

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° : CE-07



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTROTECHNIQUE

OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

**Par : GHAZAL Ratiba
DELHOUM Bouchra**

Intitulé

**Commande d'un Robot manipulateur à
articulation flexible par les outils de
l'intelligence artificielle**

Soutenu le 12/06/2024, devant le jury composé de :

BENGUESSMIA Hani	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Président
LOUKAL Keltoum	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Rapporteur
BOUGUERRA abderrahmen	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Co- rapporteur
BAHIEDDINE Miloud	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Examineur

Année universitaire : 2023/2024

Remerciement

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

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

*Je tiens également à remercier mon professeur **BOUGUERRA***

Abderrahmen.

Aux membres de jury pour avoir sacrifié de leur temps, accepter d'examiner ce mémoire et d'honorer par leur présence le jury de soutenance.

Nos sincères remerciements aussi à tous les étudiants master 2 de génie électrique. Comme nous tenons à remercier les personnes qui font contribués de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : Je dédie ce modeste travail :

*À Ma tendre Mère **Teldja** (cheik): Tu représentes pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.*

*À mon très cher Père **Messaoud** : aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être. Ce travail et le fruit de tes sacrifices que tu as consenti pour mon éducation et ma formation le long de ces années.*

De même, je dédie ce travail :

*Mes chers frères et sœurs (**Islam, Rajaa, rihab**) : source d'espoir et de motivation.*

Ma chère grand-mère, source de bonheur, je prie pour son rétablissement, ins'ha'allah à toutes mes amies qui étaient toujours amés côtés et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études ; Iman, Hadil, Manal, Ayet-Errahman Chames, Chaïma, Narimane et surtout Riham. Et à mon camarade d'études A.A pour son précieux soutien et son aide,

***Bouchra**, ma chère amie avant d'être ma collègue de travail.*

Ghazal Ratiba

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

*Ma mère **Rebiaha** : qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.*

*Mon père **Aïssa** : qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.*

*Mes frères (**Abd alhamid**, **Abd elmadjid**, **Houda**, **Ikhlas**, **Samia** et **Asma**) qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.*

*Et je n'oublie pas spécialement le mari de ma sœur (**Asma**), **Fares JAGHLOLI**, que je remercie beaucoup pour toute l'aide.*

*À toute ma famille (**DELHOUM**), dont je témoigne toute ma reconnaissance pour m'avoir transmis des valeurs et l'idéologie selon laquelle il faut toujours mener à bien ce qu'on entreprend.*

*Tous mes amis d'étude. Et surtout **Achraf SAOUDI***

***Ratiba** ma chère amie avant d'être ma collègue de travail.*

delhoum bohra

Table des matières

Table des matières	I
Liste des figures	V
Listes des tableaux	VIII
Symboles	1
Introduction générale.....	3

Chapitre 01 : L'état de l'art d'un robot manipulateur à articulation flexible

1.1	Introduction	5
1.2	Terminologie générale.....	5
1.3	Historique	6
1.4	Différente catégorie de robot.....	8
1.4.1	Robot manipulateur	8
1.4.2	Robot mobile	8
1.5	Classification de robot manipulateur.....	9
1.5.1	Robot Manipulateur Rigide.....	9
1.5.2	Robot Manipulateur Flexible	9
1.6	Choix d'articulation flexible.....	10
1.6.1	Les Avantages	11
1.6.2	Les Inconvénients.....	11
1.7	Robot manipulateur flexible-motivation et application.....	11
1.8	Utilisation de robot manipulateur flexible.....	12
1.8.1	Le domaine médical	12
1.8.2	Le domaine industriel.....	13
1.8.3	Le domaine spatial	13
1.9	Conclusion.....	14

Chapitre 02 : Modélisation de robot manipulateur à articulation flexible

2.1	Introduction	15
2.2	Modélisation d'un robot à articulation flexible	15
2.2.1	Modélisation dynamique d'une articulation flexible	15
2.2.2	Modélisation dynamique.....	16
2.3	Simulation en boucle ouverte d'un Robot manipulateur à articulation flexible.....	21
2.4	Commande PID	22
2.4.1	Simulation de la commande par régulateur PID d'un Robot manipulateur à articulation flexible	23
2.4.2	Interprétation le résultat de simulation	24
2.5	Conclusion.....	24

Chapitre 03 : Commande floue d'un robot manipulateur à articulation flexible

3.1	Introduction	25
3.2	Historique	25
3.3	Domaines d'application.....	26
3.4	Les concepts de bases	26
3.4.1	L'ensemble flou.....	26
3.4.2	Univers de discours	26
3.4.3	Fonction d'appartenance	27
3.4.4	Opérateurs de la logique floue	28
3.4.5	Règles linguistiques.....	28
3.5	Structure d'un régulateur flou	28
3.5.1	Fuzzification	29
3.5.2	Base de règle	29
3.5.3	Mécanisme d'inférence flou	30

3.5.4 Défuzzification.....	31
3.6 Application de la commande floue d'un robot manipulateur à articulation flexible.....	32
3.6.1 Résultats de simulation de la commande floue d'un robot manipulateur à articulation flexible	33
3.6.2 Interprétation les résultats de simulation	34
3.7 Conclusion	35

Chapitre 04 : La commande Anfis d'un robot Manipulateur à articulation flexible

4.1 Introduction	36
4.2 Historique	36
4.3 Domaine d'application	37
4.4 Modèle d'un neurone.....	37
4.4.1 Modèle biologique	37
4.4.2 Le modelé mathématique	38
4.5 Les Fonctions d'activation.....	40
4.6 Apprentissage d'un réseau de neurones	40
4.6.1 Définition	40
4.6.2 Les lois de l'apprentissage	40
4.7 L'approche neuro-floue	41
4.8 Motivations pour une approche hybride.....	41
4.8.1 Systèmes hybrides neuro-flous	42
4.8.2 Système d'inférence floue basé sur les réseaux de neurones adaptatifs	43
4.9 Structure d'ANFIS (Adaptative Network Fuzzy Inference System)	44
4.10 Utilisation de l'outil neuro-flou.....	46
4.11 Application de la commande ANFIS d'un robot manipulateur à articulation flexible	47
4.11.1 Résultats de simulation de la commande ANFIS d'un robot manipulateur à articulation flexible.....	47

Table des matières

4.11.2 Interprétation les résultats de simulation	48
4.12 Étude comparative entre les résultats de simulations des différentes lois de commande développées	49
4.13 Conclusion	51
Conclusion Générale	52
Annexe	53
Référence Bibliographiques	54

Liste des figures

Chapitre 01

Figure 1. 1 : Evolution de la robotique.....	7
Figure 1. 2 : Robot manipulateur	8
Figure 1. 3 : Robot mobile	8
Figure 1. 4 : Robot manipulateur rigide	9
Figure 1. 5 : Schéma d'un articulation rigide	9
Figure 1. 6 : Robot manipulateur flexible	10
Figure 1. 7 : Schéma d'une articulation flexible.....	10
Figure 1. 8 : Robot manipulateur médical.....	12
Figure 1. 9 : Robot manipulateur industriel	13
Figure 1. 10 : Robot manipulateur spatiale	14

Chapitre 02

Figure 2. 1 : Schéma simplifié d'une articulation flexible.....	16
Figure 2. 2 : Coordonnées généralisées.....	17
Figure 2. 3 : Schéma équivalent d'un moteur	19
Figure 2. 4 : Schéma bloc d'un Robot manipulateur à articulation flexible	22
Figure 2. 5 : Réponses libres d'un Robot manipulateur à articulation flexible.....	22
Figure 2. 6 : Les réponses du système de la commande par régulateur PID.....	23

Chapitre 03

Figure 3. 1 : Schéma synoptique d'un contrôleur flou.....	29
Figure 3. 2 : Schéma block de la commande par logique floue d'un robot manipulateur à articulation flexible	32
Figure 3. 3 : Fonction d'appartenance de l'erreur	32
Figure 3. 4 : Fonction d'appartenance de la dérivée de l'erreur.....	33
Figure 3. 5 : Fonction d'appartenance de la sortie.....	33
Figure 3. 6 : Résultats de simulation de la commande floue.....	34

Chapitre 04

Figure 4. 1 : Schéma d'un neurone biologique 37

Figure 4. 2 : Hypothèse biologique de génération d'un comportement intelligent 38

Figure 4. 3 : Modèle mathématique de RNA 38

Figure 4. 4 : Schéma de la structure d'un neurone artificiel..... 39

Figure 4. 5 : Réseaux multicouche 39

Figure 4. 6 : Principe du système neuro-flou 42

Figure 4. 7 : Architecture équivalente d'ANFIS pour deux entrées à deux règles 44

Figure 4. 8 : Schéma block de la commande ANFIS d'un robot manipulateur à articulation flexible..... 47

Figure 4. 9 : Architecture équivalente d'ANFIS d'un robot manipulateur à articulation flexible 47

Figure 4. 10 : Résultats de simulation par la commande ANFIS d'un robot manipulateur à articulation flexible 48

Figure 4. 11 : La sortie θ des différentes lois de commande développées d'un robot manipulateur à articulation flexible..... 50

Liste des Tableaux

Tableau 2. 1 : Valeurs numériques du système	21
Tableau 3. 1 : fonctions d'appartenance de la logique floue.....	27
Tableau 3. 2 : Matrice d'inférence floue	30
Tableau 4. 1 : tableaux de fonction d'activation	40
Tableau 4. 2 : Étude comparative entre les commandes développées pour robot manipulateur à articulation flexible	59

Symboles

L : Lagrangienne de robot.

T : Energie cinétique.

V : Energie potentielle.

Q : Le vecteur des coordonnées généralisées.

τ : Couple moteur.

T_h : Energie cinétique du moteur.

T_i : Energie cinétique du ressort.

J_h : Moment d'inertie de moteur.

J_i : Moment d'inertie de segment.

V_g : Energie potentielle de pesanteur.

V_s : Energie potentielle du ressort.

m : Masse de segment.

g : Constante de gravité.

h : Hauteur de segment.

K_s : Constante d'élasticité de ressort.

Ω : La vitesse angulaire du moteur.

i : Courant d'induit.

R_m : Résistance du moteur.

$K_m K_g$: Paramètres constants.

U : Tension appliquée à l'induit.

$\dot{x} = \frac{dx}{dt}$: La dérivée de la variable x par au temps.

K_p : Les gains proportionnel.

Symboles

K_i : Les gains intégral.

K_d : Les gains dérivés.

$\mu_A(x)$: Fonction d'appartenance.

\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.

ANFIS : Adaptive Network Fuzzy Inférence System.

RNA : Les réseaux de neurones artificiels.

Introduction générale

Au cours des dernières années, il y a eu beaucoup de techniques de contrôle de modem proposées pour les systèmes robotiques, qui utilisent des techniques de modem de contrôle en interfaçant des boucles pour valider la dynamique et le comportement des systèmes non linéaires [1, 2]. Le contrôle du robot rigide a été bien étudié et la plupart des contrôleurs sont conçus sur cette base. Les robots flexibles peuvent faire face à des défis et à l'instabilité lors de l'utilisation de ces méthodes.

Ces robots sont conçus pour contrôler la position exacte du bras, même en cas de flexion et de vibrations [3, 4]. Dans une période de temps, contrairement aux robots industriels, les liens sont utilisés à des fins spécifiques comme le bras de vaisseau spatial. En général, les robots flexibles ont l'avantage d'utiliser moins d'énergie, de se déplacer plus rapidement, d'accéder à de longues distances et d'avoir une capacité de charge accrue [4].

Cependant, le lien flexible de ces robots rend certains. Par exemple, si le poids diminue, le bras du robot devient plus flexible. Par conséquent, un contrôle précis devient plus difficile. Dans ce travail, la solution privilégiée est d'utiliser l'approche floue et neurone-floue, qui se distingue par son approximation des non-linéarités et est un élément de l'intelligence artificielle. En réalité, la commande est produite en exploitant le modèle du système, même s'il est incertain. Lotfi Zadeh a mis au point la théorie de la logique floue en 1965 [5] pour gérer les imprécisions et les incertitudes. Divers domaines voient le développement de nombreuses applications, là où aucun modèle déterministe n'existe ou est difficile à obtenir.

Un système flou présente l'avantage que seules les connaissances sur le comportement du procédé à commander sont adéquates pour synthétiser la loi de commande. Il est très intéressé par l'identification et la commande des processus complexes et non linéaires.

Nous cherchons à élaborer une stratégie de commande pour contrôler un système complexe non linéaire, qui est un robot manipulateur à articulation flexible. Les outils de l'intelligence artificielle (logique floue et neurone-floue) sont à la base de cette stratégie. Elle doit réaliser des fonctions telles que le suivi de trajectoire, l'annihilation du comportement vibratoire et le rejet de perturbation.

L'objectif de ce travail est :

- ❖ Modélisation d'un robot manipulateur
- ❖ Etude de la commande non linéaire et la synthèse des lois de commande.

Introduction générale

- ❖ Application de la commande non linéaire sur d'un robot manipulateur
- ❖ Etude comparative entre les différentes commandes proposées

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

Chapitre 1 : Nous avons présenté dans ce chapitre généralités et l'état de l'art des robots manipulateurs à articulations flexibles et leur domaine d'application.

Chapitre 2 : La modélisation des Robots manipulateurs à articulations flexibles et simulation en boucle ouverte et la commande par PID.

Chapitre 3 : Dans ce chapitre nous étudions une technique d'intelligence artificielles qui est la logique floue. On présentera l'application du principe de commande par logique floue sur le modèle d'un robot manipulateur à articulation flexible.

Chapitre 4 : Nous présentons toutes les notions et les définitions nécessaire pour comprendre la technique neurone-floue, ainsi nous définirons les contrôleurs flous ANFIS, et nous appliquons ces commandes du robot manipulateur à articulation flexible et 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

Chapitre 01 : L'état de l'art d'un robot manipulateur à articulation flexible

1.1 Introduction

La robotique est l'ensemble des techniques (mécanique, automatique, électrotechnique, traitement de signal, informatique, communication... etc. Permettant la conception et la réalisation de machines automatiques appelées robot [6].

Les robots manipulateurs à articulation flexible, aussi appelés robots à articulation souple, constituent une avancée majeure dans le domaine de la robotique industrielle. À la différence de leurs homologues à articulation rigides, Ce robot intègre de mécanisme flexible dans leur articulation, ce qui leur permet de réaliser des mouvements plus naturels et adaptatifs. Cette caractéristique offre de nouvelles opportunités dans des secteurs tels que la manipulation d'objets fragiles, la collaboration entre l'homme et le robot et l'interaction avec des environnements complexes et imprévisibles. Grâce à leur articulation flexible, ce robot peut s'adapter à différentes tâches, ce qui les rend parfaits pour des applications dans des secteurs tels que la fabrication, la médecine et l'exploration spatiale. Même si certains défis demeurent, notamment en ce qui concerne la précision et la résistance, leur potentiel est immense et leur évolution continue permettra de développer de nouvelles applications et des techniques avancés [7].

Le but principal de ce chapitre est de décrire un type de robot qui est utilisé dans tous les domaines mentionnés précédemment et qui possède une caractéristique articulaire qui est la souplesse.

1.2 Terminologie générale

Le terme "rabota" provient du tchèque et signifie "travail et service".

Le terme "robotique" provient du mot "robot". Le terme robotique a été utilisé pour la première fois en version imprimée par l'écrivain américain né en Russie Isaac Asimov dans son roman de science-fiction *Menteur !* (Oxford Dictionary). À l'origine, Asimov ne savait pas qu'il avait fait connaître le mot. Il a supposé que le mot était déjà présent, en se basant sur les termes "mécanique", "électronique" et d'autres termes similaires qui désignent des domaines de la science appliquée [8].

1.3 Historique

Le terme « ROBOT » a été introduit en 1920 par l'écrivain tchèque Karel Čapek dans sa pièce de théâtre RUR (Rossum's Universal Robots). Ce terme, provenant du tchèque robot signifie « travail forcé », désigne à l'origine une machine androïde capable de remplacer l'être humain dans toutes ses tâches. Ensuite, dans les années quarante, les progrès de l'électronique permettent de miniaturiser les circuits électriques (inventions des transistors et circuits intégrés), ouvrant ainsi de nouveaux horizons à la fabrication de robots. Dans les premiers temps de la robotique, le robot est considéré comme une imitation de l'homme, aussi bien fonctionnelle que physique [9].

Aujourd'hui, les constructeurs ne tentent plus de reproduire l'aspect humain sur un robot, privilégiant avant tout sa fonctionnalité. Actuellement, les robots sont très répandus dans le secteur industriel, notamment en construction automobile et chez la plupart des fabricants d'ordinateurs. Leurs capacités d'effectuer rapidement des travaux répétitifs ne cessent de croître. Ils sont notamment utilisés dans les chaînes de montage et de fabrication. On les emploie également dans des environnements difficilement supportables par l'homme caractérisés par des conditions extrêmes de température ou de pression, radioactivité élevée, etc... L'industrie du nucléaire a ainsi largement contribué au développement de la robotique, notamment dans la conception de bras télémanipulateurs [9].

- 1947 : Premier manipulateur électrique télé opéré.
- 1954 : Premier robot programmable.
- 1961 : Utilisation d'un robot industriel, commercialisé par la société UNIMATION
- 1961 : Premier robot avec contrôle en effort.
- 1963 : Utilisation de la vision pour commander un robot.
- 1977 : premier robot mobile français « HILARE" à Toulouse.
- 1978 : Robot "PUMA" (Programmable Universal Machine for Assembly) a été développé par General Motors (toujours utilisé).
- 1980 à 1990 : Développement important de l'intelligence artificielle et de la robotique : de nouveaux robots apparaissent constamment.
- 1995 : Mise en place de la "RoboCup".
- 1997 : premier robot mobile extra planétaire sur Mars.
- 1999 : Lancement de "Aibo".
- 2003 : Projet "Mars Exploration Rover" (Spirit & Opportunity).
- 2009 : projet "Mars Science Laboratory" succédant au projet Rover.

- 2009 : robot "Nao" utilisé à la "RobocupSoccer".

Selon l'étude de la Fédération Internationale de Robotique (IFR) en 2012, il y a au moins 1 153 000 robots industriels opérationnels fin 2011 dans le monde. Grâce aux avancées des technologies, la robotisation des fabrications industrielles s'est élargie ces dernières années. Toujours d'après (IFR, 2012), il y a une augmentation de 38% des robots industriels vendus en 2011 dont 43% en Europe [8]. La figure suivante, nous présente l'évolution des robots dans le temps :

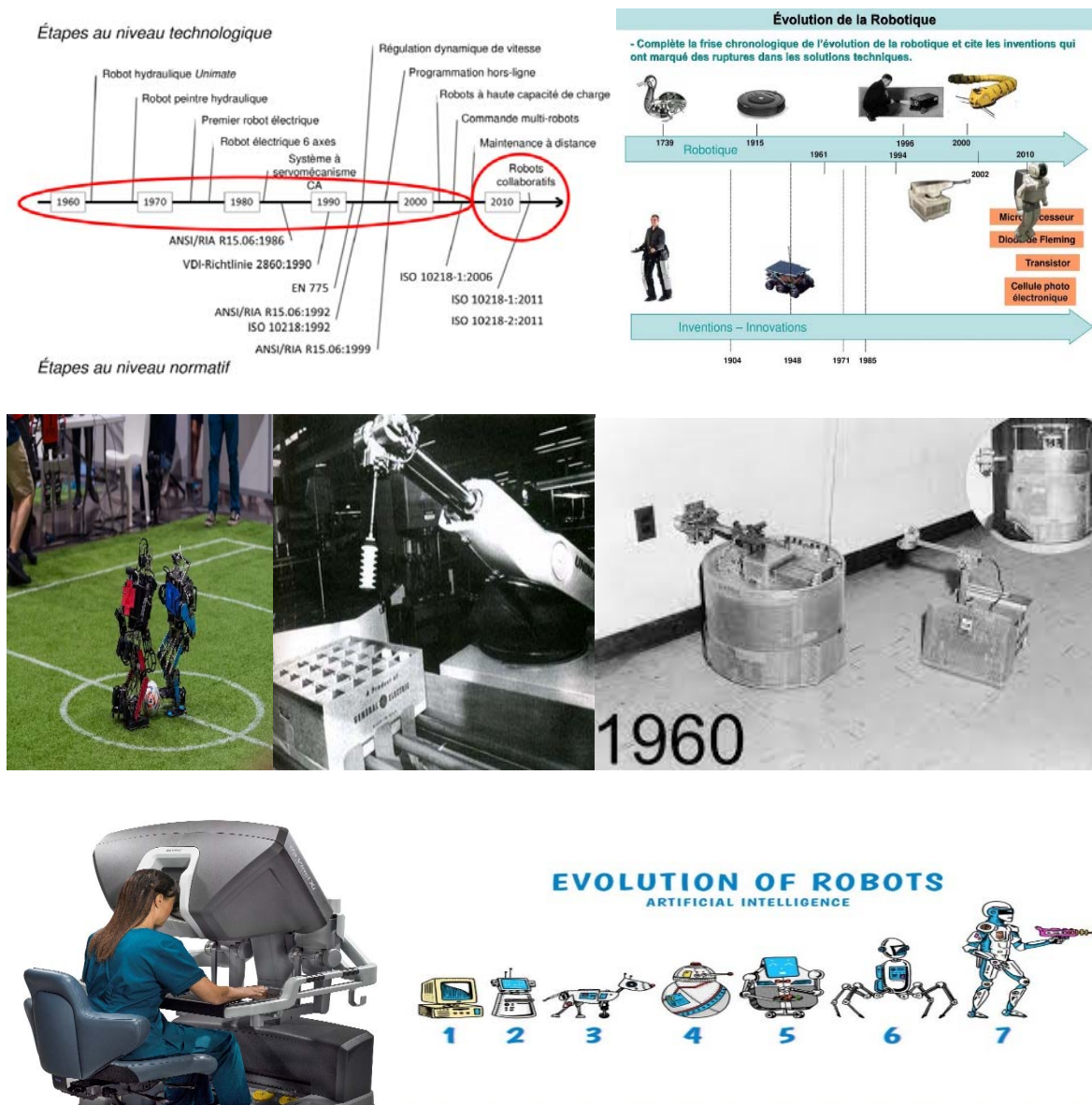


Figure 1. 1 : Evolution de la robotique [8].

1.4 Différente catégorie de robot

- Robot manipulateur (le bras de robot).
- Robot mobile

1.4.1 Robot manipulateur

La structure mécanique d'un robot manipulateur se compose d'une séquence de corps rigide (lien) 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 [10].



Figure 1. 2 : Robot manipulateur [10].

1.4.2 Robot mobile

La principale caractéristique de robot mobile est la présence d'une base mobile qui permet au robot de se déplacer librement dans l'environnement. Le robot mobile peut se déplacer de manière autonome (dans une installation industrielle, un laboratoire, une surface planétaire, etc.) c'est à dire sans l'aide d'opérateurs humains externes [10].



Figure 1. 3 : Robot mobile [10].

1.5 Classification de robot manipulateur

La classification de robot manipulateur selon leurs configurations peut être établie en deux types principaux :

1.5.1 Robot Manipulateur Rigide

- Ce type de robot se déplace à des vitesses plus lentes que la fréquence fondamentale du système en raison de son poids et de sa structure rigide.
- Il est équipé d'articulations rigides pour permettre ses mouvements [8].



Figure 1. 4 : Robot manipulateur rigide [11].

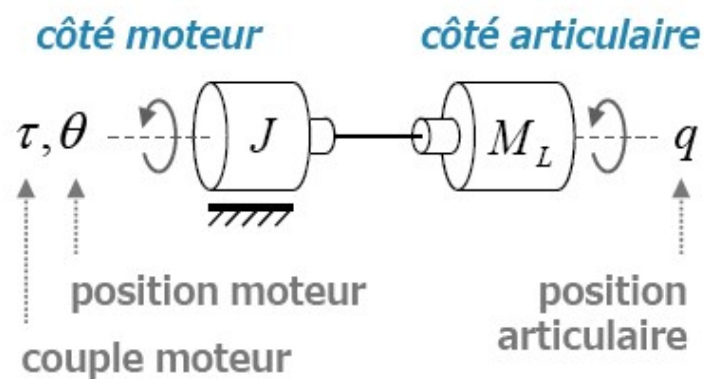


Figure 1. 5 : Schéma d'un articulation rigide [8].

1.5.2 Robot Manipulateur Flexible

- Le robot manipulateur flexible sont capables de se déplacer plus rapidement que le robot rigide.

- Il est dotés d'articulation et/ou de segments flexible pour leur permettre une plus grande agilité [8].

Cette classification se base sur la capacité de robot à être rigide ou flexible, influençant ainsi leur vitesse de déplacement et leur structure [8].



Figure 1. 6 : Robot manipulateur flexible [12].

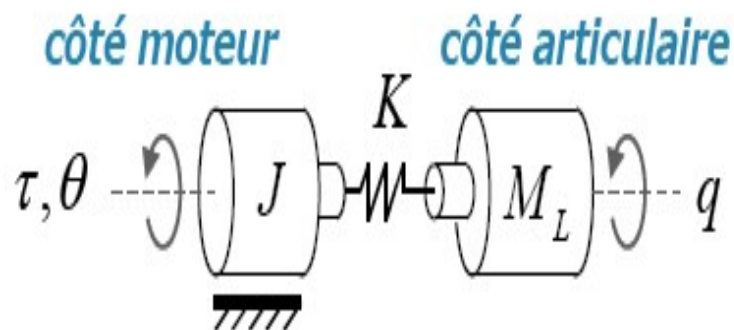


Figure 1. 7 : schéma d'une articulation flexible [8].

1.6 Choix d'articulation flexible

L'articulation flexible jouent un rôle crucial dans divers domaines, dépassant souvent les limites des constructions traditionnelles. Leur utilisation est particulièrement pertinente dans des applications exigeant une précision extrême, comme en chirurgie médicale, ainsi que dans des environnements où la légèreté est primordiale, comme dans la maintenance spatiale [8].

L'objectif principal de concevoir d'articulation flexible est de permettre des mouvements tout en maintenant une connexion stable entre deux composants. Cette approche présente à la fois des avantages et des inconvénients :

1.6.1 Les Avantages

- Facilité d'assemblage, ce qui simplifie le processus de fabrication.
- Absence d'usure et de génération de particules dues à l'absence de frottement sec.
- Fiabilité accrue grâce à l'absence de jeu et à la prédictibilité de la durée de vie basée sur le phénomène de fatigue.
- Capacité à effectuer des déplacements fluides et continus, même à l'échelle nanométrique [8].

1.6.2 Les Inconvénients

- Les Utilisation d'éléments de transmission déformables.
- Défi des vibrations indésirables.
- Techniques de contrôle développées dans les années 1990.
- Nécessité d'une compréhension approfondie de la dynamique de robot avec articulation flexible.
- Conception de systèmes structure-commande optimisés.
- Objectif : performances désirées tout en minimisant les vibrations [8].

1.7 Robot manipulateur flexible-motivation et application

Robot manipulateur flexible sont de robot munis d'actionneurs électriques à courant continu qui tiennent compte des non-linéarités du système. Des algorithmes de calcul de la commande basés sur la programmation dynamique permettent d'adapter les critères de performance et les contraintes physiques au modèle du bras manipulateur. Une analyse détaillée des effets des contraintes sur les forces généralisées a permis d'améliorer la convergence et la précision des algorithmes existants [13].

Le robot manipulateur flexible a des applications variées, notamment dans le domaine médical et industriel. Par exemple, un robot à deux segments flexible a été étudié pour des applications spécifiques. La modélisation, la conception et la commande de ces robots sont des domaines de recherche importants pour améliorer les performances et éviter les erreurs.

En outre, l'identification des systèmes de transmissions flexible est essentielle pour optimiser le fonctionnement de robot manipulateur à articulation flexible [14].

1.8 Utilisation de robot manipulateur flexible

1.8.1 Le domaine médical

Le robot manipulateur flexible est de plus en plus utilisés dans le domaine médical pour diverses applications. Ces robots offrent des avantages tels qu'une meilleure accessibilité aux zones difficiles d'accès, une accessibilité élevée aux lésions et des procédures sans cicatrices [15].

Ils sont particulièrement utiles pour la chirurgie à accès flexible assistée par robot, y compris l'endoscopie flexible, où ils permettent des examens diagnostiques et des opérations thérapeutiques adroits par des voies anatomiques étroites via des orifices naturels.

La conception de ces manipulateurs, telle que l'utilisation de nouvelles articulations continues distales présentant une capacité de rigidité variable, d'excellentes caractéristiques de flexion et une capacité de charge élevée, améliore leurs performances dans les procédures endoscopiques gastro-intestinales flexible [16].

De plus, la rigidité en torsion et les capacités de flexion en douceur de ces manipulateurs les rendent adaptés aux mouvements de torsion in situ, résolvant ainsi les problèmes de dextérité limitée dans les mouvements de torsion [17].

Dans l'ensemble, les robots manipulateurs flexibles jouent un rôle crucial dans le développement des techniques chirurgicales minimalement invasives et dans l'amélioration des résultats pour les patients dans le domaine médical.



Figure 1. 8 : Robot manipulateur médical [18].

1.8.2 Le domaine industriel

Le robot manipulateur flexible sont largement utilisés dans l'industrie pour diverses applications. Ces robots offrent une flexibilité accrue par rapport aux robots rigides, ce qui les rend adaptés à des tâches variées. Les robots manipulateurs flexibles sont souvent utilisés dans des environnements où une adaptation précise est nécessaire, tels que l'industrie automobile. Grâce à leur capacité à s'adapter à des situations variables, ces robots sont de plus en plus utilisés dans divers domaines industriels [19].

La robotique industrielle évolue rapidement pour intégrer des robots plus flexibles et collaboratifs, capables de travailler aux côtés des travailleurs humains. Le robot manipulateur flexible offre une solution polyvalente pour répondre aux besoins changeants de l'industrie.

En combinant des matériaux souples et des technologies avancées de commande, ces robots peuvent être utilisés de manière efficace dans divers secteurs industriels [12].



Figure 1. 9 : Robot manipulateur industriel [20].

1.8.3 Le domaine spatial

Le robot manipulateur flexible sont largement utilisés dans le domaine spatial pour effectuer diverses tâches. Leur utilisation est favorisée en raison de leur capacité à s'adapter à des environnements complexes et variés. Ces robots peuvent être utilisés dans des zones dangereuses ou inaccessibles telles que des environnements nucléaires, des situations d'incendie, des opérations de sécurité civile, la déminage, l'océanographie et même dans l'espace [8]. Le robot manipulateur flexible utilise des capteurs sophistiqués pour accomplir leurs missions avec précision et efficacité. Ils offrent une solution innovante pour révolutionner le monde des robots et améliorer les performances dans divers domaines d'application [19].



Figure 1. 10 : Robot manipulateur spatiale [21].

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni des concepts de base et des définitions pour comprendre la robotique manipulatrice à articulation flexible et quelques exemples sur les domaines de leurs utilisations, ainsi la particularité de l'articulation flexible qui double le nombre de degrés de liberté par rapport au cas rigide. Le chapitre suivant on va faire la modélisation d'un robot Manipulateur à Articulations flexibles

Chapitre 02 : Modélisation d'un robot manipulateur à articulation flexible

2.1 Introduction

Les robots manipulateurs à articulation flexible sont des avancées importantes dans la robotique industrielle, offrant des mouvements plus naturels et adaptatifs. La modélisation et la commande PID de ce robot sont des sujets de recherche essentiels. Le robot à articulation flexible intègre de mécanisme flexible dans leur articulation, ce qui les rend adaptatifs à diverses tâches. La commande PID, bien que traditionnellement utilisée pour le robot rigide, peut également être appliquée avec des ajustements pour le robot à articulation flexible, permettant un suivi de trajectoire plus précis et une meilleure performance globale [19, 22].

La modélisation de robot à articulation flexible est cruciale pour concevoir des systèmes de commande efficaces, en tenant compte des déformations et des forces distribuées le long de leur structure mécanique.

2.2 Modélisation d'un robot à articulation flexible

La modélisation d'un robot flexible a été proposée comme une extension de la modélisation de robot rigide [23]. Concernant les robots industriels avec des corps rigides et des articulations flexibles, Les déformations élastiques se trouvent spécifiquement dans les articulations des chaînes de transmission.

Les articulations peuvent être du type rotatif ou prismatique, ce qui fournit des niveaux de liberté souples aux mouvements, Liberté de mouvement du robot rigide.

- Une liaison prismatique est créée par une rigidité de traction-compression.
- Une rigidité de rotation est appliquée pour former une articulation rotoïde.

Un robot flexible articulé avec " n " articulations a " $2n$ " angles. Cette modélisation peut être utilisée pour tous les robots disposant de flexibilité au niveau de chaque articulation.

2.2.1 Modélisation dynamique d'une articulation flexible

Les modèles dynamiques définissant 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, afin d'avoir l'équation de mouvement du robot [24].

On peut représenter la flexibilité d'une articulation en utilisant une raideur qui correspond à une déformation élastique, qui impacte l'axe du moteur qui actionne l'articulation.

La représentation graphique d'une articulation élastique (flexible) est donnée dans la (Figure 2.1)

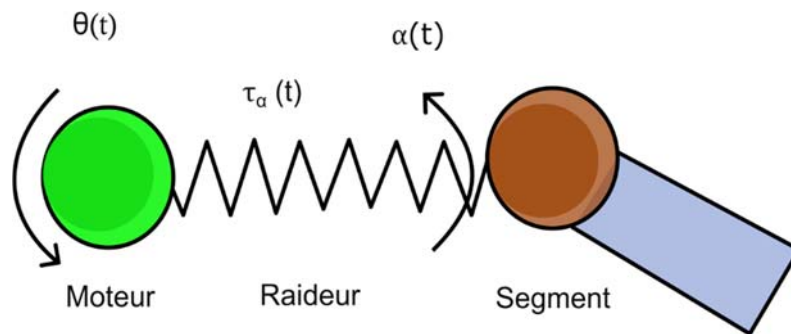


Figure 2. 1 : Schéma simplifié d'une articulation flexible [24].

2.2.2 Modélisation dynamique

Le but de ce travail est de contrôler la trajectoire de robot flexible, pour cela on aura besoin d'un modèle (même imprécis) sur lequel nous allons appliquer notre commande. La sortie à contrôler est la trajectoire parcourue par le bras, qui est donnée par la somme de l'angle du moteur θ et l'angle de déflexion de ressort α par rapport à l'arbre du moteur.

Le modèle non linéaire est donné sous la forme suivante :

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

Avec :

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix}, \quad g(x) = \begin{bmatrix} g_1(x) \\ \vdots \\ g_n(x) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$f(x), g(x)$: Champs de vecteurs, $h(x)$: Fonction scalaire non linéaire. $x \in \mathbb{R}, u \in \mathbb{R}, y \in \mathbb{R}$

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

- **Le formalisme de Lagrange** : La méthode n'est pas celle qui donne le modèle le plus performant du point de vue du nombre d'opérations, mais c'est la méthode la plus simple

compte tenu de ces objectifs. C'est la méthode utilisée ultérieurement pour la modélisation du robot manipulateur.

- **Le formalisme de Newton-Euler** : Cette méthode permet d'obtenir directement le modèle dynamique inverse sans avoir à calculer explicitement les matrices [24].

a. 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 [25] :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau \quad (2.4)$$

L : Fonction lagrangienne de robot égale à :

$$L = T - V \quad (2.5)$$

T : Energie cinétique.

V : Energie potentielle.

Q : est le vecteur des coordonnées généralisées.

τ : Vecteur des couples extérieurs appliqués au manipulateur (couple moteur).

Dans notre cas, les coordonnées généralisées sont la position angulaire du moteur θ , et l'angle de déflexion de ressort α par rapport à l'arbre du moteur (Figure 2.2).

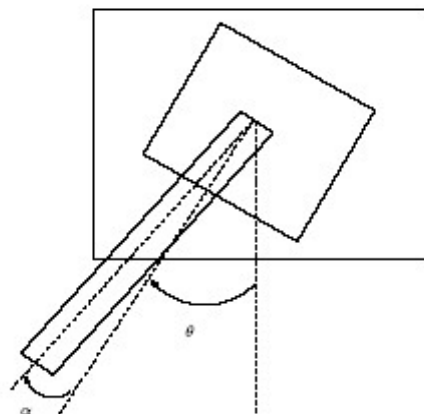


Figure 2. 2 : Coordonnées généralisées [25].

b. Calcul d'énergie cinétique

$$T = T_h + T_i \quad (2.6)$$

$$T_h = \frac{1}{2} J_h \dot{\theta}^2 \quad (2.7)$$

$$T_i = \frac{1}{2} J_i (\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2 \quad (2.8)$$

D'où :

$$T = \frac{1}{2} J_h \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} J_i (\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2 \quad (2.9)$$

Avec :

T_h : Energie cinétique du moteur.

T_i : Energie cinétique du ressort.

J_h : Moment d'inertie de moteur.

J_i : Moment d'inertie de segment.

c. Calcul d'énergie potentielle

$$V = V_g + V_s \quad (2.10)$$

$$V_g = mgh \cos(\theta + \alpha) \quad (2.11)$$

$$V_s = \frac{1}{2} K_s \alpha^2 \quad (2.12)$$

D'où :

$$V = mgh \cos(\theta + \alpha) + \frac{1}{2} K_s \alpha^2 \quad (2.13)$$

V_g : Energie potentielle de pesanteur.

V_s : Energie potentielle du ressort.

m : Masse de segment.

g : Constante de gravité.

h : Hauteur de segment.

K_s : Constante d'élasticité de ressort.

Comme le lagrangien est donné par l'équation (2.5)

Alors

$$L = \frac{1}{2}J_h\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}J_i(\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2 - mgh \cos(\theta + \alpha) - \frac{1}{2}K_s\alpha^2 \quad (2.14)$$

On applique le formalisme de Lagrange :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau \end{cases} \quad (2.15)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = J_i(\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) + K_s - mgh \sin(\theta + \alpha) = 0 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = (J_i + J_h)\ddot{\theta} + J_i\ddot{\alpha} - mgh \sin(\theta + \alpha) = \tau \end{cases} \quad (2.16)$$

Le couple moteur τ est en fonction de la tension U appliquée à l'induit qui constitue l'entrée de commande du système (Figure 2.3).

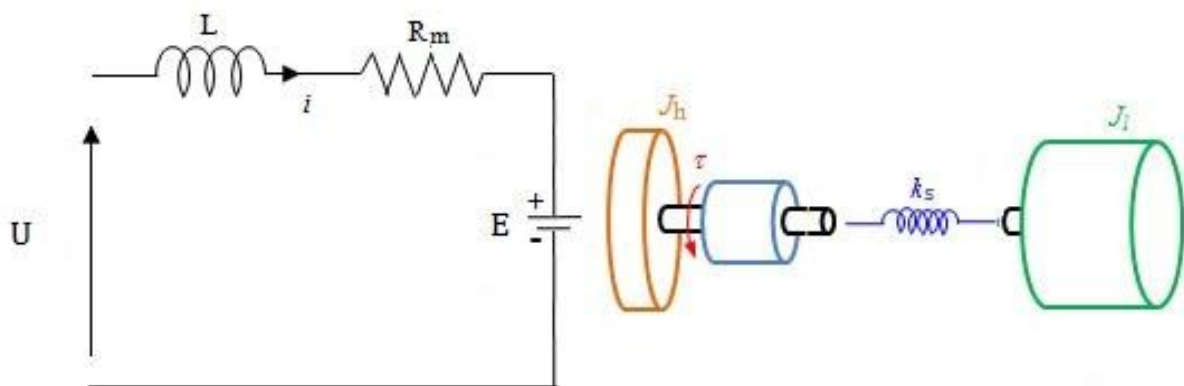


Figure 2.3 : Schéma équivalent d'un moteur [25].

$$U = i R_m + E \quad (2.17)$$

$$E = K_m K_g \Omega \quad (2.18)$$

De l'équation (2.17) et (2.18)

$$i = \frac{U}{R_m} - \left(\frac{K_m K_g}{R_m} \right) \Omega \quad (2.19)$$

On a :

$$\tau = K_m K_i i \quad (2.20)$$

Étant Ω est la vitesse angulaire du moteur.

$$\dot{\theta} = \Omega \quad (2.21)$$

Avec :

i : courant d'induit.

R_m : Résistance du moteur.

$K_m K_g$: Paramètres constants.

U : Tension appliquée à l'induit.

La relation entre le couple et la tension appliquée est donnée par :

$$\tau = \left(\frac{K_m K_g}{R_m} \right) U - \left(\frac{K_m^2 K_g^2}{R_m} \right) \dot{\theta} \quad (2.22)$$

On choisit :

$$\theta = x_1$$

$$\alpha = x_2$$

$$\dot{\theta} = x_3$$

$$\dot{\alpha} = x_4$$

Le système sera écrit de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_3 \\
 \dot{x}_2 &= x_4 \\
 \dot{x}_3 &= \frac{K_s}{J_h} x_2 - \frac{K_m^2 K g^2}{R_m J_h} x_3 + \frac{K_m K g}{R_m J_h} U \\
 \dot{x}_4 &= -\left(\frac{K_s}{J_h} + \frac{K_s}{J_i}\right) x_2 + \frac{K_m^2 K g^2}{R_m J_h} x_3 + \frac{m g h}{J_i} \sin(x_1 + x_2) - \frac{K_m K g}{R_m J_h} U
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

La sortie de ce système est la position de segment.

$$y = x_1 + x_2 \tag{2.24}$$

Le système maintenant peut s'écrire sous la forme d'état (équation 2.1) :

Avec :

$$f(x) = \begin{pmatrix} x_3 \\ x_4 \\ \frac{K_s}{J_h} x_2 - \frac{K_m^2 K g^2}{R_m J_h} x_3 \\ -\left(\frac{K_s}{J_h} + \frac{K_s}{J_i}\right) x_2 + \frac{K_m^2 K g^2}{R_m J_h} x_3 + \frac{m g h}{J_i} \sin(x_1 + x_2) \end{pmatrix}$$

$$g(x) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_m K g}{R_m J_h} \\ -\frac{K_m K g}{R_m J_h} \end{pmatrix}$$

$$h(x) = x_1 + x_2$$

Les valeurs numériques de notre système sont données par le tableau (2.1) :

paramètre	symbole	valeur
Constante d'élasticité	K_s	1.61(N/m)
Inertie de moteur	J_h	0.0021(Kg.m ²)
Masse de segment	m	0.403(Kg)
Constante de gravité	g	9.81 (m/s ²)
Hauteur de segment	h	0.06(m)
Constante de moteur	K_m	0.00767(N/(rad/s))
Inertie de segment	J_i	0.0059(Kg.m ²)
Résistance de moteur	R_m	2.6(Ω)

Tableau 2. 1 : Valeurs numériques du système.

2.3 Simulation en boucle ouverte d'un Robot manipulateur à articulation flexible

On prend : $\theta_d = 3.14$ rad

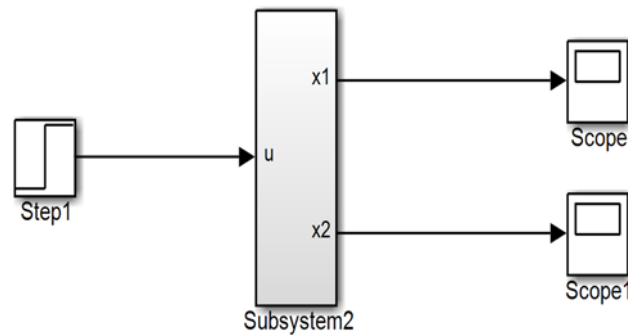


Figure 2. 4 : Schéma bloc d'un Robot manipulateur à articulation flexible.

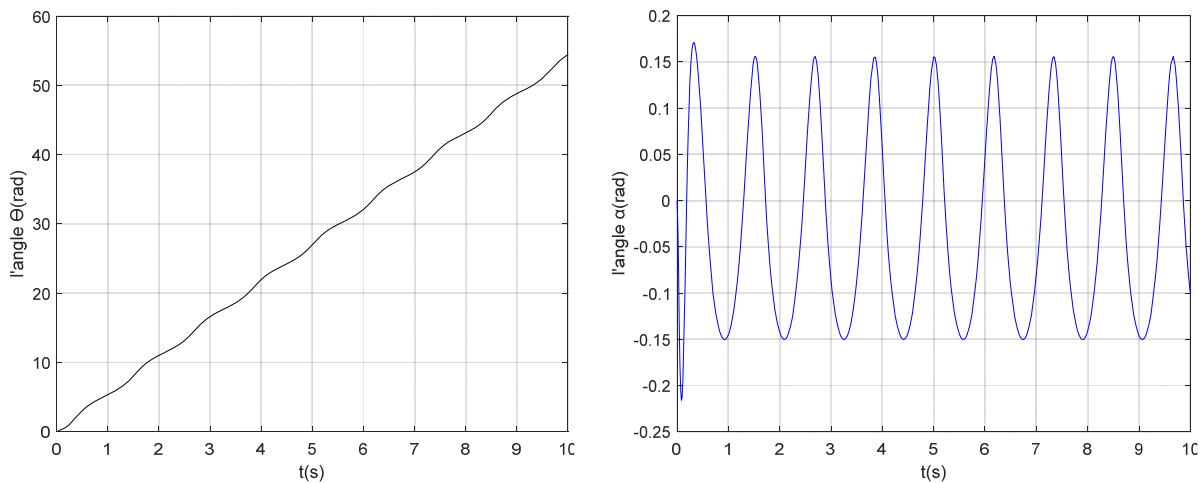


Figure 2. 5 : Réponses libres d'un Robot manipulateur à articulation flexible.

2.4 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 [26] :

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^{t_f} e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.25)$$

Où K_p , K_i et K_d sont respectivement les gains proportionnel, intégral et dérivé.

2.4.1 Simulation de la commande par régulateur PID d'un Robot manipulateur à articulation flexible

Les résultats de la position, la commande et l'erreur pour une référence échelon sont représentées par la (Figure 2.6) :

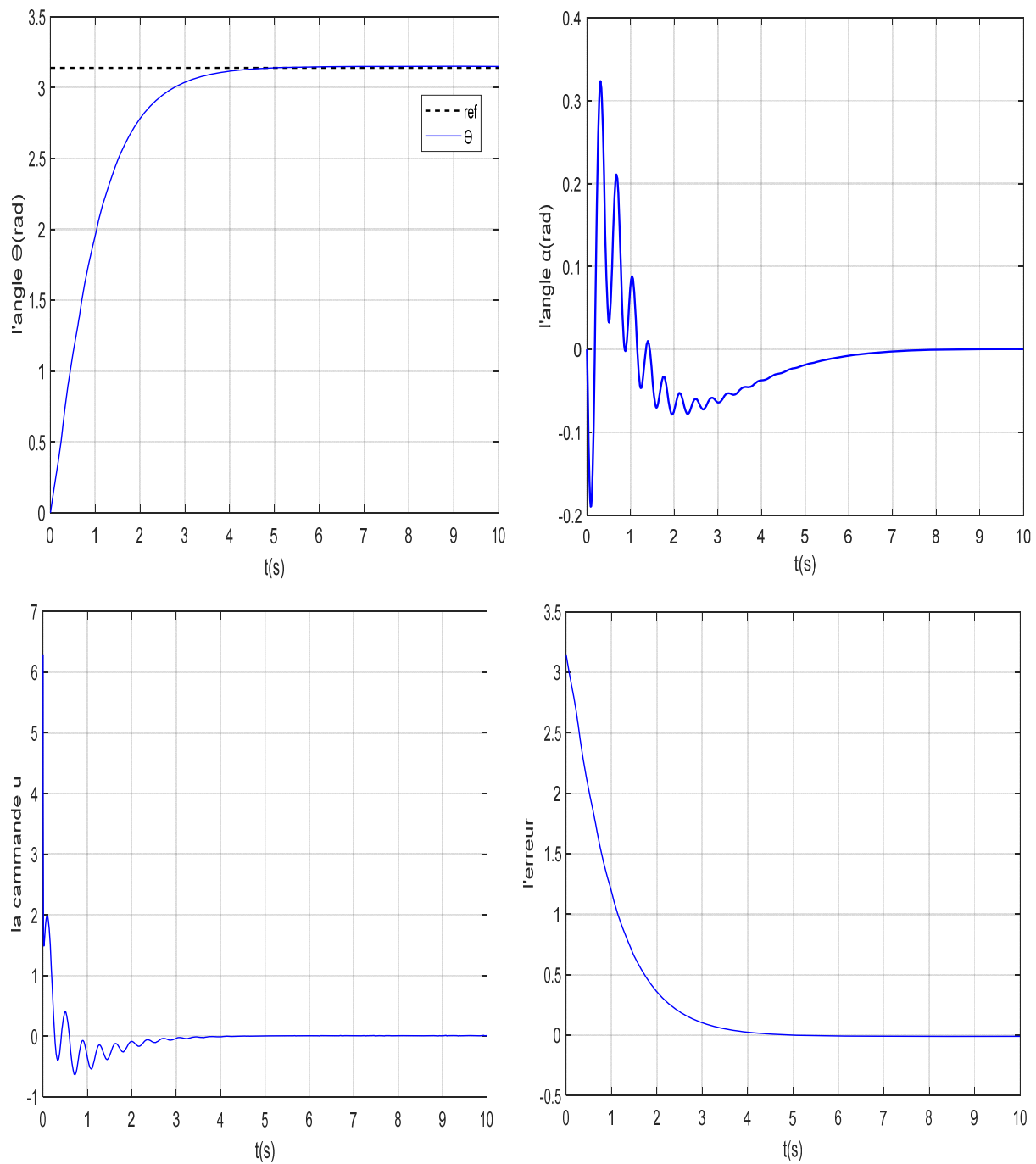


Figure 2.6 : Les réponses du système de la commande par régulateur PID.

2.4.2 Interprétation le résultat de simulation

On peut clairement voir que le régulateur PID parvient à suivre sa consigne de manière adéquate, avec un temps de réponse d'environ 3 à 4 secondes. A partir de ces figures nous pouvons constater, que les erreurs de régulation et de poursuite et la valeur du dépassement sont faibles (Figure 2.6). Nous pouvons également constater que les signaux de commande sont relativement lisses.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une modélisation dynamique basée sur la présence d'une souplesse articulaire dominante, nous l'expliquons, dans le but de fournir des équations mathématiques qui permettent la programmation, le contrôle et l'exécution des tâches requis. Le robot à articulation flexible est un modèle non linéaire avec une seule entrée et une sortie. Un test des simulations 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 le régulateur flous type-1

Chapitre 03 : Commande floue d'un robot manipulateur à articulation flexible

3.1 Introduction

La logique floue (en anglais fuzzy logic) est très en vogue de nos jours. En réalité, elle existait déjà depuis longtemps, et nous pouvons diviser son histoire de développement en trois étapes. Les paradoxes logiques et les principes de l'incertitude d'Heisenberg ont engendré l'émergence de la « logique à valeurs multiples ». En 1937, Max Black a introduit la logique continue, basée sur l'échelle des valeurs vraies $\{0, 1\}$, pour classer les éléments ou symboles. En 1965, le professeur Lotfi Zadeh a établi les bases théoriques de la logique floue [27].

Dans ce chapitre, on va présenter les principes de base de la théorie de la logique floue, puis le principe de la conception d'une commande par la logique floue d'un robot manipulateur à articulation flexible.

3.2 Historique

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

1965 : Lotfi Zadeh introduit le concept de d'écors floue.

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

1972 : M. sugeno présent 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 rn service un système de m'méto 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 [28, 29] .

3.3 Domaines d'application

Les domaines d'applications pratiques déjà connues sont innombrables, nous en citons quelques-uns [30]:

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

3.4 Les concepts de bases

3.4.1 L'ensemble flou

La théorie des ensembles flous est un concept mathématique qui vise principalement à représenter les concepts vagues et incertains du langage naturel. L'idée d'une appartenance partielle d'un élément à un ensemble est exprimée par cette théorie [31].

Dans la théorie des ensembles classiques, un sous-ensemble A de B est défini par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ qui définit tout élément x de B. La valeur de cette fonction est 1 si x est associé à A et 0 dans le cas contraire [32].

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

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 Univers de discours

La variable floue peut prendre toutes les valeurs réelles (l'intervalle numérique), généralement l'univers de discours est représenté par des lettres en majuscule « U, W, ... ».

On projettera alors les valeurs linguistiques dans l'univers de discours afin de déterminer le sous-ensemble lié à chaque valeur linguistique [33].

3.4.3 Fonction d'appartenance

L'objectif est de mettre en relation le degré de vérité de la variable floue avec la grandeur d'entrée correspondante. Les sous-ensembles flous sont ceux qui sont caractérisés par une fonction d'appartenance notée $\mu_A(x)$ de $[0,1]$. Le tableau suivant présente les fonctions d'appartenance les plus couramment utilisées [34, 35].

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

Tableau 3. 1 : fonctions d'appartenance de la logique floue.

Il est arbitraire de choisir les formes des fonctions d'appartenance. Selon des études comparatives, il a été démontré que les résultats en boucle fermée sont pratiquement identiques avec les différentes formes des fonctions d'appartenance. La forme la plus courante est en "e" [36].

3.4.4 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 [31] :

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

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 flou inclue dans V avec la fonction d'appartenance définie par :

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

3.4.5 Règles linguistiques

L'idée principale des systèmes basés sur la logique floue et d'exprimer la connaissance humaine sous la forme de règles linguistiques de forme si, alors. Chaque règle à deux parties [27] :

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

Il existe trois modules pour un régulateur à logique flou [34] :

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 :

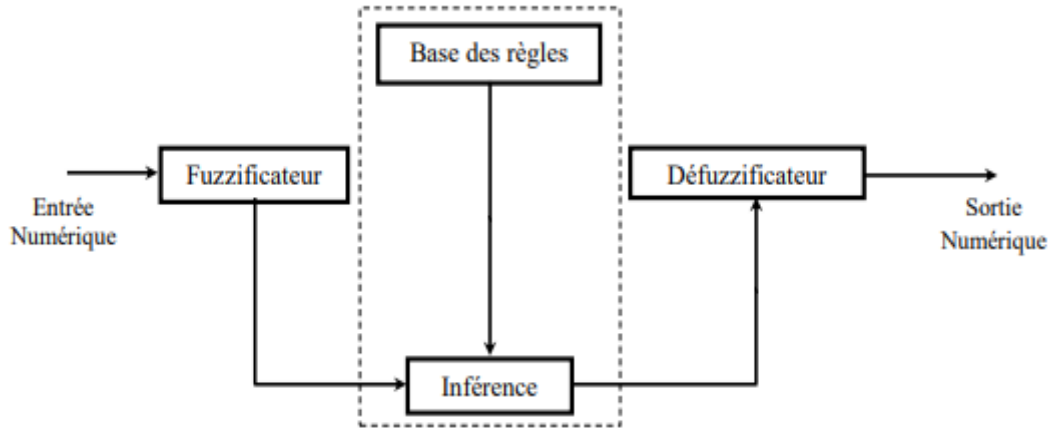


Figure 3. 1 : Schéma synoptique d'un contrôleur flou [34].

3.5.1 Fuzzification

Il s'agit du processus qui assure l'interaction entre le numérique et la linguistique. Les grandeurs numériques utilisées pour modéliser ou commander un système sont les variables d'entrée et de sortie. La fuzzification implique de convertir ces grandeurs réelles en variables linguistiques afin de les traiter en fonction d'une inférence. De cette manière, des ensembles sont associés à chaque variable d'entrée et de sortie pour caractériser les termes linguistiques utilisés par ces variables. Ces mots seront employés afin de rédiger les règles d'inférence [37].

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 groupe de connaissances représente l'expertise ou le savoir-faire de l'opérateur concernant le fonctionnement du système. Elle comprend toutes les informations et les connaissances relatives au domaine d'application, ainsi que le résultat de commande prévu. Le signal de sortie du contrôleur flou est déterminé par elle, qui représente la relation entre les variables d'entrée

converties en variables linguistiques et les variables de sortie converties en variables linguistiques [33].

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. 1 : Matrice d'inférence floue [33].

3.5.3 Mécanisme d'inférence flou

Le principe essentiel du contrôleur flou est l'inférence floue ou la logique de prise de décision, qui a la capacité de reproduire les décisions humaines et de déduire (inférer) les actions de commande floue en utilisant l'implication floue et les règles d'inférence de la logique floue. Pour générer et déterminer les variables floues de sortie, elle utilise les variables floues

transformées par la fuzzification et les règles d'inférence, en utilisant des opérations floues appliquées aux fonctions d'appartenance [36].

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 [36].

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 [32, 37]: 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 [36].

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

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 Application de la commande floue d'un robot manipulateur à articulation flexible

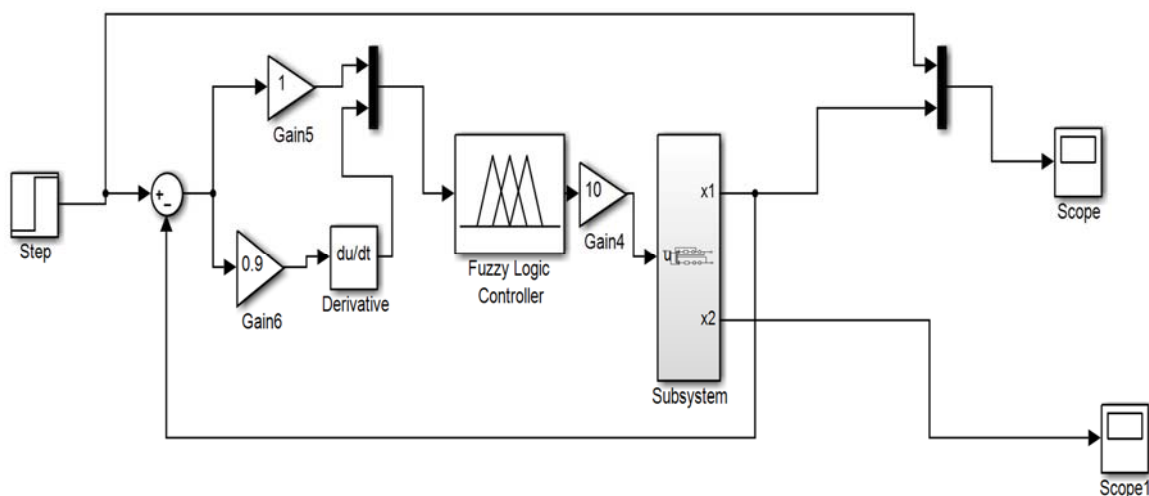


Figure 3.2 : schéma block de la commande par logique floue d'un robot manipulateur à articulation flexible

Les fonctions d'appartenance des variables d'entrée, la dérivée d'entrée et sortie sont définies par des formes triangulaires et trapézoïdales (Figures 3.3, 3.4 et 3.5).

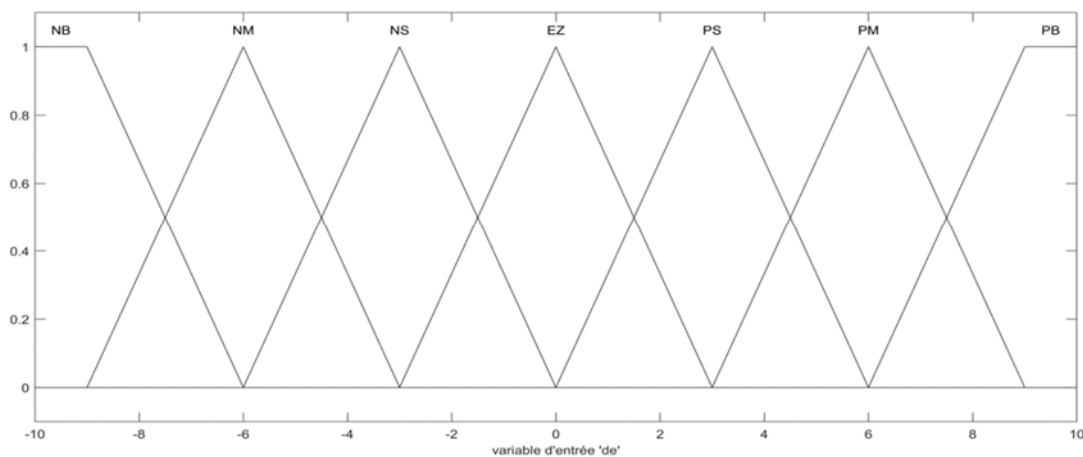


Figure 3.3 : fonction d'appartenance de l'erreur.

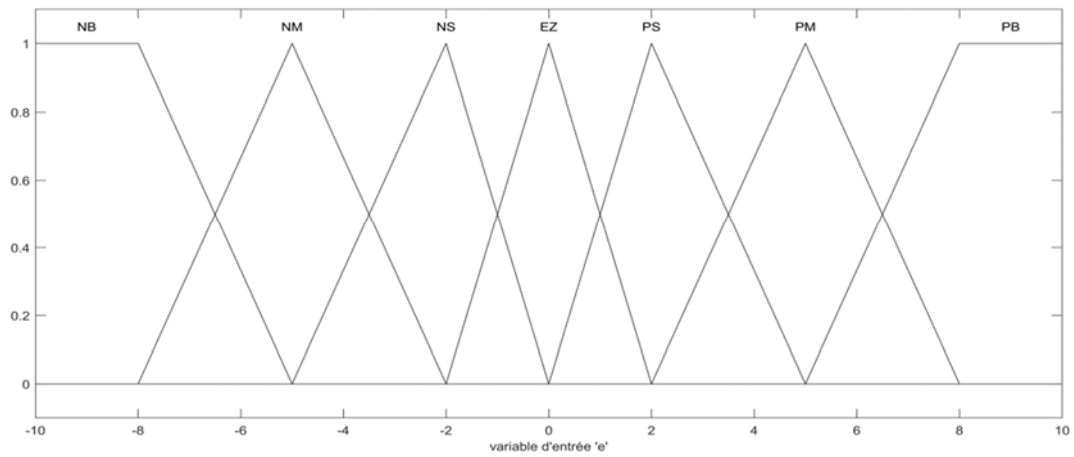


Figure 3. 4 : fonction d'appartenance de la dérivée de l'erreur.

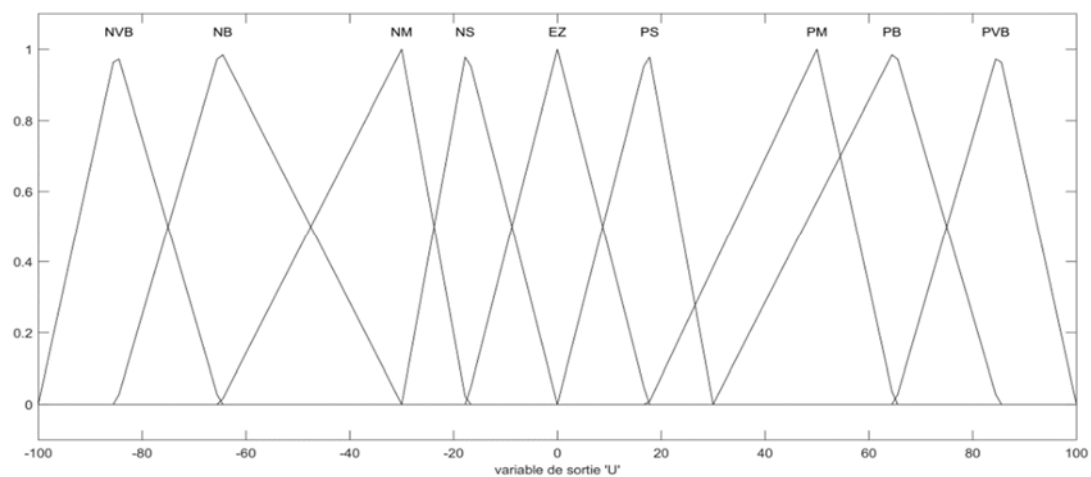


Figure 3. 5 : fonction d'appartenance de la sortie.

3.6.1 Résultats de simulation de la commande floue d'un robot manipulateur à articulation flexible

Le but de cet exemple est de tester la poursuite d'une trajectoire sous forme échelon. $\theta_{ref} = \pi$ et α éligible à 0.

Les résultats de la position, la commande et l'erreur sont représentées par la (Figure 3.6)

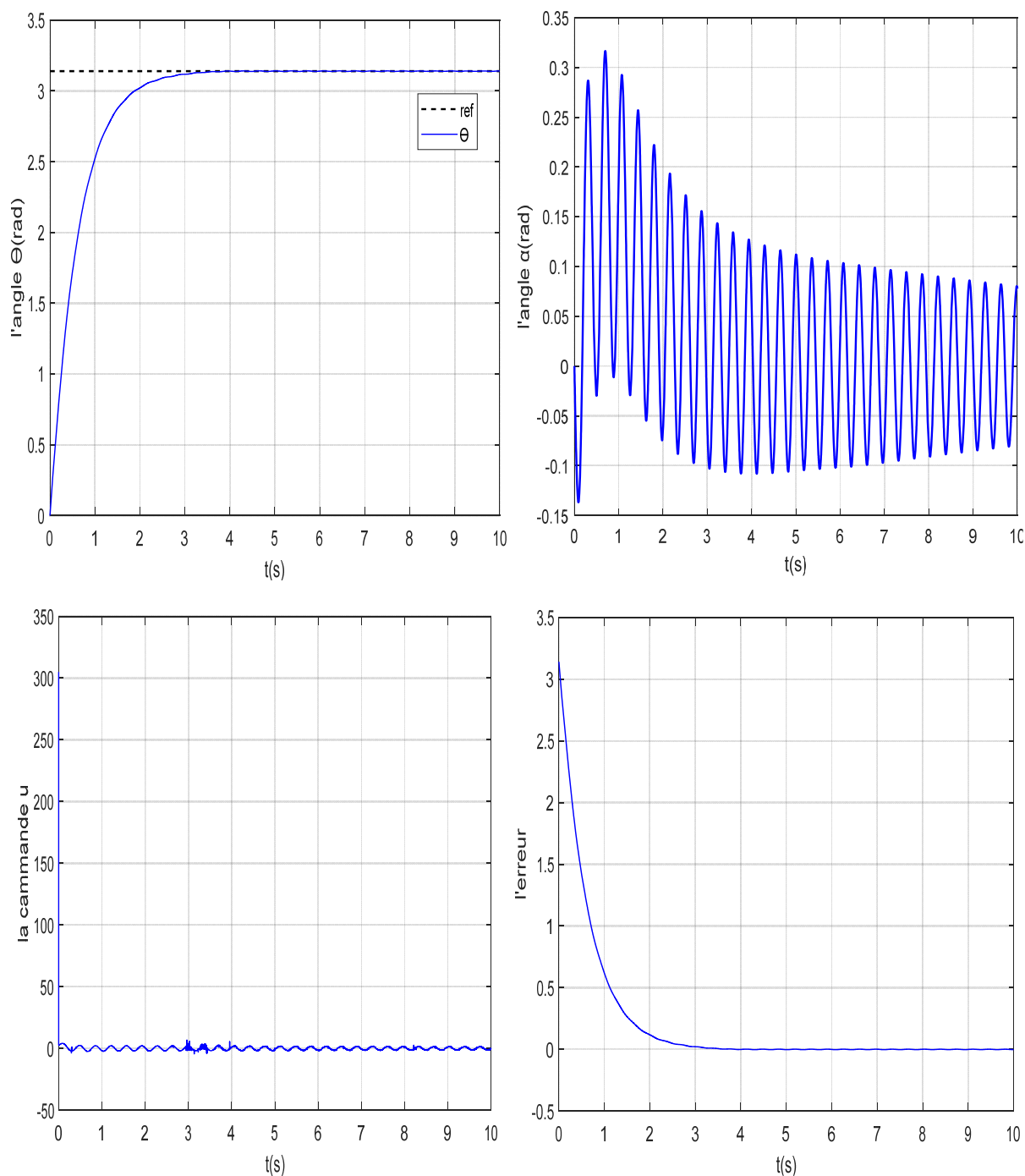


Figure 3. 6 : Résultats de simulation de la commande floue.

3.6.2 Interprétation les résultats de simulation

On peut clairement voir que le contrôleur flou parvient à suivre sa trajectoire de manière adéquate, avec un temps de réponse d'environ 4 s. En observant la figure de la trajectoire de déflexion, on peut constater que les vibrations sont faibles et rapidement réduites.

La(Figure3.6) illustre l'évolution de la commande floue. Dans un premier temps, on peut observer des oscillations et un dépassement. Lorsque le déplacement désiré est atteint, elle devient nulle et les vibrations sont amorties.

3.7 Conclusion

Ce chapitre a abordé la stratégie de commande par logique floue appliquée à un robot manipulateur à articulation flexible. Les résultats des simulations indiquent que nous avons atteint notre objectif de suivre la référence en temps fini. Avec une grande précision, une robustesse remarquable et une réduction considérable des vibrations. Nous avons réussi à contourner la difficulté du modèle mathématique en adoptant un modèle linguistique basé sur une expertise grâce à la logique floue. Grâce au contrôleur flou, nous avons pu remplacer les contrôleurs classiques tels que le PD et le PID. Il aide à surmonter les incertitudes paramétriques et les perturbations. Le contrôleur flou peut être utilisé pour un système linéaire ou non linéaire. En plus de la régulation, il est possible d'utiliser la logique floue pour gérer des architectures de contrôle intelligentes complexes. Le chapitre suivant parle d'une autre commande intelligente, la commande neurone floue.

Chapitre 04 : Commande ANFIS d'un robot manipulateur à articulation flexible.

4.1 Introduction

Les réseaux de neurones, issus de structures cellulaires artificielles, apportent une approche novatrice pour traiter les problèmes de perception, de mémoire, d'apprentissage et de raisonnement. Ils offrent des solutions prometteuses pour surmonter les limites des ordinateurs traditionnels en exploitant le traitement simultané de l'information et en reproduisant les mécanismes des neurones [38].

Dans ce chapitre, nous étudierons les principales architectures de réseaux de neurones, en mettant l'accent sur les mécanismes internes essentiels. Nous accorderons une importance égale à l'analyse mathématique des résultats et à leur application pratique pour résoudre des problèmes concrets. De plus, nous explorerons les concepts liés aux ensembles flous (neurone-floue) ANFIS, étant donné leur intégration dans certaines architectures de réseaux de neurones, ainsi que le principe de conception d'une commande ANFIS d'un robot manipulateur à articulation flexible.

4.2 Historique

1890 : W. James, célèbre psychologue américain introduit le concept de mémoire associative, et propose ce qui deviendra une loi de fonctionnement pour l'apprentissage sur les réseaux de neurones connue plus tard sous le nom de loi de Hebb.

1943 : J. Mc Culloch et W. Pitts laissent leurs noms à une modélisation du neurone biologique (un neurone au comportement binaire). Ceux sont les premiers à montrer que des réseaux de neurones formels simples peuvent réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques complexes (tout au moins au niveau théorique)

1949 : D. Hebb, physiologiste américain explique le conditionnement chez l'animal par les propriétés des neurones eux-mêmes. Ainsi, un conditionnement de type pavlovien tel que, nourrir tous les jours à la même heure un chien, entraîne chez cet animal la sécrétion de salive à 7 cette heure précise même en l'absence de nourriture. La loi de modification des propriétés des connexions entre neurones qu'il propose explique en partie ce type de résultats expérimentaux [39].

4.3 Domaine d'application

- Statistiques : analyse de données / prévision / classification
- Robotique : contrôle et guidage de robots ou de véhicules autonomes
- Imagerie reconnaissance de formes
- Traitement du signal
- Simulation de l'apprentissage

4.4 Modèle d'un neurone

4.4.1 Modèle biologique

Les modèles de neurones à impulsion, également appelés modèles de neurones à impulsion, sont des représentations mathématiques des caractéristiques des neurones, un type de cellules du système nerveux qui produisent des potentiels électriques d'une durée d'environ une milliseconde. On les désigne sous les noms de potentiels d'action, de pics ou d'impulsions (Figure 4.1). Le long de l'axone, les impulsions se déplacent jusqu'aux synapses du neurone émetteur et sont ensuite transmises à de nombreux autres neurones. Les neurones à impulsions sont considérés comme l'un des éléments essentiels du système nerveux, car ils jouent un rôle essentiel dans le traitement de l'information [40, 41].

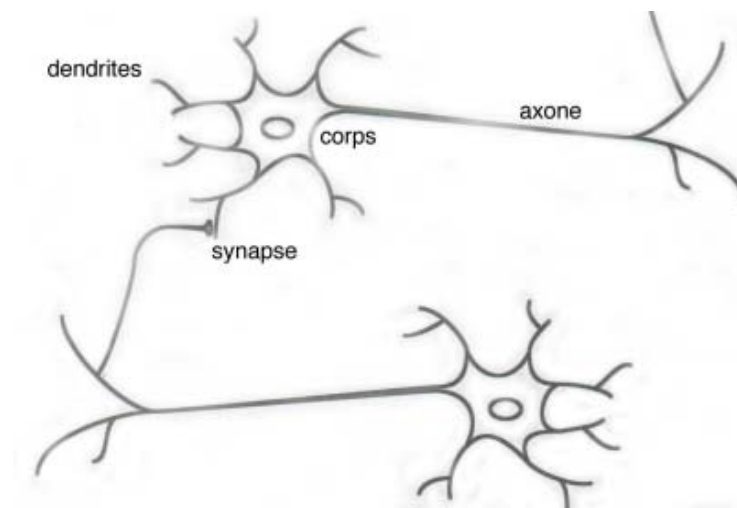


Figure 4. 1 : Schéma d'un neurone biologique [40].

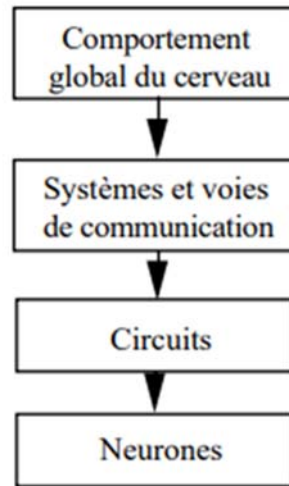


Figure 4.2 : Hypothèse biologique de génération d'un comportement intelligent [40].

4.4.2 Le modelé mathématique

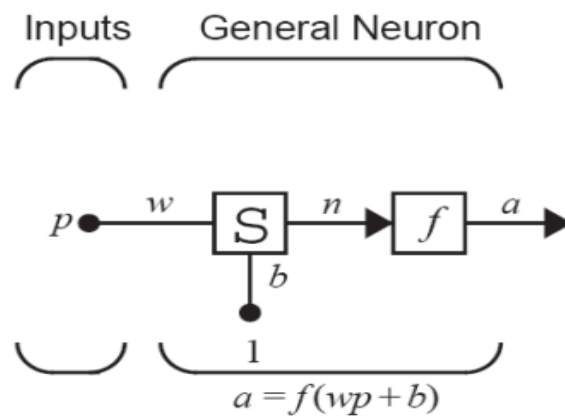


Figure 4.3 : Modèle mathématique de RNA [42].

Le modèle mathématique d'un neurone artificiel est illustré à la (figure 4.3). Un neurone est essentiellement constitué d'un intégrateur qui effectue la somme pondérée de ses entrées [42].

Le résultat N de cette somme est ensuite transformée par une fonction de transfert f qui produit la sortie a du neurone. En suivant les notations présentées à la section précédente, les R entrées du neurones correspondent au vecteur $P = [p_1 p_2 \dots p_R]^T$, alors que

$W = [w_{1,1} w_{1,2} \dots w_{1,R}]^T$ Représente le vecteur des poids du neurone la sortie n de l'intégrateur est donnée par l'équation suivante :

$$n = \sum_{j=1}^R w_{1,j} p_j - b \quad (4.1)$$

$$n = w_{1,1} p_1 + w_{1,2} p_2 + \dots + w_{1,R} p_R - b \quad (4.2)$$

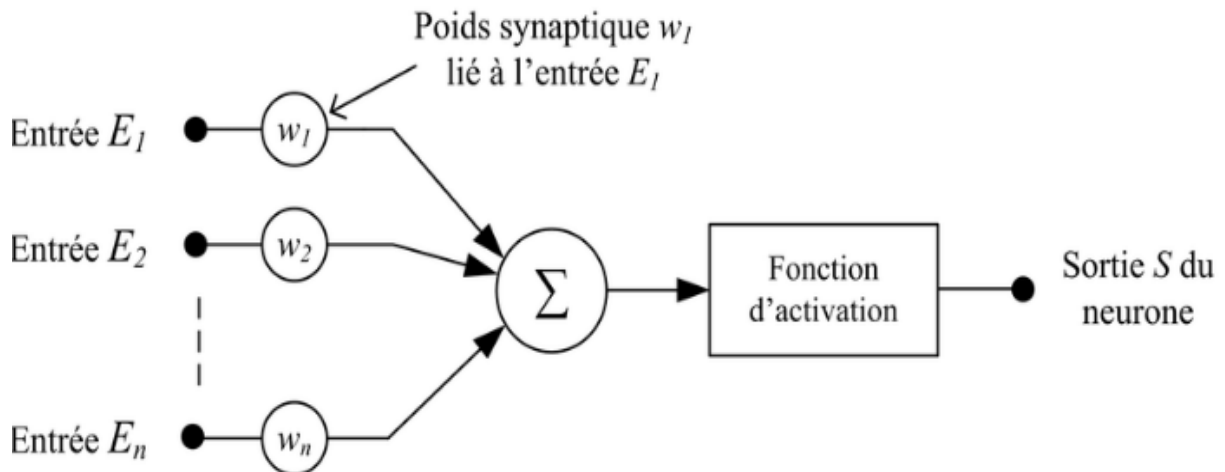


Figure 4.4 : Schéma de la structure d'un neurone artificiel [42].

• RNA multicouches

Nous exposons ici l'une des structures de réseaux les plus couramment employées. La structure des neurones est constituée de n couches successives ($n > 3$). La couche d'entrée est la première couche où les neurones sont activés fortement en fonction de la valeur des données d'entrée. Elle est connue sous le nom de couche de sortie [43, 44].

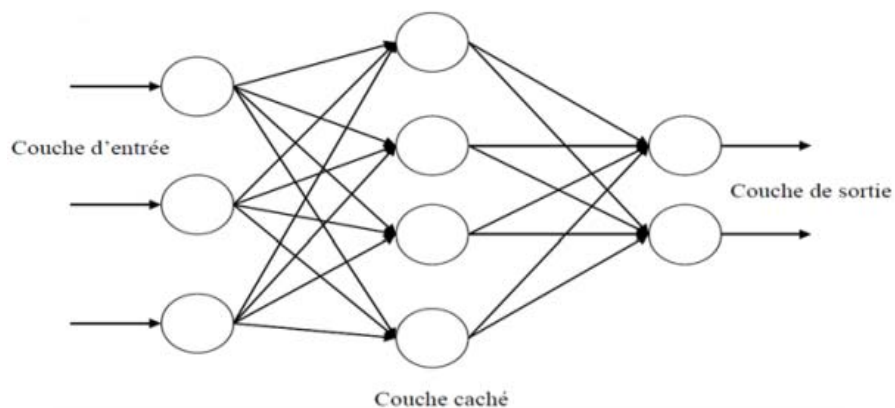


Figure 4.5 : Réseaux multicouche [43].

4.5 Les Fonctions d'activation

Le RNA peut modéliser des équations dont la sortie n'est pas une combinaison linéaire des entrées en utilisant une fonction d'activation non-linéaire.

Cette caractéristique confère au RNA de grandes capacités de modélisation fortement appréciées pour la résolution de problèmes non-linéaires. Voici quelques illustrations de fonctionnalités d'activation [45].

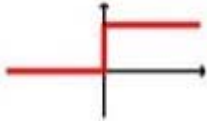
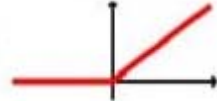
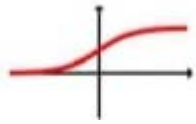
Les Fonction d'activation	Equation	graph
Echelon	$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases}$	
Rampe	$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 1 \\ x & \text{si } 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases}$	
Sigmoïde	$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}}$	

Tableau 4. 1 : tableaux de fonction d'activation.

4.6 Apprentissage d'un réseau de neurones

4.6.1 Définition

L'apprentissage correspond à une étape du développement d'un réseau de neurones où le comportement du réseau est ajusté jusqu'à ce qu'il obtienne le comportement souhaité [45].

Il existe différentes équations mathématiques pour ajuster le poids des liens entre les neurones :

4.6.2 Les lois de l'apprentissage

a. Loi de Hebb

Si deux unités connectées sont actives simultanément, le poids de leur connexion est augmenté ou diminué. R est une constante positive qui représente la force d'apprentissage (Learning rate) [42, 40].

$$\Delta W_{ji} = R a_i a_j \quad (4.3)$$

b. Loi de Widrow-Hoff (delta rule)

a_i activation produite par le réseau de réponse désirée par l'expert humain par exemple si la sortie est inférieure à la réponse désirée, il va falloir augmenter le poids de la connexion à condition bien sûr que l'unité j soit excitatrice (égale à 1). On est dans l'hypothèse d'unités booléennes $\{0,1\}$ [46].

$$\Delta W_{ji} = R(d_i - a_i)a_j \quad (4.4)$$

c. Loi de Grossberg.

Algorithmes d'apprentissage On augmente les poids qui entrent sur l'unité gagnante a_i s'ils sont trop faibles, pour les rapprocher du vecteur d'entrée a_j . C'est la règle d'apprentissage utilisée dans les cartes auto-organisatrices de Kohonen [45].

$$\Delta W_{ji} = R a_i (a_j - W_{ji}) \quad (4.5)$$

4.7 L'approche neuro-floue

Les réseaux de neurones et la logique floue peuvent être utilisés ensemble pour bénéficier des avantages des deux méthodes, avec les capacités d'apprentissage de la première et la lisibilité et la souplesse de la seconde. Plusieurs variations de ces deux approches ont été élaborées. Depuis 1988. Elles ont engendré l'apparition des systèmes neuro-flous, qui sont généralement axés sur la gestion de systèmes complexes et les difficultés de classification [47].

4.8 Motivations pour une approche hybride

Ces dernières années, de nombreuses recherches ont porté sur l'analyse combinée des réseaux de neurones et de la logique floue. Cette tendance peut être attribuée aux nombreuses similitudes entre ces deux méthodes. D'une part, elles sont toutes deux des approximations universelles de fonction, capables de modéliser des fonctions continues. En outre, elles partagent des similitudes structurelles, notamment dans la représentation des règles floues (SI-ALORS) et des connexions entre les neurones [48].

De plus, les fonctions des neurones formels sont similaires aux fonctions d'appartenance définissant les variables d'un système flou. Enfin, les opérations de multiplication sont également liées dans les deux domaines. Certains chercheurs ont exploité cette complémentarité en proposant des modèles hybrides combinant les caractéristiques des deux approches [49].

4.8.1 Systèmes hybrides neuro-flous

La logique floue et les réseaux de neurones artificiels peuvent se compléter sur plusieurs aspects. La logique floue permet une détermination rapide des tâches à réaliser en utilisant la connaissance symbolique disponible. Cependant, l'amélioration de ses paramètres reste complexe dans de nombreux cas.

En revanche, les modèles courants de RNA n'intègrent pas de connaissances préalables, mais permettent d'ajuster le comportement du système par apprentissage. Depuis les années 90, de nombreux chercheurs ont cherché à concilier ces deux paradigmes de différentes manières. Nous nous concentrons ici sur les méthodes de représentation sous forme de RNA [48]. Le système d'inférence floue repose sur des règles, utilisant des fonctions d'activation spécifiques pour les unités du réseau, afin de reproduire les éléments d'un système d'inférence floue. La structure du réseau est choisie en fonction de la forme de la fonction recherchée, avec des dépendances spécifiées par les règles floues. Les paramètres des règles peuvent être ajustés par un algorithme d'apprentissage supervisé. La logique floue, comme les réseaux de neurones, présente des propriétés d'approximation universelle de fonction, ce qui permet un ajustement précis du comportement du système par apprentissage [49].

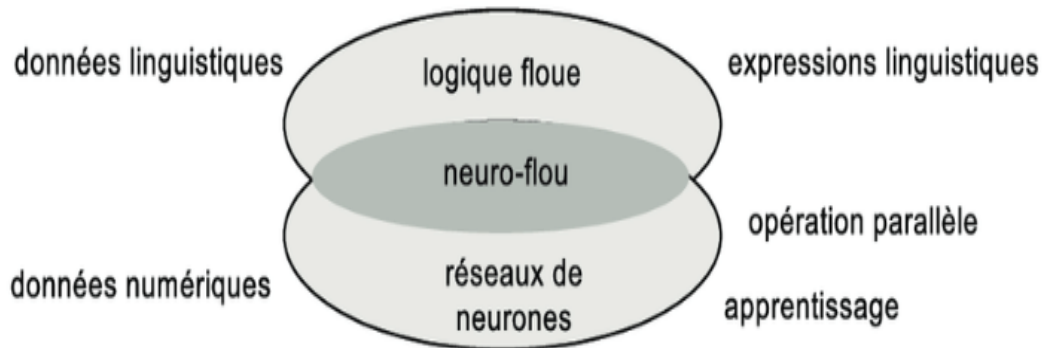


Figure 4. 6 : Principe du système neuro-flou [49].

La (Figure 4.6) résume le principe du système neuro-flou qui représente l'intersection entre la logique floue et les réseaux de neurones.

Un système neuro-flou est donc défini comme étant un réseau neuronal multicouche avec des paramètres flous, ou comme un système flou mis en application sous une forme distribuée parallèle. Il a été notamment répertorié trois familles différentes :

1. Le modèle FALCON et le modèle GARIC

Ces deux structures à 5 couches utilisent la fuzzification en entrée et la défuzzification en sortie, correspondant à l'interprétation juste de la technique de Mamdani. Ce sont des structures très précises mais très lentes à l'exécution. Ces modèles sont généralement utilisés pour la commande [47].

2. Le modèle NEFCLASS

Modèle utilisé principalement en classification, il est constitué de 3 couches ; une couche d'entrée avec des fonctions d'appartenance, une couche cachée représentée par des règles et une couche de sortie définissant les classes. Modèle facile à mettre en application car il évite l'étape de défuzzification tout en étant précis [47].

3. Le modèle ANFIS

Modèle le plus utilisé en pratique. C'est une structure à 5 couches qui affine les règles floues déjà établies par des experts humains et réajuste le chevauchement entre les différents sous-ensembles flous. Des applications dans le traitement du signal et le filtrage adaptatif ont été réalisées avec cette architecture [47].

4.8.2 Système d'inférence floue basé sur les réseaux de neurones adaptatifs

Les réseaux de neurones (RN) multicouches sont des outils d'approximation universels, reconnus pour leur remarquable capacité d'apprentissage. Cependant, leur structure et leurs paramètres manquent parfois de justifications physiques, et ils ne peuvent pas toujours bénéficier de la connaissance humaine pour leur conception. À l'inverse, les systèmes d'inférence floue sont également des outils d'approximation universels, souvent construits à partir de connaissances humaines et offrant une grande expressivité grâce à l'utilisation de variables linguistiques. Face à ces constats, il est apparu naturel de fusionner les concepts des deux approches pour créer des systèmes hybrides. C'est ainsi que l'approche Neuro-floue est née [48].

Plusieurs auteurs ont exploré cette approche, avec un intérêt particulier pour un type spécial de réseaux neuro-flous appelé ANFIS (Système d'inférence floue organisé en réseau adaptatif), introduit par Jang [50]. La méthode de modélisation de Takagi & Sugeno a été largement utilisée dans divers domaines tels que le contrôle, la prédiction et l'inférence.

Cependant, certaines lacunes persistent, notamment :

- L'absence de méthodes standardisées pour convertir l'expérience humaine ou la connaissance humaine en règles et en bases de données pour un système d'inférence floue.
- La nécessité de méthodes efficaces pour ajuster les fonctions d'appartenance en minimisant les erreurs de sortie ou en maximisant les performances. Dans ce contexte, J.S.R. JANG a proposé une nouvelle architecture appelée S.I.F.R.N.A (ANFIS : Système d'inférence floue basé sur les réseaux de neurones adaptatifs), qui peut servir de base pour construire des ensembles de règles "Si-Alors" avec des fonctions d'appartenance adaptées à partir d'un ensemble de données (entrées/sorties) du système.

4.9 Structure d'ANFIS (Adaptative Network Fuzzy Inférence System)

ANFIS met en application un SIF du type Takagi Sugeno et a une architecture composée de cinq couches comme représentée sur la (Figure 4.7). Pour simplifier la compréhension et sans perte de généralité, nous considérons un système à deux entrées x_1 et x_2 et une sortie y . Considérons aussi un modèle flou de type TSK de ce système, composé des deux règles suivantes :

$$\text{Si } x_1 \text{ est } A_1 \text{ est } X_2 \text{ est } B_1 \text{ alors } F_1(x_1, x_2) = a_1x_1 + b_1x_2 + c_1 \quad (4.6)$$

$$\text{Si } x_1 \text{ est } A_2 \text{ est } X_2 \text{ est } B_2 \text{ est alors } f_2(x_1, x_2) = a_2x_1 + b_2x_2 + c_2 \quad (4.7)$$

Jang a proposé de représenter cette base de règles par le réseau adaptatif de la (Figure 4.7)

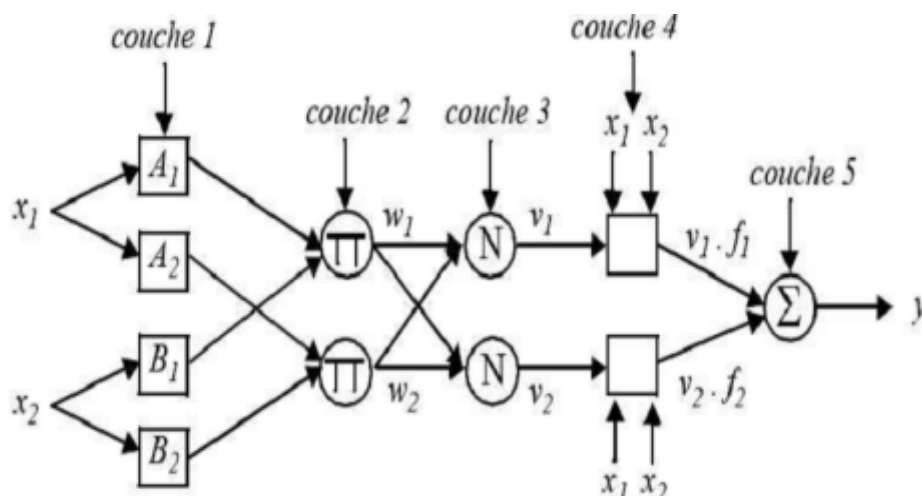


Figure 4. 7 : Architecture équivalente d'ANFIS pour deux entrées à deux règles [38].

Le réseau adaptatif ANFIS est un réseau multi-couches dont les connexions ne sont pas pondérées, ou ont toutes un poids de 1. Les nœuds sont de deux types différents selon leur fonctionnalité: les nœuds carrés (adaptatifs) contiennent des paramètres, et les nœuds circulaires (fixes) n'ont pas de paramètres. Toutefois, chaque nœud (carré ou circulaire) k applique une fonction sur ses signaux d'entrées [38].

La sortie O_i^k du nœud i de la couche k (appelée nœud (i,k)) dépend des signaux provenant de la couche k-1 et des paramètres du nœud (i,k) c'est-à-dire ,

$$O_i^k = f(o_i^{k-1} \dots O_{nk-1}^{k-1}), a, b, c \dots \dots) \quad (4.7)$$

Ou n_{k-1} est le nombre de nœuds dans la couche k-1, et a,b,c.....sont les paramètres du nœud (i,k).pour un nœud circulaire ces paramètres n'existent pas.

Dans le réseau de figure (4.7) ,les nœuds d'un même couche ont des fonction issues d'un même famille que nous explicitons ci-dessous :

Couche 1 :

La première couche représente les fonctions d'appartenance floues. Chaque nœud de cette couche est un nœud carré avec une fonction

$$O_i^1 = \mu_{Ai}(x). \quad (4.8)$$

Couche 2 :

Chaque nœud i de cette couche est un nœud circulaire appelé π qui engendre en sortie le produit de ses entrées. Ce produit représente le degré d'activation d'une règle :

$$W_i = \mu_{Ai}(x_1) \cdot \mu_{Bi}(x_2) \quad i=1,2 \quad (4.9)$$

Couche 3 :

Chaque nœud de cette couche est un nœud circulaire appelé N. La sortie du nœud i est le degré d'activation normalisé de la règle i:

$$v_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad (4.10)$$

Couche 4 :

La quatrième couche calcule les coefficients de l'équation du premier ordre d'une règle de type Takagi-Sugeno et cela pour chaque règle floue. Chaque nœud de cette couche est un nœud carré avec une fonction réalisant le calcul :

$$O_i^4 = v_i f_i = v_i (a_i x + b_i x_2 + c_i), \quad i=1, 2 \quad (4.11)$$

Où v_i est la sortie de la couche 3, et $\{a_i, b_i, c_i\}$ est l'ensemble des paramètres de sortie de la règle i .

Couche 5 :

La cinquième couche qui représente la couche de sortie, calcule la sortie globale Pesée (pondérée) du système. Le seul nœud de cette couche est un nœud circulaire qui effectue la somme des signaux provenant de la couche 4 :

$$O_i^5 = y = \sum_i v_i f_i \quad (4.12)$$

La généralisation du réseau à plusieurs entrées se fait sans difficulté. L'apprentissage implique l'identification des paramètres des prémisses et des conséquences, via un algorithme combinant descente de gradient et estimation par moindres carrés, En ce qui concerne les paramètres des prémisses (couche 1) .

Jang recommande l'identification des paramètres prémisses uniquement avec de grands ensembles de données, sinon, conserver les fonctions d'appartenance de l'expert. Il montre également l'équivalence entre les réseaux ANFIS et les réseaux neuronaux classiques [37].

4.10 Utilisation de l'outil neuro-flou

Taper la commande '*Anfisedit*' pour ouvrir l'outil d'ajustement du modèle ANFIS qui est composé de quatre parties : chargement des données, génération du SIF, apprentissage du SIF, test du SIF.

4.11 Application de la commande ANFIS d'un robot manipulateur à articulation flexible

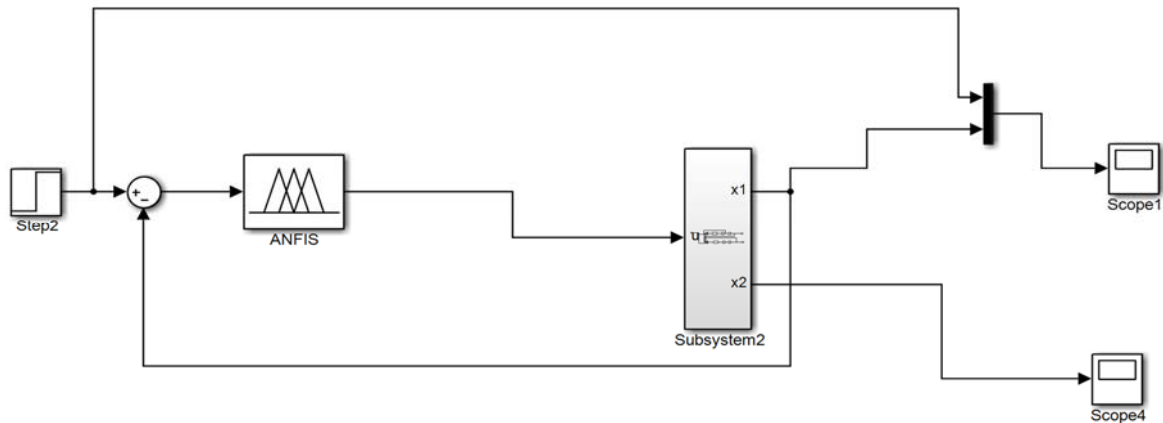


Figure 4. 8 : schéma block de la commande ANFIS d'un robot manipulateur à articulation flexible.

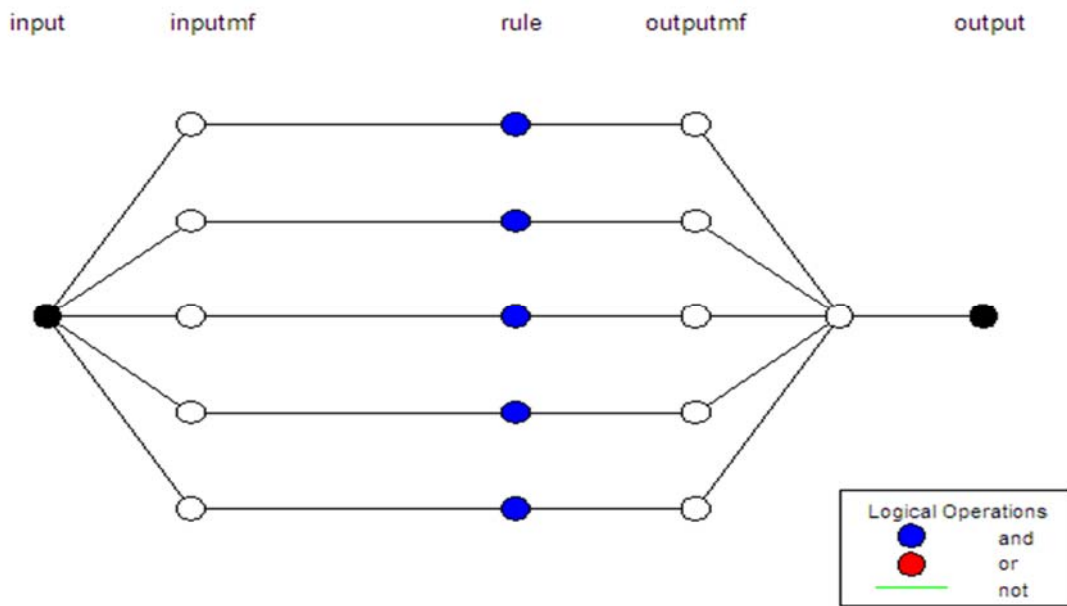


Figure 4. 9 : Architecture équivalente d'ANFIS d'un robot manipulateur à articulation flexible.

4.11.1 Résultats de simulation de la commande ANFIS d'un robot manipulateur à articulation flexible

Les résultats de la position, la commande et l'erreur pour une référence échelon sont représentées par la (Figure 4.10)

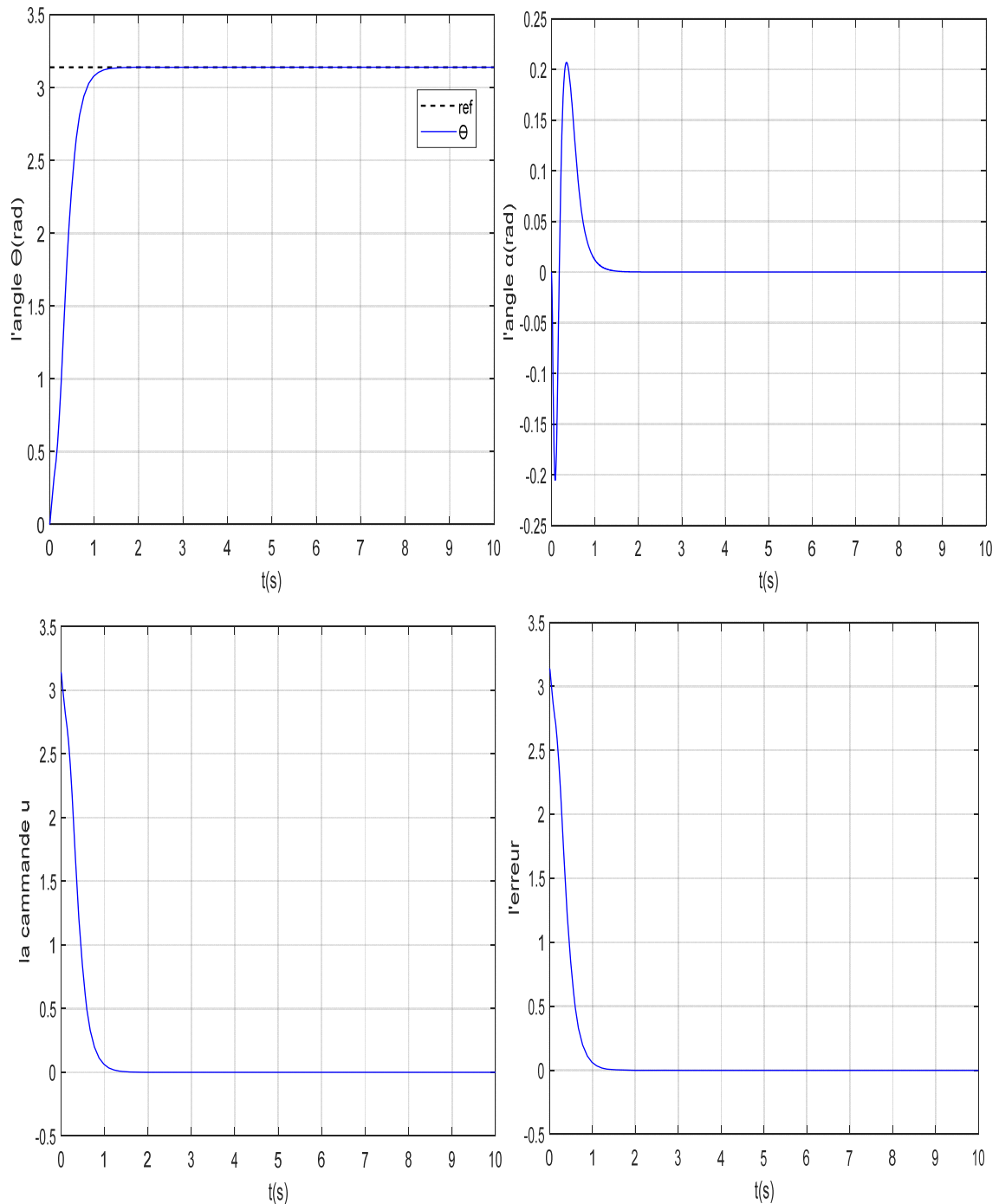


Figure 4. 10 : Résultats de simulation par la commande ANFIS d'un robot manipulateur à articulation flexible.

4.11.2 Interprétation les résultats de simulation

Les résultats de simulation par la commande ANFIS appliquée sur le système robot manipulateur à articulation flexible sont présentés sur le (Figure 4.10). Nous remarquons qu'on a abouti à des résultats satisfaisant en le temps de réponse et la stabilité du système et la précision de convergence vers leurs pour une entrée échelon.

Les résultats illustrent que la loi de commande de logique ANFIS donne de meilleures performances comparées à la loi les autres commandes, à savoir le temps de réponse et la précision de convergence vers leur valeur désirée.

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

Pour examiner les différentes lois de commande développées pour le robot manipulateur à articulation flexible, 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

$$J_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^P (u^T u) \quad (4.13)$$

$$J_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^P (e^T e) \quad (4.14)$$

Où :

u : est la commande à l'entrée du système et e l'erreur statique de réglage.

Critère	Commandes développées pour robot manipulateur à articulation flexible		
	Commande par PID	Commande par LFT1	Commande par ANFIS
$J_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^P (u^T u)$	210.5452	$4.4572 \cdot 10^5$	82.6174
$J_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^P (e^T e)$	235.4606	$1.244 \cdot 10^3$	174.2301

Tableau 4. 1 : Étude comparative entre les commandes développées pour robot manipulateur à articulation flexible.

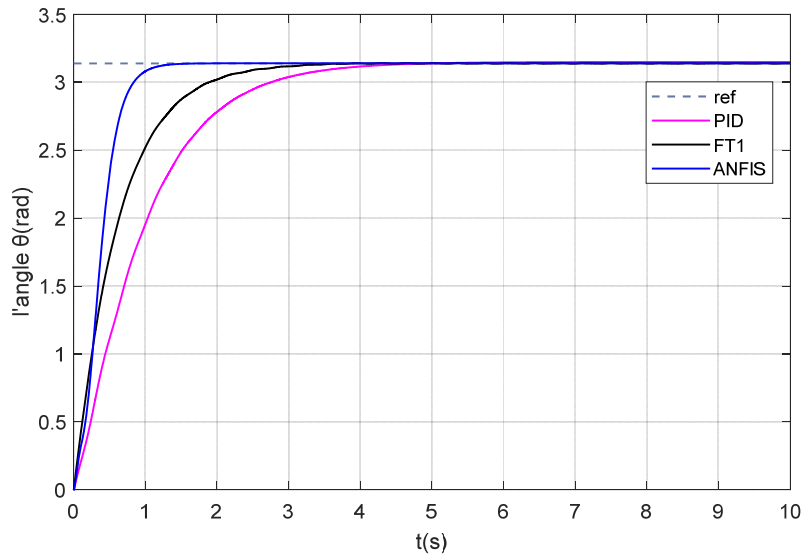


Figure 4.11 : La sortie θ des différentes lois de commande développées d'un robot manipulateur à articulation flexible.

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 (4.2), 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 10s].

Cette comparaison se base sur l'évolution temporelle de la commande et de l'erreur. D'après les résultats obtenus dans le tableau 4.2, nous pouvons conclure que pour la commande par ANFIS, le critère $J_1 = 82.6174$ prend la valeur la plus faible, le critère $J_2 = 174.2301$ prend la valeur la plus faible en simulation. Alors nous pouvons déduire que pour la commande par ANFIS, le système est bien modélisé et pour cela le critère d'énergétique J_1 des ANFIS prend la valeur la plus petite.

D'après les courbes, nous remarquons que le temps de réponse est plus rapide dans le cas de la commande par ANFIS Par rapport d'autres types des commandes la logique floue type-1 et commande PID

- On constate également que le taux d'erreur est très faible et quasiment inexistant dans le cadre de la commande par ANFIS, ce qui garantit la stabilité et la précision du système.

4.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés les notions générales de réseaux des neurones et la composition d'un système par la commande ANFIS. L'accent a particulièrement été mis sur les différentes étapes dans le traitement des règles d'un ANFIS et les différents types lois des neurones artificielle. En conclusion, l'intégration des réseaux de neurones dans les systèmes de commande de processus non linéaires ouvre une voie prometteuse pour la conception de commandes intelligentes capables d'approximer les fonctions de commande complexes pour obtenir des résultats optimaux.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés au problème du contrôle du mouvement des robots manipulateurs à articulation flexible. Ces systèmes sont non linéaires, complexes et vibratoires, ce qui rend leur contrôle difficile. Afin de répondre aux spécifications de performance en termes de suivi de trajectoire et d'atténuation des vibrations, nous avons étudié trois types de commandes non linéaires : le contrôle par PID, le contrôle par logique floue de type 1, et les réseaux de neurones artificiels et former le système de commande ANFIS pour la régulation et le suivi de trajectoires, dans le but de comparer les mouvements des robots manipulateurs à articulation flexible. Premièrement, nous avons présenté les concepts de base et les définitions pour comprendre les robots manipulateurs à articulation flexible, ainsi que quelques exemples de leurs domaines d'application, en mettant en avant les caractéristiques spécifiques des articulations flexibles. Après, nous avons proposé une modélisation dynamique basée sur la présence d'une souplesse articulaire dominante, afin de fournir les équations mathématiques permettant la programmation, le contrôle et l'exécution des tâches requises, avec un contrôle utilisant le régulateur PID. Dans le troisième chapitre, nous avons présenté la théorie de base de la logique floue, en discutant plusieurs points tels que les définitions et les différentes étapes de traitement des règles pour le contrôleur flou, ainsi que les différents types de contrôle utilisant la logique floue. Finalement, nous avons introduit les concepts généraux des réseaux de neurones artificiels et la formation du système de commande ANFIS. Nous avons mis l'accent sur les différentes étapes de traitement des règles dans ANFIS et les différents types de lois des neurones artificiels. Les performances de la commande proposée ont été vérifiées à travers une série de tests de simulation, démontrant l'efficacité et la robustesse de la commande.

Les travaux décrits dans ce travail pourraient être poursuivis dans plusieurs directions de recherche, notamment l'application de ces méthodes sur des robots manipulateurs à segments et articulations flexibles, ainsi que l'introduction du contrôle de l'angle de déflexion.

Annexe

Les paramètres d'un robot Manipulateur à articulation flexible sont donnés au tableau 1 :

Définition	Symbole	La valeur
Constante d'élasticité	K_s	1.61(N/m)
Inertie de moteur	J_h	0.0021(Kg. m ²)
Masse de segment	m	0.403(Kg)
Constante de gravité	g	9.81 (m/s ²)
Hauteur de segment	h	0.06(m)
Constante de moteur	K_m	0.00767(N/(rad/s))
Inertie de segment	J_i	0.0059(Kg. m ²)
Résistance de moteur	R_m	2.6(Ω)
Position angulaire désiré	θ_d	3.14 rad

Tableau 1 : les paramètres d'un robot Manipulateur à articulation flexible.

Références bibliographiques

- [1] M. B. a. G. L. Vey, «Control of flexible manipulators: A survey,» *Robotica*, vol. 22, pp. 533-545, 2004.
- [2] S. O. a. H. Taghirad, «A survey on the control of flexible joint robots,» *Asian Journal of Control*, vol. 8, pp. 332-344, 2006.
- [3] A. F. a. J. M. Balthazar, «The rigidflexible nonlinear robotic manipulator: Modeling and control,» *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 16, pp. 2332-2341, 2011.
- [4] J. Z. S. a. I. B. S. Ulrich, «Modeling and direct adaptive control of a flexible-joint manipulator,» *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 35, pp. 25-39, 2012.
- [5] L. Zadeh, «.fuzzy sets,» *Informatiic and Control*, vol. 8, p. 338–353, 1995.
- [6] A. Garcia, «Les robot manipulateur à articulations flexibles Journal of Robotics,» *Journal of Robotics*, vol. 8, n° %13, pp. 123-135, 2020.
- [7] C. JJ, Introduction to robotics: mechanics and control, Reading: Addison Wesley Publishing Company, 1986.
- [8] R. Hakima, Commande par logique floue d'un robot manipulateur à articulation flexible, Université Mouloud Mammeri: Doctoral dissertation, 2017.
- [9] A. & S. B. LAHBIB, Application de commande de type PI pour le pilotage de bras de robot rob 3, Université Ibn Khaldoun: Doctoral dissertation, 2016.
- [10] K. M. GACEM HADJIRA, Implémentation De La Commande Intelligente Dans Un Robot à Deux Degrés De Liberté, mémoire de master, 2019/2020.
- [11] le-nouveau-robot-industriel-de-forte-charge-irb-6660-d-abb-est-optimise-pour-l-usinage-de-pieces-de-fonderie. [En ligne]. Available: <https://www.machine-outil.com>. [Accès le 2024-05-01].
- [12] Robotique_industrielle. [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org>. [Accès le 2024-05-01].
- [13] M. J. D. F. & T. S. Richard, «Commande des robots manipulateurs par la programmation dynamique.,» *Mécanisme and Machine Théorie*, vol. 28, n° %13, pp. 301-316, 1993.
- [14] H. Halalchi, Commande linéaire à paramètres variants des robots manipulateurs flexibles ., Strasbourg: Doctoral dissertation, 2012.
- [15] D. L. J. S. D. Z. Z. W. K. & S. C. Wu, Development of a novel ball-and-socket flexible manipulator for minimally invasive flexible surgery, *IEEE Transactions on Médical Robotics and Bionics*, 2023.
- [16] X. S. D. Z. Z. W. S. & S. C. Luo, «A Novel Distal Hybrid Pneumatic/Cable-Driven Continuum Joint with Variable Stiffness Capacity for Flexible Gastrointestinal Endoscopy,» *Advanced Intelligent System*, vol. 5, n° %16, 2023.
- [17] H. & H. M. Park, «Design of a Multi-bending Flexible Manipulator for Gastrointestinal Surgery,» *International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pp. 1733-1735, 2022, November.

Références bibliographiques

- [18] «Robot_médical,» [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org>. [Accès le 2024-05-01].
- [19] T. Solatges, Modélisation, conception et commande de robots manipulateurs flexibles. Application au lancement et à la récupération de drones à voilure fixe depuis un navire faisant route, UNIVERSITE DE TOULOUSE: Doctoral dissertation, 2018.
- [20] «bras-robotise-industriel,» [En ligne]. Available: <https://www.supplychaininfo.eu>.
- [21] «les-robots-dans-lespace,» [En ligne]. Available: <https://www.robobox.fr>.
- [22] T. van Anh Nguyen, Commande de robots manipulateurs basée sur le modèle de Takagi-Sugeno: nouvelle approche pour le suivi de trajectoire, Université Polytechnique Hauts-de-France: Doctoral dissertation, 2019.
- [23] M. A. A, Composite Fuzzy Logic Control Approach, Control & Instrumentation (COINS) Research Group, Faculty of Electrical Engineering, University of Malaysia Pahang, Pekan, Malaysia.
- [24] Z. C. Nassim BELBRAHEM, Etude de deux commandes robustes à modes glissants et à retard (TDC) : application à la commande d'un bras manipulateur, mémoire de master, 2014.
- [25] F. MAKHLOUFI, Modélisation et commande des robots manipulateurs par les outils de l'intelligence artificielle, UNIVERCITE BADJI-MOKHARANNABA: mémoire de doctora, 2015.
- [26] L. FATIHA, Contribution à la commande non linéaire des robots manipulateurs, Doctorat en sciences , 2021.
- [27] Faucher et J., Les plans d'expériences pour Le Réglage de Commandes à Base de Logique Floue", Institut National Polytechnique de Toulouse : Spécialité Génie Electrique et Automatique,,: Thèse de doctorat, 26 Septembre 2006.
- [28] Z. Ibrahim et E. and Levi, A Comparative Analysis of Fuzzy Logic and PI Speed Control in High Performance AC Drives Using Experimental Approach, Conf. Rec. IEEE-IAS, Annu. Meeting,Rome, Italy, october 2000.
- [29] H. Bühler, Réglage par Logique Floue, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes: Collection électricité, 1990.
- [30] A. ABDELGHANI, Stabilisation d'un pendule inversé par la logique floue, mémoire de master , 2020.
- [31] F. Lahouazi, mise en œuvre d'une stratégie de commande neuro floue, application à un Pendule inversé, Université Mouloud Mammeri,Tizi-Ouzou,,: mémoire de magister en Automatique, 2011.
- [32] L. F. S. G. A. T., Commande floue2, del'approximationà l'apprentissage, Paris: Hermès Sciences Publication, 2003.
- [33] 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, ENP Alger: Thèse de Magister , février 2007.
- [34] A. Cornuéjols, Introduction à la logique floue, janvier2008.
- [35] Gacogne. Louis, Eléments de logique floue, Paris: Hermès, 1997.
- [36] P. GABRIEL, Introduction à la Logique Floue et à la Commande Floue, exposé, 2000-2001.

Références bibliographiques

- [37] N. Y, Apprentissage des Modèles linguistiques flous, par jeu de règles pondérées, Université de Savoie, France: Thèse de Doctorat, juillet 1997.
- [38] F. Chekired, Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA, Alger, Ecole Nationale Polytechnique: Doctoral dissertation, 2008.
- [39] H. D. M. B. M.T. Hagan, Neural Network Design, PWS Publishing Compagny, 1995.
- [40] Simon Haykin, Neural Networks : A Comprehensive Foundation, IEEE Press, 1994.
- [41] D. S. J.A. Freeman, Neural Networks : Algorithms, Applications, and Programming Techniques, Addison-Wesley, 1992.
- [42] N. E. W. L. J.C. Principe, Neural and Adaptive Systems : Fundamentals through Simulations, wiley, 2000.
- [43] J. K. R. Krishnapuram, «A Possibilistic Approach to Clustering,» vol. 2, pp. 98-110,, 1993.
- [44] B. Fritzke, A Growing Neural Gas Network Learns Topologies, Cambridge MA: Advances in Neural Information Processing Systems 7,esauro, D.S. Touretzky et T.K. Leen,MIT ' Press , 1995.
- [45] R. a. D. J. Aissaoui, Biomechanical Analysis, 1999.
- [46] R.P. Lippmann, An Introduction to Computing with Neural Nets, IEEE ASSP Magazine,, AVRIL 1987, pp. 4-22.
- [47] D.Ould Abdeslam, Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques: application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension, Université de Haute-Alsace: , Thèse de doctorat,, décembre 2005.
- [48] E. Gauthier, «Gestion d'une flotte de véhicules autonomes à l'intérieur d'un parking haute densité,» DEA Informatique Option Robotique Vision Image, Institut National Polytechnique de Grenoble, , juin 1995.
- [49] E. Gauthier, Utilisation des réseaux de neurones artificiels pour la commande d'un véhicule autonome, l'Institut National Polytechnique de Grenoble.: Thèse de doctorat, janvier 1999.
- [50] I. T. J.S.R. Jang, «ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems,» vol. 33, n° 13, pp. 665-685, May/June (1993).

Résumé

Le travail réalisé dans cette thèse concerne la commande par les outils de l'intelligence artificielle d'un robot manipulateur à articulation flexible en utilisant des approches issues des théories PID, de la logique floue, commande ANFIS, ainsi que leur application dans le contrôle. Une brève présentation générale des robots a été donnée, suivie de la modélisation dynamique et des techniques de contrôle utilisant un régulateur PID, le contrôle par logique floue et la conception de systèmes de commande ANFIS. Des simulations ont été effectuées pour vérifier chaque approche de contrôle. Les résultats obtenus de cette technique de commande robuste basée sur le contrôle ANFIS pour un robot manipulateur à articulation flexible ont montré des améliorations de performance dynamiques.

Mots clés : Robot manipulateur flexible, la logique floue, neuro-flou, la commande ANFIS.

Abstract

The work carried out in this thesis concerns the control by the tools of the artificial intelligence of a manipulative robot with flexible articulation using approaches derived from PID theories, fuzzy logic, ANFIS command, as well as their application in control. A brief overview of the robots was given, followed by dynamic modeling and control techniques using a PID controller, fuzzy logic control and the design of ANFIS control systems. Simulations were performed to verify each control approach. The results obtained from this robust control technique based on the ANFIS control for a flexible articulation manipulator robot showed dynamic performance improvements.

Keywords: Flexible manipulator robot, fuzzy logic, neuro-fuzzy, ANFIS control.

المخلص:

يتعلق العمل الذي تم تنفيذه في هذه الأطروحة بالتحكم في أدوات الذكاء الاصطناعي للروبوت المتلاعب مع التعبير المرن باستخدام مناهج مشتقة من نظريات PID، والمنطق الغامض، والتحكم بطريقة ANFIS، بالإضافة إلى تطبيقها في السيطرة. تم تقديم لمحة عامة موجزة عن الروبوتات، تليها تقنيات النمذجة والتحكم الديناميكية باستخدام وحدة تحكم PID والتحكم المنطقي الغامض وتصميم أنظمة التحكم ANFIS وأجريت عمليات محاكاة للتحقق من كل نهج للتحكم. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها من تقنية التحكم القوية هذه بناءً على تحكم ANFIS لروبوت معالج مفصل مرن تحسينات ديناميكية في الأداء.

الكلمات المفتاحية: روبوت متلاعب مرن، منطق غامض، عصبي غامض، تحكم ANFIS.