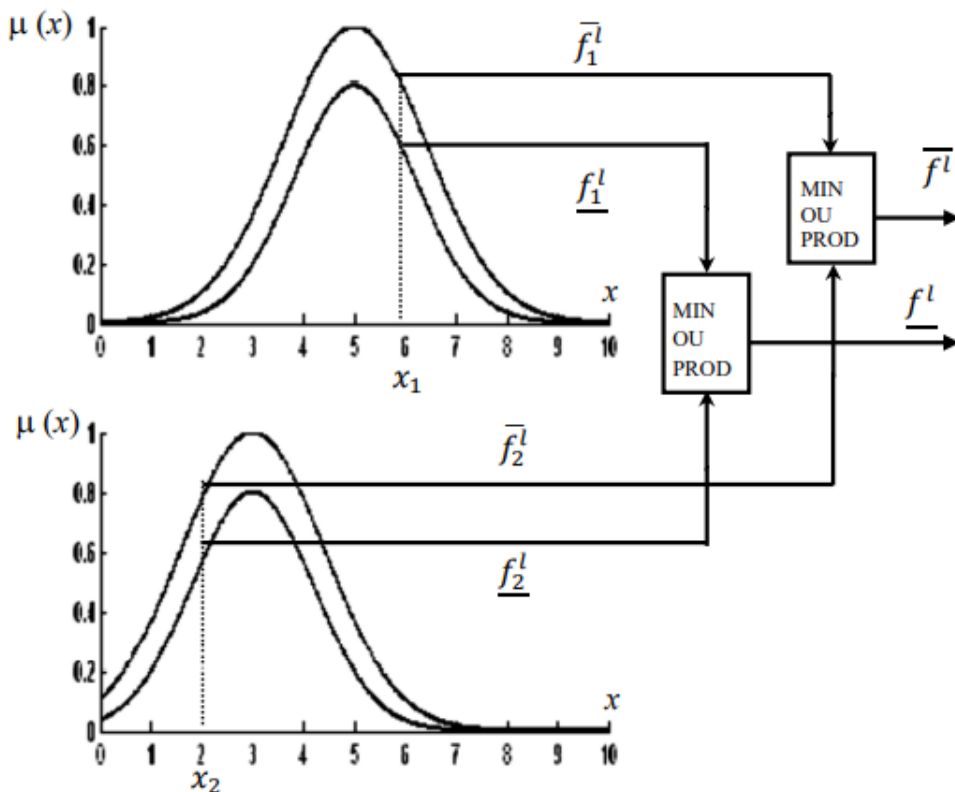


Figure 3.5 : Opérations d'entrée d'un système flou type-2 avec fuzzification type singleton.

3.7.3 Réduction de type

Etant donné que la sortie du système d'inférence est un ensemble flou type-2, son type doit être réduit avant l'étape de défuzzification pour qu'on puisse l'utiliser afin de générer une sortie

réelle. C'est la principale différence structurelle entre les systèmes flous type-1 et ceux de type-2 [39]. L'expression de l'ensemble flou type réduit par la méthode des centres d'ensembles est donnée par [43] [35] :

$$Y_{cos}(Y^1 \dots, Y^M, F^1 \dots, F^M) = \int_{y^1} \dots \int_{y^k} \int_{f^1} \dots \int_{f^k} \tau_{l=i}^k u_{Y^l}(y^l) * \tau_{l=i}^k u_{F^l}(f^l) / \frac{\sum_{i=1}^N f^l y^l}{\sum_{i=1}^N f^l} \quad (3.15)$$

Où τ et $*$ indiquent les t-norme choisies, $y^l \in Y^l = c_{G^l}$ le centre du 1^{ème} ensemble flou conséquent type-2 et $f^l \in F^l(x) = \prod_{i=1}^n u_{F^l}(x_i)$ le degré d'activation associé à la 1^{ème} règle pour $l = 1, 2, \dots, k$.

Puisque les ensembles flous utilisés sont type-2 intervalle, alors chaque Y^l et F^l est un ensemble type-1 intervalle, ce qui se traduit par :

$$u_{Y^l}(y^l) = u_{F^l}(f^l) = 1.$$

L'équation (3.6) peut être réécrite :

$$Y_{cos}(Y^1 \dots, Y^M, F^1 \dots, F^M) = \int_{y^1} \dots \int_{y^k} \int_{f^1} \dots \int_{f^k} 1 / \frac{\sum_{i=1}^N f^l y^l}{\sum_{i=1}^N f^l} \quad (3.16)$$

3.7.4 Défuzzification

Pour obtenir une sortie ordinaire (non floue) du système flou type-2, nous devons défuzzifier l'ensemble de type réduit. Nous allons transformer l'ensemble flou type-2 en ensemble flou type-1 et la sortie soit [43] :

$$y_{CG} = \frac{y_l + y_r}{2} \quad (3.17)$$

3.8 Application de la commande logique floue type 1 du bras manipulateur à 1ddl

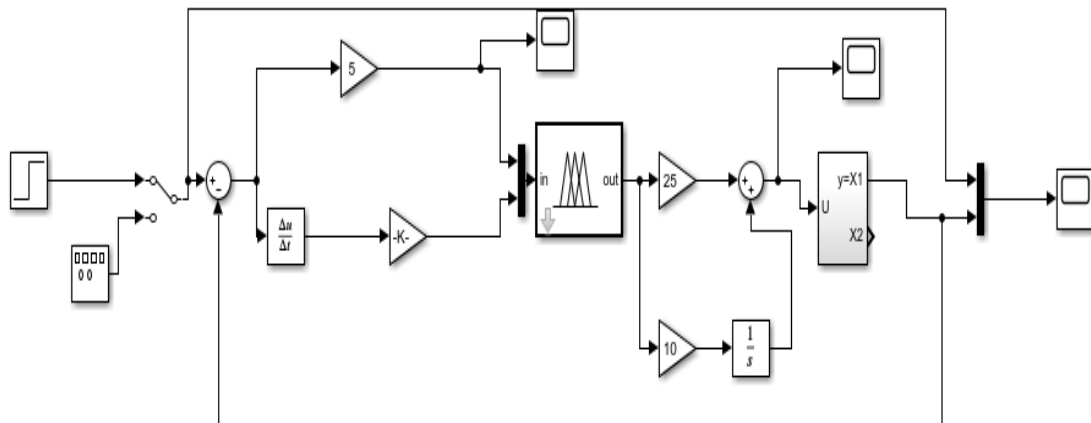


Figure 3.6 : schéma block de la commande par logique floue type 1 d'un bras manipulateur à

1ddl

Les fonctions d'appartenance des variables d'entrée, la dérivée d'entrée et sortie sont définies par des formes triangulaires et trapézoïdales (Figures 3.7, 3.8 et 3.9).

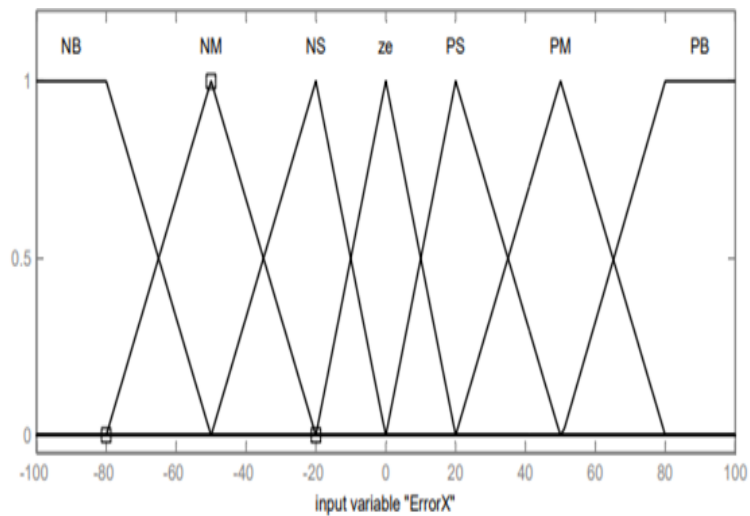


Figure 3.7 : fonction d'appartenance de l'erreur.

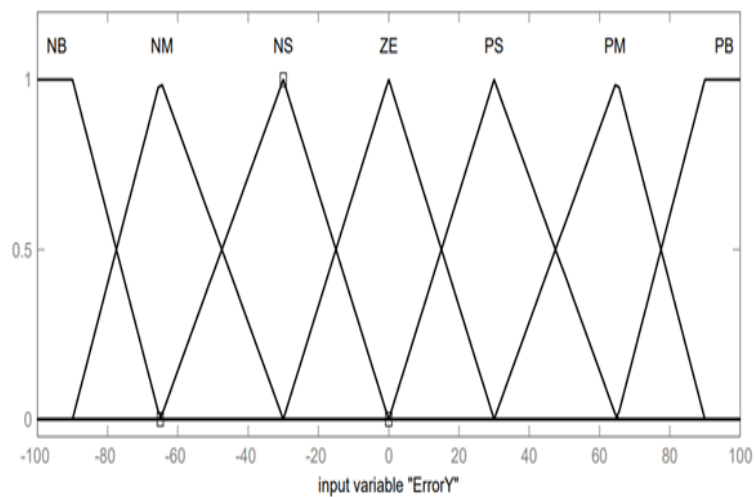


Figure 3.8 : fonction d'appartenance de la dérivée de l'erreur.

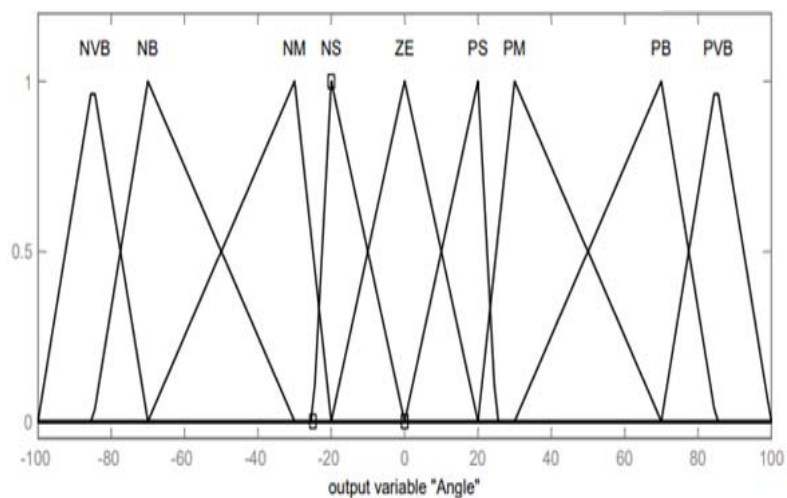
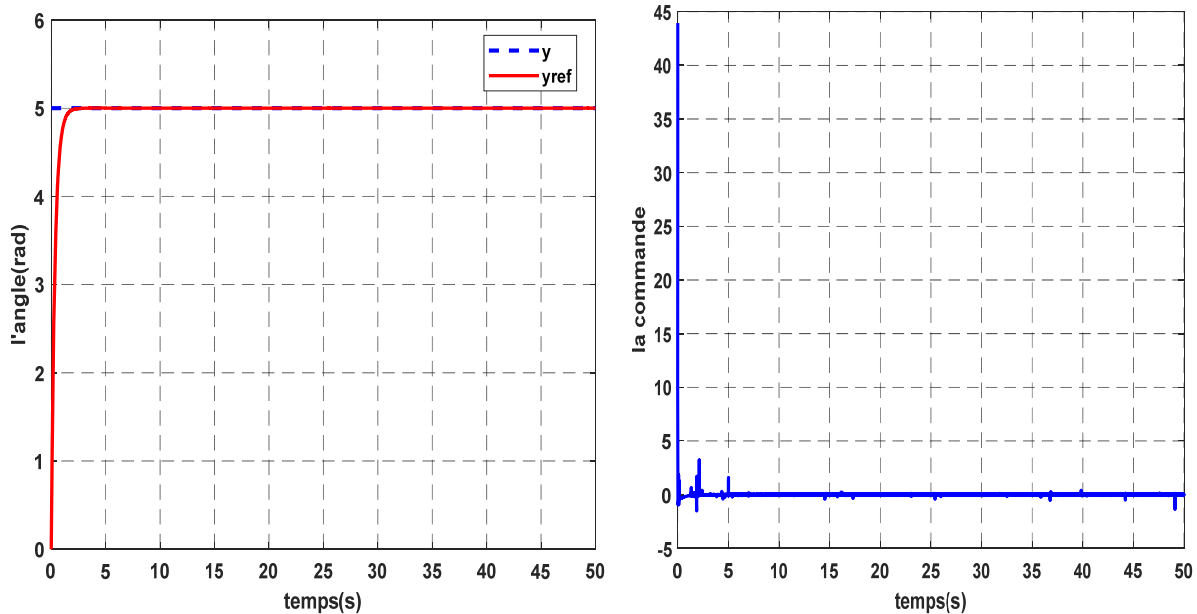


Figure 3.9 : fonction d'appartenance de la sortie.

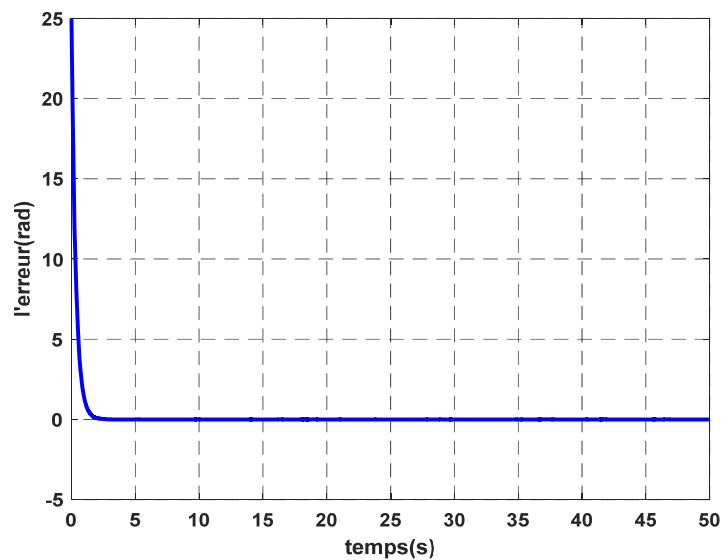
3.9 Résultats de simulation de la commande floue type 1 du bras manipulateur à 1ddl

Les résultats de la position, la commande et l'erreur pour une référence échelon sont représentées par la figure 3.10 :



a) La sortie du système

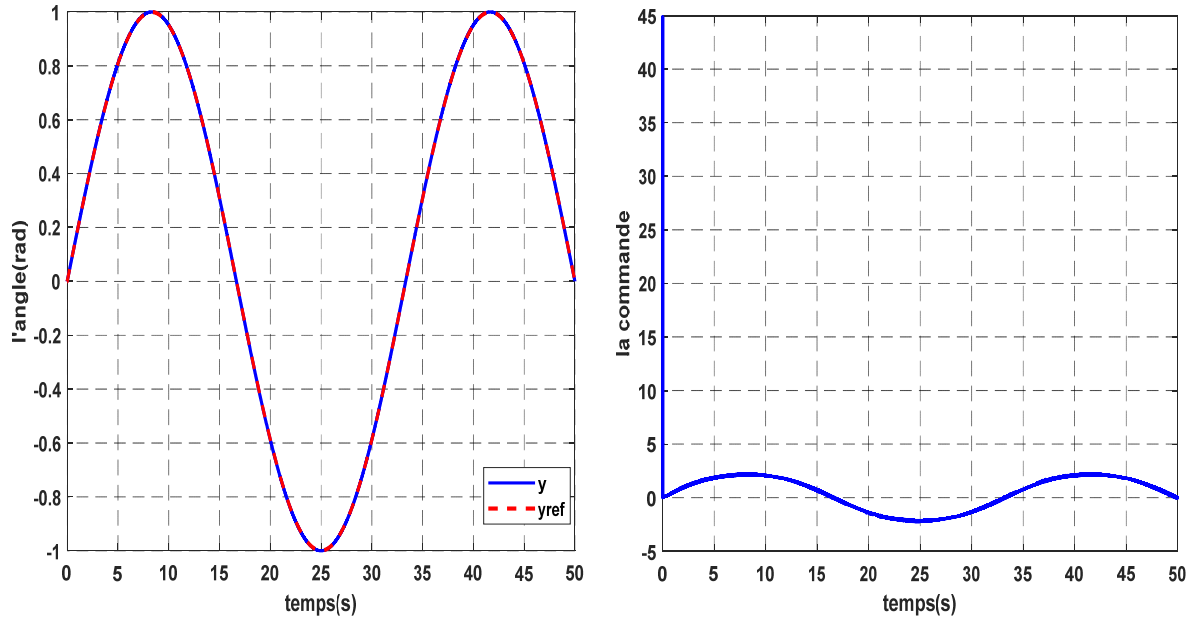
b) La commande



c) L'erreur

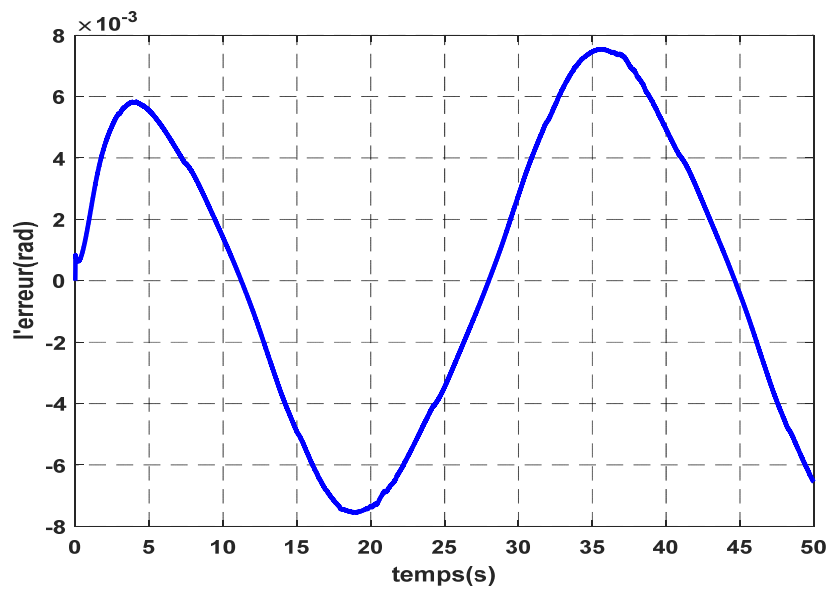
Figure 3.10 : résultats de simulation de la commande par logique floue type 1, pour une entrée échelon

Les résultats de la position, la commande et l'erreur pour une référence sinusoïdale (amplitude 1 et la fréquence 0.03 Hz) représentées par la figure 3.11 :



a) La sortie du système

b) La commande



c) L'erreur

Figure 3.11: Résultats de simulation de la commande par logique floue type 1, pour une entrée sinusoïdale

3.10 Application de la commande logique floue type 2 du bras manipulateur à 1ddl

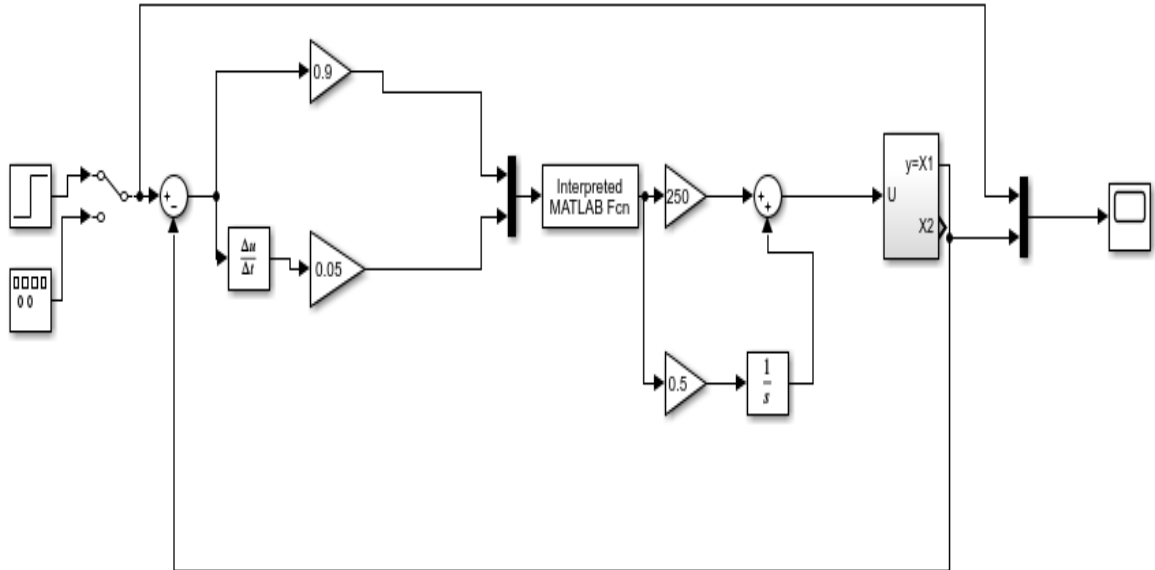


Figure 3.12 : schéma block de la commande par logique floue type 2 d'un bras manipulateur à 1ddl

Les fonctions d'appartenance des variables d'entrée, la dérivée d'entrée et sortie sont définies par des formes triangulaires et trapézoïdales (Figures 3.13, 3.14 et 3.15).

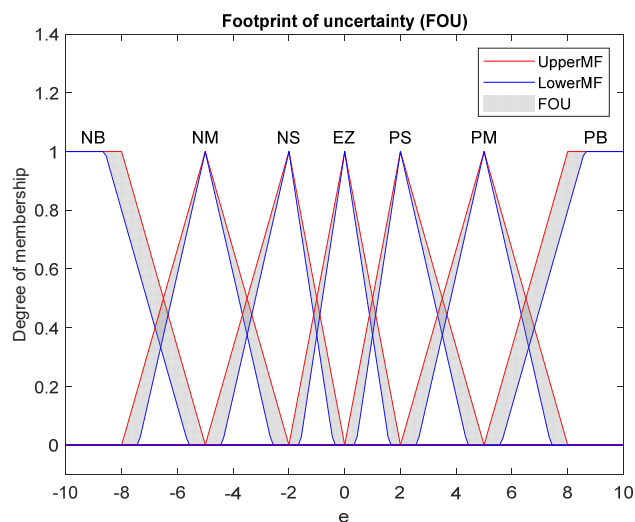


Figure 3.13 : fonction d'appartenance de l'erreur

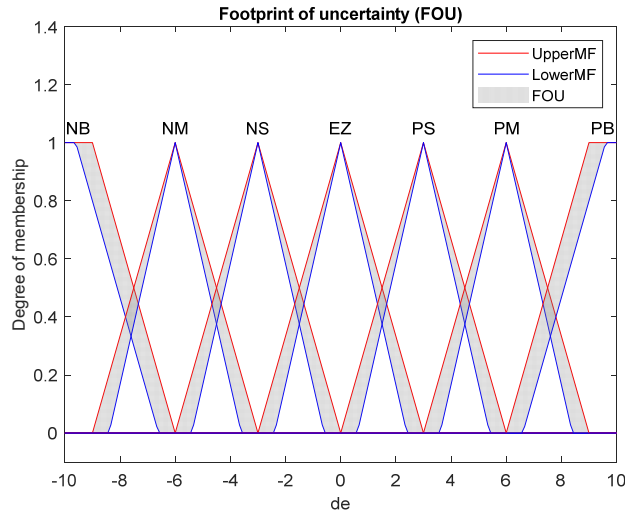


Figure 3.14 : fonction d'appartenance de la dérivée de l'erreur

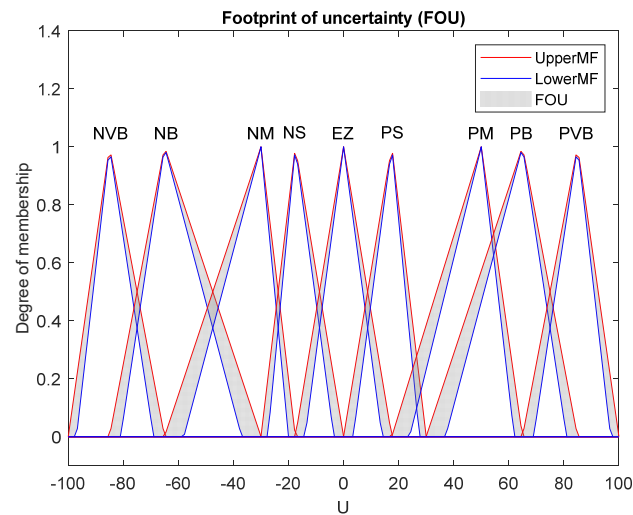
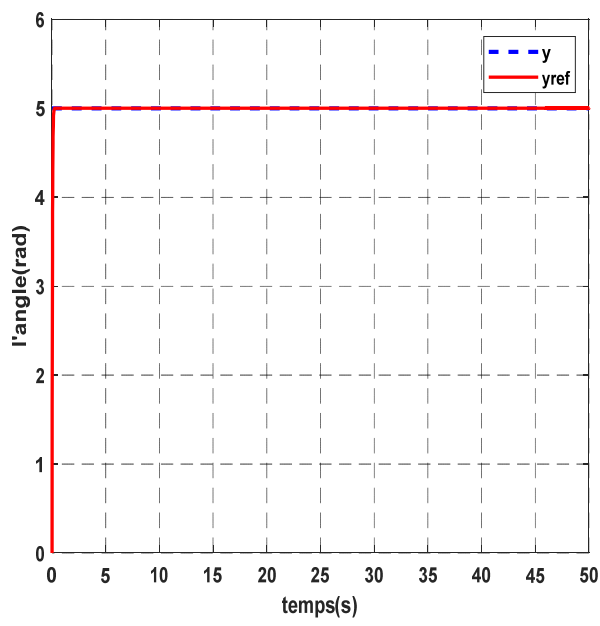


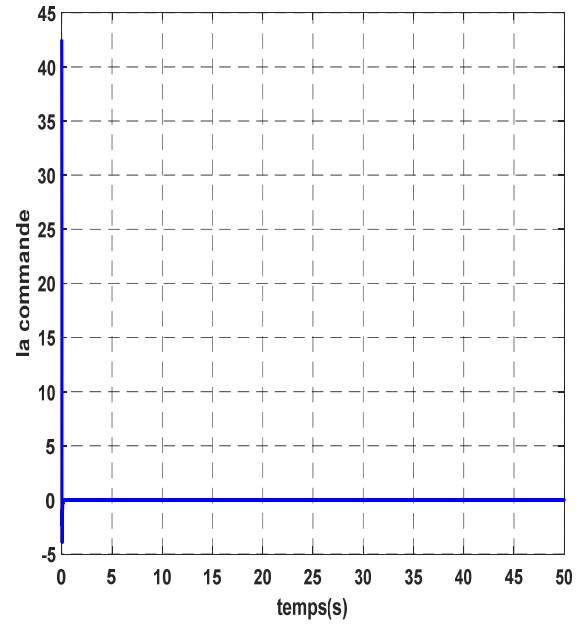
Figure 3.15 : fonction d'appartenance de la sortie

3.11 Résultats de simulation de la commande floue type 2 du bras manipulateur à 1ddl

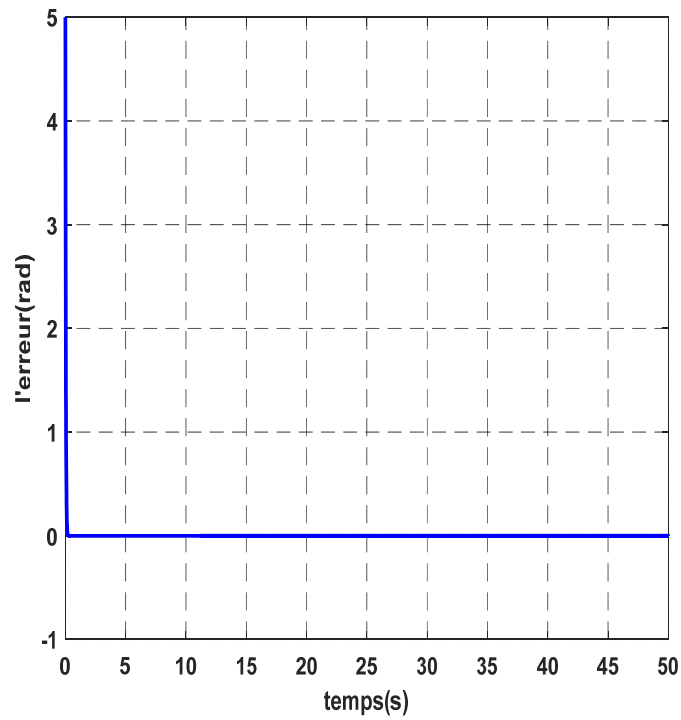
Les résultats de la position, la commande et l'erreur pour une référence échelon sont représentées par la figure 3.16 :



a) La sortie du système



b) La commande



c) L'erreur

Figure 3.16 : résultats de simulation de la commande par logique floue type 2, pour une entrée échelon

Les résultats de la position, la commande et l'erreur pour une référence sinusoïdale (amplitude 1 et la fréquence 0.03 Hz) représentées par la figure 3.17 :

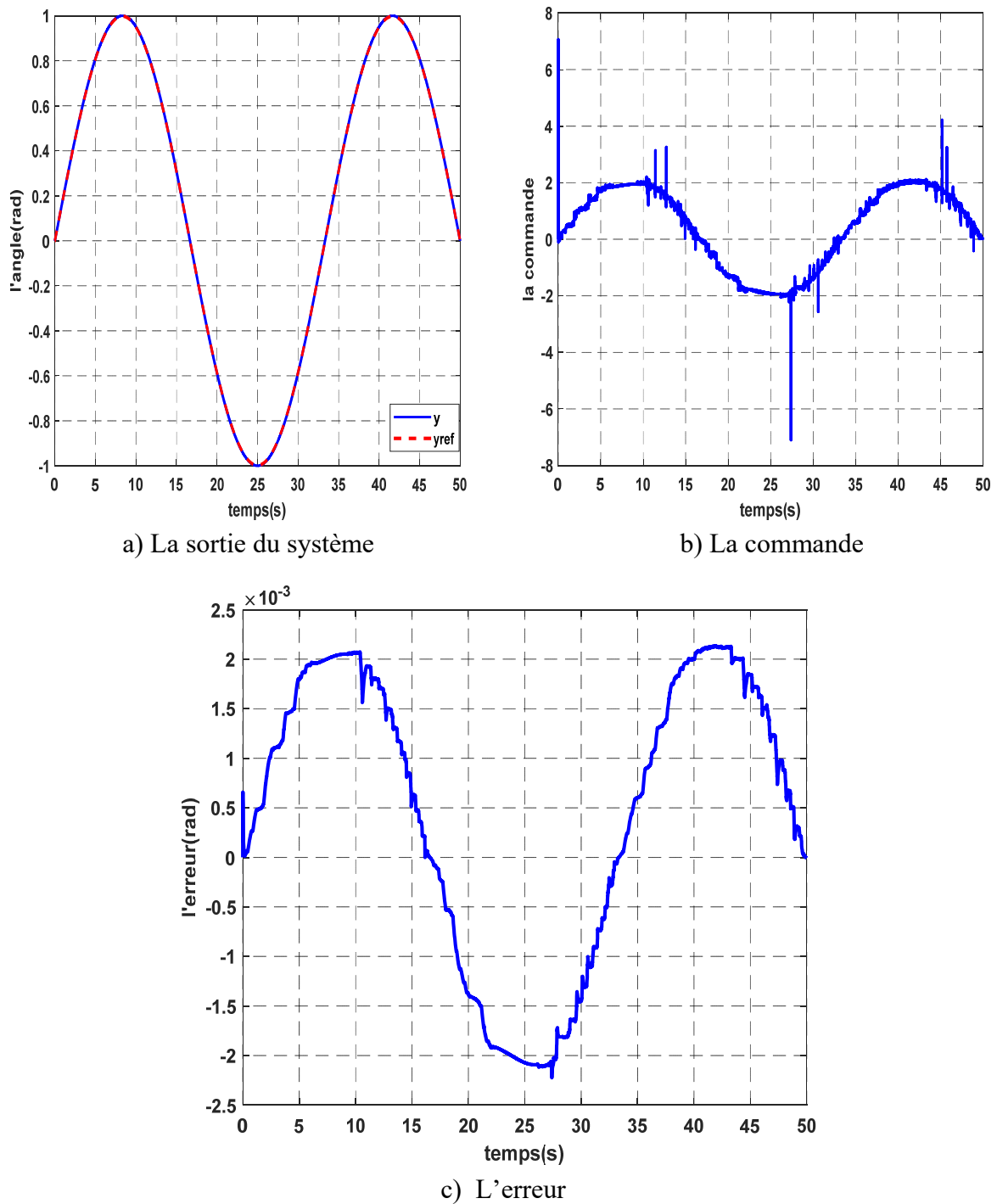


Figure 3.17 : résultats de simulation de la commande par logique floue type 2, pour une entrée sinusoïdale

3.12 Interprétation les résultats de simulation

Les résultats de simulation de la commande logique floue type 1 et type 2 appliquée sur le système bras manipulateur à 1ddl sont présentés sur les figures (3.10), (3.11) et (3.16), (3.17). Nous remarquons qu'on a abouti à des résultats satisfaisants en le temps de réponse et la stabilité de systèmes et la précision de convergence vers leurs pour une entrée échelon et une entrée sinusoïdale.

Les résultats illustrent que la loi de commande de logique floue type-2 donne de meilleurs performances comparée à la loi de commande floue type-1, à savoir le temps de réponse et la précision de convergence vers leurs valeurs désirées.

3.13 Étude comparative entre les résultats de simulations des différentes lois de commande développées

Pour examiner les différentes lois de commande développées pour le bras manipulateur à 1ddl, nous avons opté pour une étude comparative. Pour cela, nous définissons deux critères, le premier est en fonction de la commande appliquée, on peut le considérer comme un critère énergétique, le deuxième est en fonction de l'erreur de position.

J_1 est Le critère énergétique et J_2 est le critère de l'erreur de position

$$J_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^P (u^T u) \quad (3.29)$$

$$J_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^P (e^T e) \quad (3.30)$$

Où :

u : est la commande à l'entrée du système et e l'erreur statique de réglage. Les résultats de simulations sont présentés dans les Figures (3.18 - 3.21)

Critère	Commandes développées pour le bras manipulateur à 1ddl			
	Commande par PID	Commande par MG	Commande par LFT1	Commande par LFT2
$J_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^P (u^T u)$	9,4006.10 ⁶	4,3534.10 ⁴	1,0585.10 ⁴	1,0430.10 ⁴
$J_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^P (e^T e)$	241,8765	255,1950	542,7477	180,3281

Tableau 3.4 : Étude comparative entre les commandes développées pour le bras manipulateur à 1ddl.

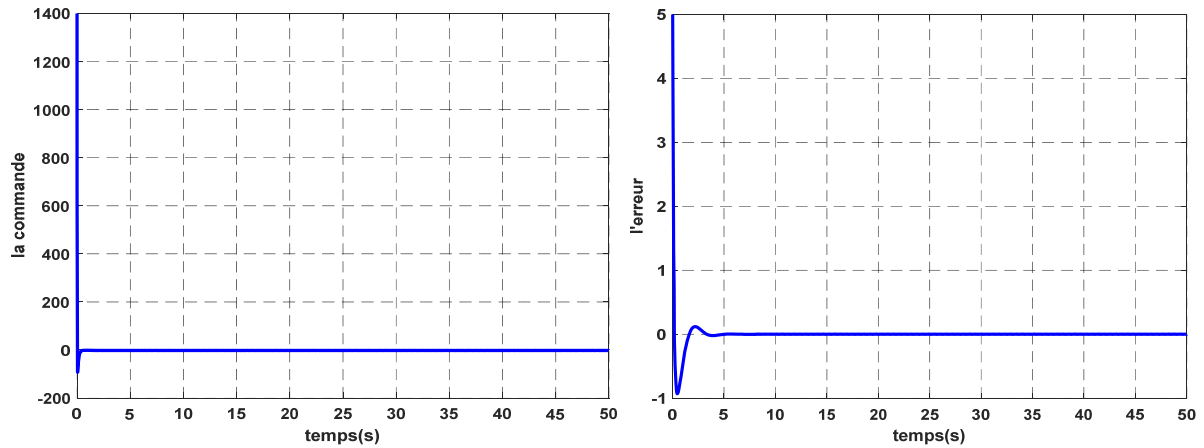


Figure 3.18 : La commande u et l'erreur e de la commande PID du bras manipulateur à 1ddl.

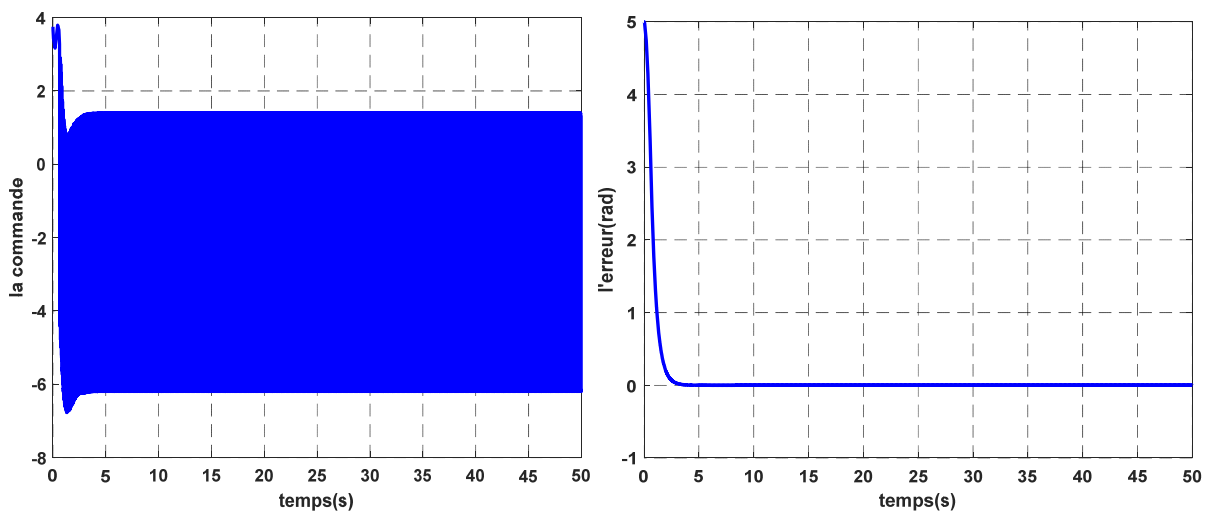


Figure 3.19 : La commande u et l'erreur e de la commande par mode glissant du bras manipulateur à 1ddl.

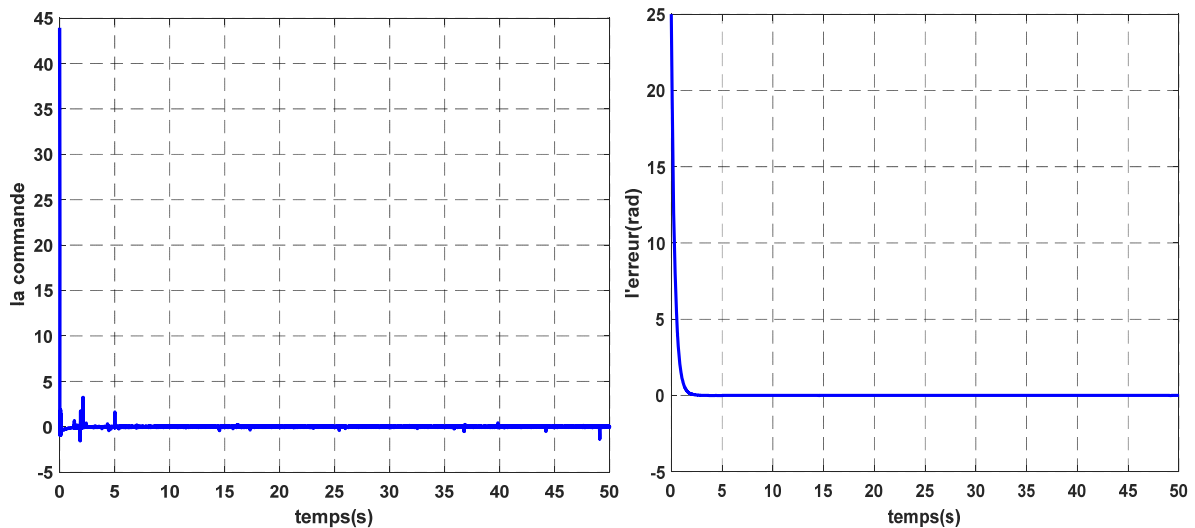


Figure 3.20 : La commande u et l'erreur e de la commande par la logique floue type-1 du bras manipulateur à 1ddl.

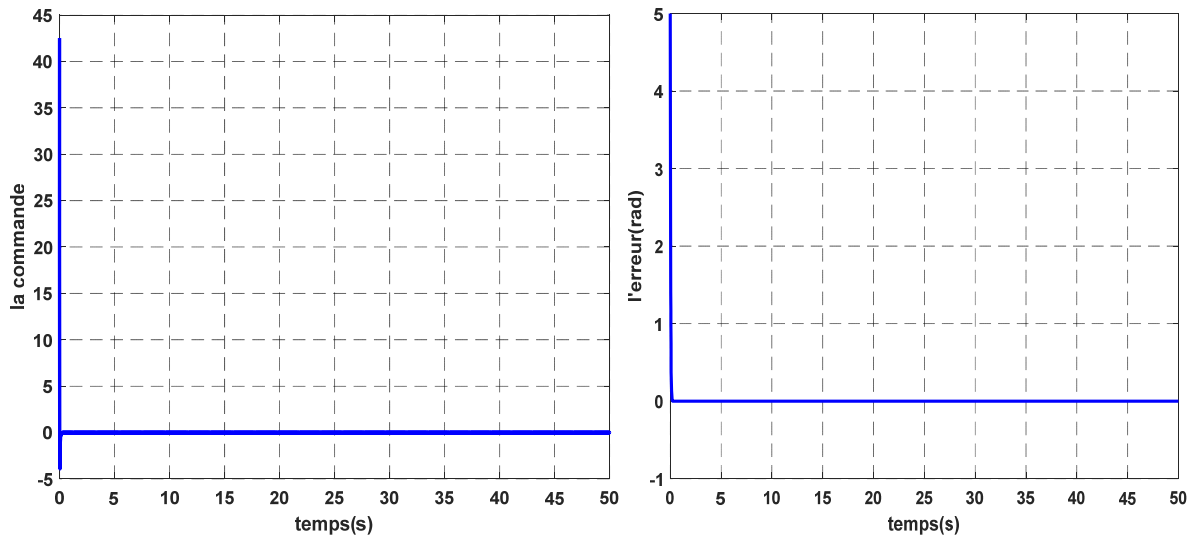


Figure 3.21: La commande u et l'erreur e de la commande par la logique floue type-2 du bras manipulateur à 1ddl.

Le but de cette partie est d'examiner les différentes lois de commandes synthétisées dans ce document et ceci dans les mêmes conditions. Nous avons adopté sur les deux critères J_1 et J_2 pour comparer entre les commandes. Dans le tableau 3.4, nous avons présenté une comparaison quantitative entre les différentes approches développées dans ce document. Les deux critères sont calculés pour l'intervalle de temps [0s 50s]. Cette comparaison se base sur l'évolution temporelle de la commande et de l'erreur résultante donnée par les figures 3.18,3.19,3.20 et 3.21.

D'après les résultats obtenus dans le tableau 3.4, nous pouvons conclure que pour la commande par la logique floue type2, le critère $J_1 = 1,0430.10^4$ prend la valeur la plus faible, le critère $J_2 = 180,3281$ prend la valeur la plus faible en simulation. Alors nous pouvons déduire que pour la commande par logique floue type2, le système est bien modélisé et pour cela le critère d'énergétique J_1 des logique floue type2 prend la valeur la plus petite.

3.14 Conclusion

Dans ce chapitre est divisé principalement en deux parties. Dans la première partie nous avons présenté notre contrôleur flou type-1 et type 2 et la méthodologie complète de construction ainsi les fonctions d'appartenances utilisés. Les résultats de simulation possèdent de bonnes performances : la rapidité (temps de réponse) de la commande par la logique floue type-2. Dans la deuxième partie, une comparaison générale entre tous les types de régulateurs utilisés dans cette mémoire, où nous avons bien constaté la supériorité des régulateurs floue type-2 par rapport à tous les autres régulateurs du point de vue les bonnes performances dynamiques.

Conclusion générale

Notre travail a consisté à étudier quatre types de commande non linéaire, la commande PID, la commande par mode glissant, la commande par la logique floue type 1 et la logique floue type-2 en régulation et en poursuite de trajectoires dans le but de faire une comparaison des performances pour un bras manipulateur à 1ddl.

Au chapitre un, nous avons présenté les notions de bases de la robotique, nous avons ainsi exposé les différentes modélisations (géométrique, cinématique et dynamique). Nous avons détaillé le modèle dynamique d'un bras manipulateur à un degré de liberté qu'est l'objet de notre application, Il est contrôlé par PID.

Au chapitre deux, l'objectif de ce chapitre était l'évaluation de la robustesse et les performances de la commande non linéaire par mode glissant des systèmes non linéaires. Les résultats de la simulation montrent les avantages de la commande par mode glissant se situent à la robustesse qu'elle offre vis-à-vis des perturbations extérieures.

Au chapitre trois, nous avons présenté la théorie de base de la logique floue type-1 et type-2, où plusieurs points ont été traités : définitions, opérations sur les ensembles flous, ainsi nous avons étudié la structure des contrôleurs flous type1 et type2 et les résultats de simulation obtenus sur la commande d'un bras manipulateur à 1ddl. Nous avons comparé entre les quatre commandes appliquées au système dans le troisième chapitre et nous obtenons des résultats satisfaisants, où les résultats de la logique floue type-2 donne des meilleurs résultats est la plus performante dans le temps de réponse et la stabilité de systèmes et la précision de convergence vers leurs valeurs désirées.

Comme perspectives nous espérons d'appliquer ces méthodes expérimentalement sur un bras manipulateur à 1ddl.

Annexe

Les paramètres du bras manipulateur à 1ddl sont donnés au tableau 1 :

Définition	Symbole	La valeur
Longueur du bras	l	1 m
La masse du bras	m	0.25 kg
Accélération de la pesanteur	g	10 m/s ²
Temps de simulation	T	50 sec
Position angulaire désiré	θ_d	5 degré

Tableau 1 : les paramètres du bras manipulateur à 1ddl.

Références bibliographiques

- [1] Lillia MESSAOUDENE, Lynda SERIDJ « Etude comparative des techniques de commandes d'un bras manipulateur » mémoire de master ,2015.
- [2] Djamel MEKKI, Redouane OUAREZKI « Commande par mode glissant flou d'un bras manipulateur » mémoire de master,2014.
- [3] GACEM HADJIRA, KERNANE MESSAOUDA « Implémentation De La Commande Intelligente Dans Un Robot à Deux Degrés De Liberté » mémoire de master, 2019/2020.
- [4] ACHERCHOUR Allaoua, ARDJOUNE Nassim « Commande floue dynamique d'un robot manipulateur » mémoire de master, Université Abderrahmane MIRA Bejaia ,2018
- [5] Hamdi Hossine, Introduction à la Robotique : nouvelle édition revue augmentée et corrigée, Université Constantine,2002-2003.
- [6] Nassim BELBRAHEM, Zhor CHAOUI « Etude de deux commandes robustes à modes glissants et à retard (TDC) : application à la commande d'un bras manipulateur » mémoire de master,2014.
- [7] AZOUI NAWAL « Commande non linéaire d'un bras manipulateur » mémoire de master, UNIVERSITE DE BATNA ,2009.
- [8] Chekakta Zakaria « Modélisation et commande d'un robot industriel de type bras manipulateur à 2ddl » École Nationale Polytechnique d'Oran,2005.
- [9] BENHADJ Belkacem, SELHADJI Youcef « Commande d'un robot manipulateur par mode glissant d'ordre supérieur » mémoire de master,2012.
- [10] LAGAB Salima, TONKIN Karima « Commande par mode glissant Neuro-flou d'un bras manipulateur » mémoire de master, Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou,2014.
- [11] HAMADI Idir, OUERD Azeddine « Commande par Non Singular terminal sliding mode flou d'un robot manipulateur à 2 D.D.L» mémoire de master,2013.
- [12] Fateh MAKHLOUFI « Modélisation et commande des robots manipulateurs par les outils de l'intelligence artificielle » mémoire de doctorat, UNIVERCITE BADJI-MOKHAR-ANNABA,2015.
- [13] Abdennour BENNAMIA « commande à mode glissant adaptative floue appliquée à un robot à deux degrés de libertés » mémoire de master,2018.
- [14] LOUCIF FATIHA « Contribution à la commande non linéaire des robots manipulateurs » Doctorat en sciences ,2021.

Références bibliographiques

- [15] Farid ABRI « Commande par mode glissant d'un hacheur parallèle » mémoire ,2014
- [16] A. ben Younes « chapitre 03 cours mg ». Université Mohamed Boudiaf de M'Sila.
- [17] BENAZIZA Walid « Commande par modes glissants du suivi de trajectoires pour un robot mobile » mémoire de MAGISTER, Université Hadj Lakhdar Batna.
- [18] Mme. BENADDA HAKIMA épouse BOURAHLA « Application des commandes non linéaires avec observateur d'un robot manipulateur » mémoire de MAGISTER, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF.
- [19] Emelyanov S.V. "Variable structure control systems". Moscow Nauka, 1967.
- [20] Utkin V. I. "Sliding mode and their application in variable structure systems" Mir, Moscou, 1978.
- [21] Bey KHAOULA et Ben Toumi AMINA « Commande robuste par mode glissant des systèmes non linéaires sous-actionnés » mémoire de master ,2020.
- [22] Deghboudj Imen « COMMANDE DES SYSTEMES NON LINEAIRES PAR MODE GLISSANT D'ORDRE SUPERIEUR » mémoire de master ,2013.
- [23] TALHAOUI Hicham « Contrôle par mode glissant : Observation et estimation paramétrique d'une machine à induction avec défauts » Doctorat en sciences,2016.
- [24] Aib ABDELGHANI « Stabilisation d'un pendule inversé par la logique floue » mémoire de master,2020.
- [25] Faucher J « les plans d'expériences pour le réglage et commande à base logique floue », Thèse de Doctorat Spécialité Génie Electrique et Automatique, Institut national polytechnique de Toulouse.
- [26] Ferhat Lahouazi « mise en œuvre d'une stratégie de commande neuro floue », application à un Pendule inversé, mémoire de magister en Automatique, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2011.
- [27] Laurant F. Sylvie G. Andre T. « Commande floue2, del'approximationà l'apprentissage » Paris, Hermès Sciences Publication, 2003.
- [28] M Madaoui « commande floue et neuro-floue d'un convertisseur direct AC/AC monophasé à structure minimale, Application à l'alimentation d'une machine asynchrone monophasé », Thèse de Magister, ENP Alger, février 2007.
- [29] K. wang et H. Lee « First Course on Fuzzy Theory and Applications », Springer, Berlin, 2005.
- [30] Antoine Cornuéjols : « Introduction à la logique floue », présentation, janvier2008.
- [31] Gacogne. Louis, « Eléments de logique floue », Paris, Hermès, 1997.

Références bibliographiques

- [32] Nakoula Y : ‘Apprentissage des Modèles linguistiques flous, par jeu de règles pondérées’, Thèse de Doctorat, Université de Savoie, France, juillet 1997.
- [33] Pierre GABRIEL : ‘Introduction à la Logique Floue et à la Commande Floue’ exposé, 2000-2001.
- [34] R Mellah : ‘contribution la commande adaptative neuro-floue, application à la robotique’ Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Mai 2006.
- [35] N.N. Karnik et J. M. Mendel: ‘Type-2 fuzzy logic systems: Type-reduction’, IEEE International conference, vol.2, page. 2046 – 2051, 1998.
- [36] J.M. Mendel et R.I. Bob John: ‘type-2 Fuzzy Sets Made Simple’, IEEE Transactions, Fuzzy Systems, vol. 10, issue.2, page 117-127, 2002.
- [37] C.L. Tsung: ‘Observer-based robust adaptive interval type-2 fuzzy tracking control of multivariable nonlinear systems’, Engineering Application of artificial intelligence, vol.23, issue.3, page 386-399, 2010.
- [38] J. M. Mendel, R. I. John et F. Liu : ‘Interval type-2 fuzzy logic systems made simple’, IEEE Transactions, Fuzzy Systems, vol.14, issue.6, page808–821, 2006.
- [39] HAMIZI Abdelhakim : ‘Commande Adaptative Floue Type-2 d’un bras Manipulateur’, mémoire de magistère en électronique option robotique, Université de Batna, 2011/2012.
- [40] L. Tsung, L.L Han, J.K et Ming: ‘Direct adaptive intervalle type-2 fuzzy control of multivariable nonlinear systèmes’, Engineering Application of artificiel intelligence, vol.22, issue.3, page 420-430, 2009.
- [41] N.N. Karnik et J.M. Mendel: ‘centroïde of a type-2 fuzzy set’, Information sciences, vol.132, issue.1-4, page.195-220, 2001.
- [42] Q. Liang et J. M. Mendel: ‘Interval type-2 fuzzy logic systèmes: Theory and design’, IEEE Transactions, Fuzzy systèmes, vol.8, issue.5, page 535-550, 2000.
- [43] N.N. Karnik et J.M. Mendel: ‘An introduction to type-2 Fuzzy Logic systèmes’, Technical Report, Université of Southern California, 1998.

Résumé

Le travail réalisé dans cette mémoire concerne la contribution à la commande non linéaire d'un bras manipulateur un degré de liberté, en utilisant des approches issues des théories de la PID et la mode glissant et la logique floue type 1 et type 2, et leurs applications sur le système bras manipulateur à 1ddl. On a présenté un bref tour d'horizon sur généralités des robots, puis la modélisation d'un bras manipulateur un degré de liberté, et les techniques des commandes par régulateur PID, la commande par mode glissant et la commande par la logique floue type 1 et type 2 du bras manipulateur un degré de liberté. Des simulations sont effectuées pour valider chaque commande. Les résultats obtenus de cette technique de commande robuste basée sur les systèmes flous type-2 du bras manipulateur un degré de liberté se traduisent par de meilleures performances dynamiques.

Mots clés : robot, bras manipulateur à 1ddl, régulateur PID, commande par mode glissant, la logique floue type1, la logique floue type 2.

Abstract

The work concerns the nonlinear control of a manipulator arm with one degree of freedom, using approaches from the theories of PID and sliding mode and fuzzy logic type 1 and type 2, and their applications on the manipulator arm system one degree of freedom.

We presented a brief overview of the generalities of robots, then the modeling of a manipulator arm with one degree of freedom, and the control techniques (by: PID, sliding mode, fuzzy logic type 1 and type 2) of the arm manipulator one degree of freedom. Simulations are carried out to validate each order. The results obtained from this robust control technique based on type-2 fuzzy systems of the manipulator arm with one degree of freedom translate into better dynamic performance.

Key words: robot, manipulator arm 1dof, PID controller, sliding mode, fuzzy logic type1, fuzzy logic type 2.