

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : **Commande des systèmes**

Présenté par
Hakima RAHEM

Thème

Commande par logique floue d'un robot manipulateur à articulation flexible.

Mémoire soutenu publiquement le/ 07 / 2017 devant le jury composé de :

M Prénom NOM

Grade, Lieu d'exercice, Président

M Prénom NOM

Grade, Lieu d'exercice, Encadreur

M Prénom NOM

Grade, Lieu d'exercice, Co-Encadreur

M Prénom NOM

Grade, Lieu d'exercice, Examineur

M Prénom NOM

Grade, Lieu d'exercice, Examineur

Dédicaces

Je dédie ce travail

À mon mari sans qui rien ne serait possible, par sa présence à mes côtés, son soutien, son encouragement, tout est devenu possible.

À la lumière de mes yeux et le bonheur de ma vie, mes enfants MASSILIA et ELYAS MASSYL, je vous aime mes enfants que le bon dieu vous garde vous protège et vous bénit.

HAKIMA

Remerciement

- *Tout d'abord je tiens à remercier le Bon Dieu de m'avoir donné le courage et la volonté de faire ce travail.*
- *Je souhaite exprimer mes sincères remerciements à M^r Touat Chef de département automatique, pour m'avoir encouragé et soutenu tout au long de ce travail.*
- *Je tiens à adresser mes vifs remerciements à Mme Kherraz .K maitre de conférences à FGEI (Faculté de Génie Electrique et d'Informatique) de l'UMMTO(Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou), tout d'abord pour m'avoir donné l'opportunité d'effectuer ce travail en lien avec les domaines qui m'ont toujours intéressés, pour le temps qu'il a bien voulu consacré à m'aider et à m'orienter tout au long de ce projet.Sa gentillesse et son aide précieuse ont contribué de manière essentielle au bon déroulement de ce travail. Je lui adresse mes sincères remerciements.*
- *Mes remerciements vont également à tous mes collègues de FGEI de l'UMMTO, en particulier toutes mes copines de laboratoire électronique de puissance et commande des machines, je vous remercie énormément pour votre soutien au cours de ce travail.*
- *J'adresse également mes vifs remerciements et ma profonde gratitude à tous les enseignants de département automatique et tous les ATS de la faculté génie électrique et informatique.*
- *Je tiens à remercier sincèrement et profondément mon mari, pour m'avoir toujours encouragée à poursuivre mes études, pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée à tout moment dans l'élaboration de ce travail. Qu'il trouve ici ma profonde gratitude et reconnaissance.*
- *Un profond merci, une immense reconnaissance et un énorme pardon pour mes enfants MASSILIA et ELYAS MASSYL, avec beaucoup d'amour et gratitude. Je vous aime mes anges.*
- *mes sincères remerciements vont également aux membres de jury qui me feront l'honneur de juger mon travail.*

Résumé

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire porte sur l'élaboration d'une stratégie de commande robuste capable de résoudre le problème de poursuite de trajectoire des robots manipulateurs flexibles, tout en réduisant les vibrations. La complexité de ces systèmes réside dans la présence de la flexibilité dans les articulations.

La stratégie de commande que nous proposons a pour objet l'élaboration de la loi de commande en se basant sur la logique floue qui est fiable surtout là où les systèmes sont complexes et avoir un modèle dynamique précis est une tâche très difficile.

Afin de valider et de quantifier les performances de l'approche proposée, nous traitons cinq exemples d'application.

Les résultats de simulations obtenus sur les cinq exemples ont permis de valider l'approche proposée.

Mots-clés : Commande par logique-floue, robot manipulateur flexible, suivi de trajectoire, suppression de vibrations.

SOMMAIRE

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

CHAPITRE I : Robots manipulateurs à articulations flexibles -modélisation

I.1 Introduction	6
I.1.1 Terminologie générale	6
I.1.2 Historique.....	7
I.2 Classification des robots	9
I. 3 Choix des articulations élastiques	11
I.4 Robots manipulateurs flexibles-motivation et application.....	12
I.4.1 Utilisation des robots manipulateurs flexibles dans le domaine médical.....	13
I.4.2 Utilisation des robots manipulateurs flexibles dans le domaine spatial.....	13
I.5 Modélisation des robots à articulations flexibles.....	14
I.5.1 Modélisation dynamique d'une articulation flexible.....	15
I.5.2 Modèle dynamique.....	15
I.5.2.1 Calcul d'énergie cinétique	17
I.5.2.2 Calcul d'énergie potentielle	18
Conclusion.....	22

CHAPITRE II : Théorie de la logique floue

II.1 Introduction.....	27
II.2 Définition.....	28
II.3 Historique	28
II.4 Ensembles flous.....	29
II. 4.1 Caractéristiques d'un sous-ensemble flou.....	30
II.4.2 Opérations sur les sous-ensembles flous.....	31
II.5 Variables linguistiques.....	33
II.6 Fonction d'appartenance.....	34
II.7 Règles d'inférences.....	36
II.8 Commande Floue.....	36
II.8.1 Fuzzification.....	37
II.8.2 Base de connaissance.....	38

II.8.3 Moteur d'inférence floue (Mécanisme d'inférence).....	38
II.8.4 Défuzzification.....	40
II.9 Types de systèmes d'inférence floue.....	42
II.9.1 Système d'inférence floue de type Mamdani.....	42
II.9.2 Système d'inférence flou de type Takagi-Sugeno.....	43
II.10 Caractéristiques des systèmes d'inférence floue.....	43
II.10.1 Les caractéristiques structurelles.....	43
II.10.2 Les caractéristiques paramétriques.....	43
Conclusion	45

CHAPITRE III : Application

III.1 Introduction.....	47
III.2 Mise en œuvre de la loi de commande par logique floue.....	47
III.3 Simulations et interprétations.....	49
Conclusion.....	62

Conclusion générale	64
----------------------------------	----

Références Bibliographiques	65
--	----

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I. 1 : Evolution de la robotique.....	9
Figure I. 2 : Robot manipulateur rigide	10
Figure I. 3 : Schéma d'une articulation rigide.....	10
Figure I. 4 : Robot manipulateur flexible	11
Figure I.5 : Schéma d'une articulation flexible.....	11
Figure I.6: Robot MIRO du DLR effectuant une tache de chirurgie cardiaque.....	13
Figure I.7 : Robot manipulateur spatiale canadarm conçu par la CSA.....	14
Figure I.8 : Schéma simplifié d'une articulation flexible.....	15
Figure I.9 : Coordonnées généralisées de segment.....	17
Figure I.10 : Schéma équivalent d'un moteur.....	19

CHAPITRE II

Figure II.1 : Représentation de la température d'un corps par les ensembles classiques et Flous.....	29
Figure II.2 : Représentation d'un sous- ensemble flou et ses principales caractéristiques.....	31
FigureII. 3 : Fonctions d'appartenance triangulaire (A) et trapézoïdale (B).....	31
Figure II.4 : Fonction d'appartenance $A \cup B$	32
Figure II.5 : Fonction d'appartenance $A \cap B$	32
FigureII.6 : Opérateur de complémentation de la fonction d'appartenance A.....	33
Figure II.7 : Variables linguistiques.....	34
Figure II.8 : Formes usuelles de fonctions d'appartenance.....	35
Figure II.9 : Structure de base d'un régulateur flou.....	37
Figure II.10 : Agrégation des règles.....	39
Figure II.11 : Défuzzification par la méthode de centre de gravité.....	41

CHAPITRE III

Figure III.1 : Schéma fonctionnel du système et la structure du régulateur flou.....	48
Figure III. 2 : Bloc de simulation.....	50

Figure III.3 : Modèle d'un bras à articulation flexible.....	51
Figure III.4 : Schéma bloc du contrôleur flou.....	51
Figure III.5 : Angle θ désiré	52
Figure III.6 :Angle θ mesuré	52
Figure III.7 :Erreur de poursuite	53
Figure III.8 :Angle de déflexion α	53
Figure III.9 : Signal de commande	53
Figure III.10 :Angle θ désiré	54
Figure III.11 :Angle θ mesuré.....	54
Figure III.12 : Erreur de poursuite.....	55
Figure III.13 :Angle de déflexion α	55
Figure III.14 :Signal de commande.....	55
Figure III.15 :Angle θ désiré	56
Figure III.16 : Angle θ mesuré.....	56
Figure III.17 : Erreur de poursuite.....	57
Figure III.18 :Angle de déflexion α	57
Figure III.19 : Angle θ désiré	58
Figure III.20 : Angle θ mesuré.....	58
Figure III.21 : Erreur de poursuite.....	59
Figure III.22 : Angle de déflexion α	59
Figure III.23 : Angle θ désiré	60
Figure III.24 : Angle θ mesuré.....	60
Figure III.25 : Erreur de poursuite.....	61
Figure III.26 : Angle de déflexion α	61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 Valeurs numériques du système.....	21
Table III.1 Règles d'inférence du régulateur flou.....	49

Introduction générale

Introduction générale

La complexité sans cesse croissante des systèmes industriels modernes, tels que les systèmes de production et la compétition industrielle ont engendré un besoin grandissant des robots manipulateurs hautement efficaces. Alors, le robot doit manipuler avec des vitesses importantes et des précisions de plus en plus accrues. Cela exige des structures mécaniques plus adaptées, mais aussi de nouvelles techniques de commande. Pour cela, ces deux dernières décennies, les chercheurs n'ont pas cessé d'investiguer les différents axes qui traitent la robotique.

La tendance actuelle en robotique est la réduction du poids et de l'encombrement des robots manipulateurs. Cette réduction est motivée par la volonté de satisfaire plusieurs objectifs, susceptibles d'améliorer les performances de l'accomplissement des tâches assignées pour le robot ainsi que la qualité de l'interface avec l'environnement matériel et humain, en particulier, une conception et une fabrication de la structure à base de matériaux légers et flexibles, ainsi qu'une utilisation d'éléments de transmission déformables.

L'intégration des élasticités (flexibilités) dans la chaîne de transmission aboutit à des robots hautement efficaces, cependant le principal inconvénient des robots flexibles résulte précisément de leur flexibilité. Des oscillations durables peuvent résulter de leurs propres manœuvres ou de perturbations externes, ainsi que ses élasticités doublent le nombre de degrés de liberté par rapport au cas rigide, car la position angulaire de l'axe de l'actionneur est différente de celle du bras. Cette différence peut être prise en compte en considérant une raideur de torsion au niveau de chaque articulation.

La présence d'élasticité dans les transmissions entre les actionneurs et les bras peut avoir une grande influence sur la dynamique du robot. Les lois de commandes ignorant ces flexibilités peuvent présenter des oscillations voire l'instabilité.

Le niveau de précision souhaité dans les structures flexibles ne peut pas être obtenu avec des méthodes de contrôle basées sur le modèle qui est souvent difficile, voire impossible d'en avoir, en raison de la dynamique non linéaire, complexe et des perturbations externes inattendues. Par conséquent, les méthodes non linéaires qui ne sont pas basées sur un modèle mathématique du système devraient être préférées dans les mécanismes flexibles.

Introduction générale

Une solution optée dans ce travail est d'utiliser l'approche floue, qui a la particularité d'approximation des non linéarités et comme un élément de l'intelligence artificielle. En effet, la commande est générée par l'exploitation du modèle du système s'il existe (même avec de grandes incertitudes) et des descriptions linguistiques, fournies par des experts.

La théorie de la logique floue développée par Lotfi Zadeh en 1965 [1] a permis de traiter les imprécisions et les incertitudes. De nombreuses applications sont alors développées dans divers domaines, là où aucun modèle déterministe n'existe ou est difficile à obtenir.

L'avantage d'un système flou est que seules les connaissances du comportement du procédé à commander sont suffisantes pour la synthèse de la loi de commande. Il soulève un large intérêt dans l'identification et la commande des processus complexes et non linéaires. Cela est dû au fait que d'une part les systèmes flous n'exigent pas l'existence d'un modèle analytique du processus à contrôler et peu d'informations sont suffisantes pour mettre en œuvre la boucle de commande, et d'autre part, les systèmes flous sont des systèmes non linéaires et sont ainsi plus adaptés à la commande des processus non linéaires.

Par ailleurs, les concepts de la logique floue sont des outils efficaces pour approximer les systèmes non linéaires grâce à leur capacité d'approximation universelle. La modélisation floue est donc la représentation du comportement du système en utilisant les principes de la logique floue.

Notre travail consiste à développer une stratégie de commande capable de contrôler un système complexe non linéaire qui est un robot manipulateur à articulation flexible, cette commande est basée sur les outils de la logique floue. 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 qui se situe à l'intersection des domaines de la robotique et de la commande nous incite à organiser ce travail comme ci-dessous.

Contenu de la thèse

Ce mémoire est structuré de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, nous nous intéressons plus particulièrement aux robots manipulateurs à articulations flexibles. Tout d'abord, un accent y met sur la particularité de la

Introduction générale

flexibilité dans un système. Ensuite, nous présentons la modélisation dynamique basée sur la présence d'une souplesse articulaire dominante.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons une synthèse sur les systèmes flous. Pour ce faire, nous exposons les notions de base de la théorie des ensembles flous ainsi que les outils mathématiques nécessaires à leur manipulation. Ensuite, nous présentons la structure interne d'un système d'inférence flou, ainsi que les différents types de contrôleurs utilisés.

Le troisième chapitre porte sur l'élaboration d'une stratégie de commande, en exploitant la théorie de la logique floue.

Pour illustrer les performances de la commande proposée, une série de tests par simulation en termes de poursuite et de robustesse est effectuée pour mettre en évidence son efficacité.

Finalement, nous terminons par une conclusion générale sur l'ensemble de ce travail ainsi que les perspectives susceptibles d'être envisagées.

CHAPITRE I

Robots manipulateurs à articulations

Flexibles - modélisation

I. 1introduction

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".

L'ATILF unité mixte de la recherche (Analyse et traitement informatique de la langue française) [2] définit le robot de la manière suivante : « Appareil effectuant, grâce à un système de commande automatique à base de micro-processeur, une tâche précise pour laquelle il a été conçu dans le domaine industriel, scientifique, militaire ou domestique ».

L'Association Française de Normalisation (A.F.N.O.R.) définit un robot comme étant un système mécanique de type manipulateur commandé en position, reprogrammable, polyvalent (i.e., à usages multiples), à plusieurs degrés de liberté, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés, au cours de mouvements variables et programmés pour l'exécution d'une variété de tâches. Il a souvent l'apparence d'un, ou plusieurs bras se terminant par un poignet. Ces machines polyvalentes sont généralement étudiées pour effectuer la même fonction de façon cyclique et peuvent être adaptées à d'autres fonctions sans modification permanente du matériel.

L'objectif principal de ce chapitre est la description et la modélisation d'un type de robot utilisé dans tous les domaines cités précédemment et qui présente une particularité articulaire qui est la flexibilité.

I.1.1 Terminologie générale

Le mot robot vient du tchèque "robota" qui signifie travail et service.

Le mot *robotique* est dérivé de robot. Selon le dictionnaire anglais Oxford, le mot *robotique* a été utilisé en version imprimée pour la première fois par Isaac Asimov, écrivain américain né en Russie, dans son récit de science-fiction "*Menteur!*". Asimov n'était initialement pas conscient d'avoir popularisé le mot. Il a supposé que le terme existait déjà, par analogie avec « mécanique », « électronique », et d'autres termes similaires dénotant des branches de science appliquée [3].

I.1.2 Historique

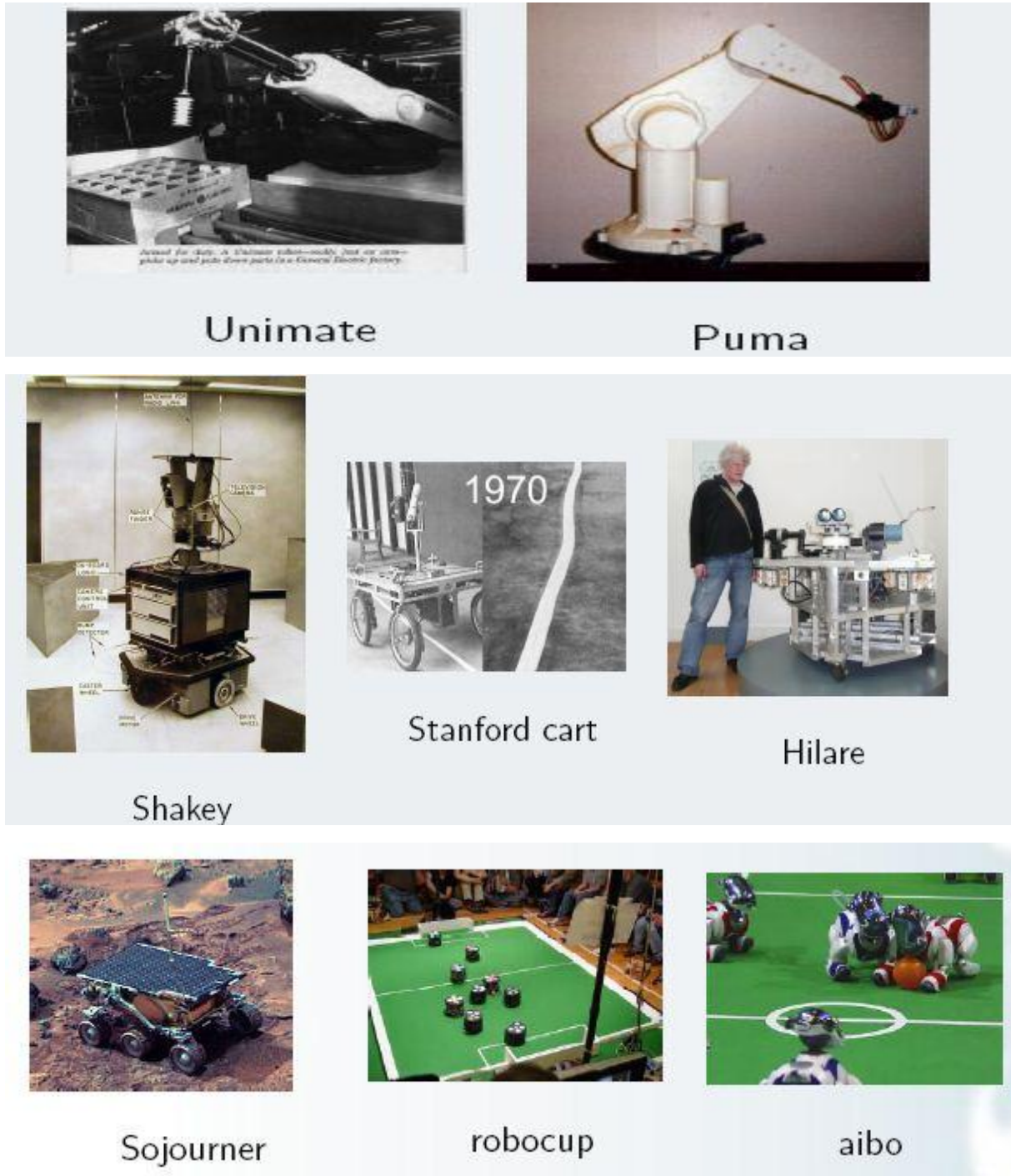
- "Robot" a été utilisé pour la première fois en 1921 par Karel Capek dans sa pièce théâtrale R.U.R. : Rossums Universal Robots.
- La mise en place de robots n'a été possible que dans les années 50 avec la création des transistors et des circuits intégrés.
- En 1954, George Devol a déposé un brevet pour le premier robot.
- La première entreprise qui a produit un robot était Unimation, fondée en 1956 par George Devol et Joseph Engelberger.
- Le premier robot a été mis en service dans une usine de General Motors en 1961 pour extraire des pièces d'une machine de moulage sous pression [4].
- 1960-1964 : Ouverture des laboratoires d'Intelligence Artificielle, Stanford Research Institute (SRI), University of Edinburgh.
- Fin des années 60 : Mise en place de "Shakey" premier robot mobile intégrant perception, planification et exécution.
- Le "Stanford" Arm a été conçu en 1969 par Victor Scheinman comme un prototype pour la recherche.
- En 1973, la société ASEA (ABB aujourd'hui), (Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget (Suède) qui était le nom de l'entreprise jusqu'en 1977, était une entreprise d'ingénierie électrique suédoise. Elle fut fondée en 1883 et fusionna en 1988 avec l'entreprise suisse (Brown, Boveri & Cie) pour fonder le groupe ABB. Entreprise helvético-suédoise des technologies de l'énergie et de l'automation) a présenté le premier robot commandé par un microprocesseur.
- 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 extraplanétaire 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".

Chapitre I. Robots manipulateurs à articulations flexibles - modélisation

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.

Grace 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.

La figure suivante, nous présente l'évolution des robots dans le temps [5].



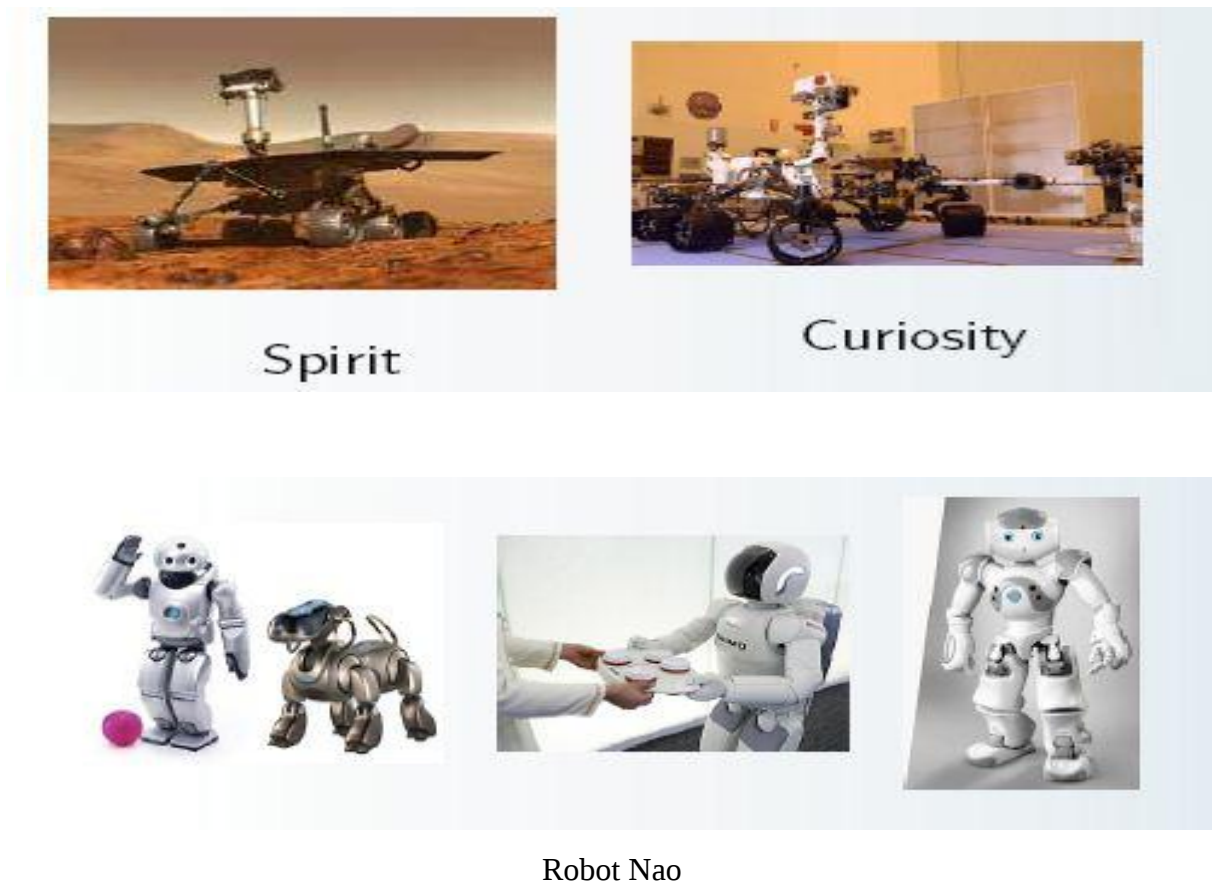


Figure I.1 : Evolution de la robotique

I.2 Classification des robots :

Les robots manipulateurs selon leurs configurations, peuvent être classés en deux types:

- Le robot manipulateur rigide, comme le montre la figure (I.2). Il se déplace à des vitesses beaucoup plus faibles que la fréquence fondamentale du système à cause de leurs poids et leurs structures. Ce type de robot est muni des articulations rigides (figure II.3).
- Le robot manipulateur flexible, comme le montre la figure (I.4). Il est capable de se déplacer plus rapidement par rapport au premier type. Il est muni des articulations et /ou segments flexibles (figure I.5).

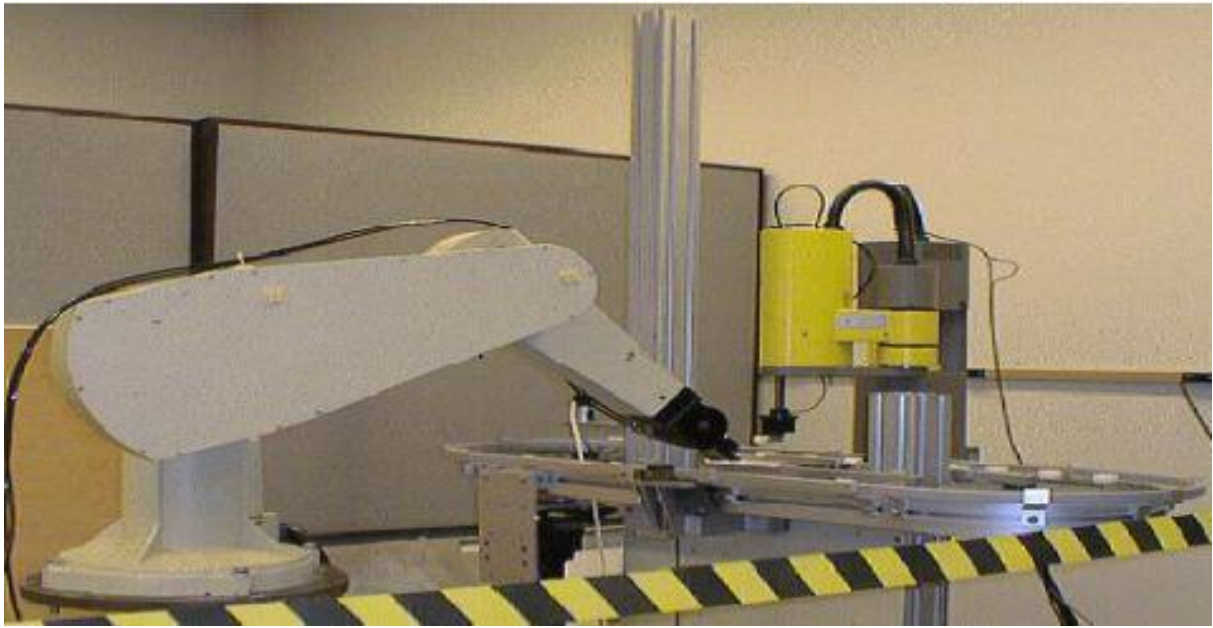


Figure I.2: Robot manipulateur rigide

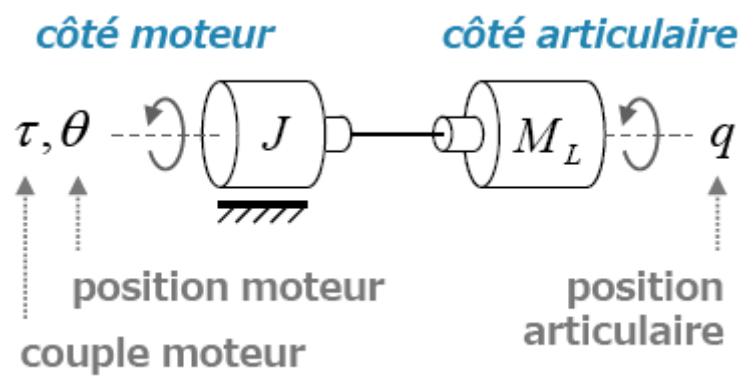


Figure I.3 : Schéma d'une articulation rigide



Figure I.4: Robot manipulateur flexible

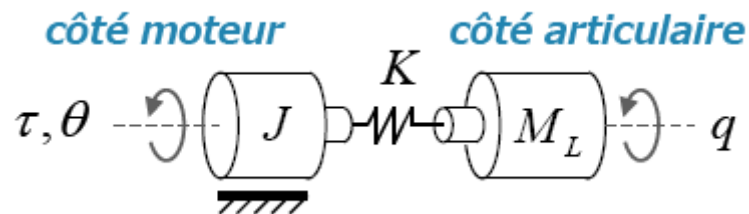


Figure I.5 : Schéma d'une articulation flexible

I. 3. Choix des articulations flexibles (élastiques)

Les articulations élastiques sont souvent employées lorsque la précision des éléments de construction traditionnels est dépassée et aussi lorsque le domaine d'application exige des mouvements rapides et précis tel que (la chirurgie médicale), voir encore lorsque le domaine d'application nécessite un faible poids tel que (la maintenance spatiale).

Le but lors de la conception d'une articulation élastique est de relier deux solides en autorisant certains mouvements.

L'utilisation d'articulations élastiques présente plusieurs avantages et inconvénients.

Les principaux avantages sont les suivants :

- Ces articulations sont faciles à assembler.
- Elles ne présentent ni *usure* ni *émission* de particules, du fait de l'absence de frottement sec.
- Les mécanismes à articulations élastiques sont des mécanismes sans jeu et la durée de vie est liée au phénomène de fatigue qui est prédictible.
- Les déplacements sont doux et continus, et ce, jusqu'à des déplacements d'ordre nanométrique.

Du point de vue des limites ou des inconvénients :

- L'utilisation des éléments de transmission déformables engendre des phénomènes vibratoires.

Pour remédier à ce problème, des techniques de contrôle ont été proposées dans les années 1990, afin de pouvoir commander des structures du type «élastiques». L'objectif était alors d'atténuer les vibrations provoquées par les mouvements de ces élasticités [6]. Une étude approfondie de la dynamique des robots à articulations élastiques était donc nécessaire pour concevoir des couples structure-commande qui soient accordés aux performances désirées.

I.4 Robots manipulateurs flexibles-motivation et application

Actuellement les robots manipulateurs à articulations flexibles sont très demandés pour satisfaire les besoins particuliers de l'industrie, en raison de leurs haute efficacité, flexibilité, puissance, structure légère, et grand nombre des applications particulières tel que : effectuer des tâches de décontamination dans l'entretien nucléaire et positionner le barrage dans la maintenance du générateur de vapeur d'une centrale nucléaire [7], assainissement d'un réservoir de stockage de déchets [8], nettoyage d'un réservoir de déchets [9], opérant dans des applications microchirurgicales [10]... . Ils sont principalement utilisés dans les secteurs du service, de l'espace, de la médecine et de la défense. Cependant, commandant un tel système relève toujours les nombreux défis [11].

I.4.1 Utilisation des robots manipulateurs flexibles dans le domaine médical :

L'orientation actuelle des recherches dans le domaine médical implique l'utilisation d'outils de plus en plus sophistiqués. Pour cela, les robots légers à articulations flexibles sont fortement demandés dans les tâches qui nécessitent d'effectuer des manipulations avec une précision d'ordre micrométrique et dans un temps relativement court, car sa structure légère permet un moindre encombrement de l'environnement et une sécurité de praticien et de patient. Elle permet également une manipulation directe du robot sans avoir recours à une interface de manipulation entre le chirurgien et le patient (schéma de télé opération maître-esclave) (Figure I.6).

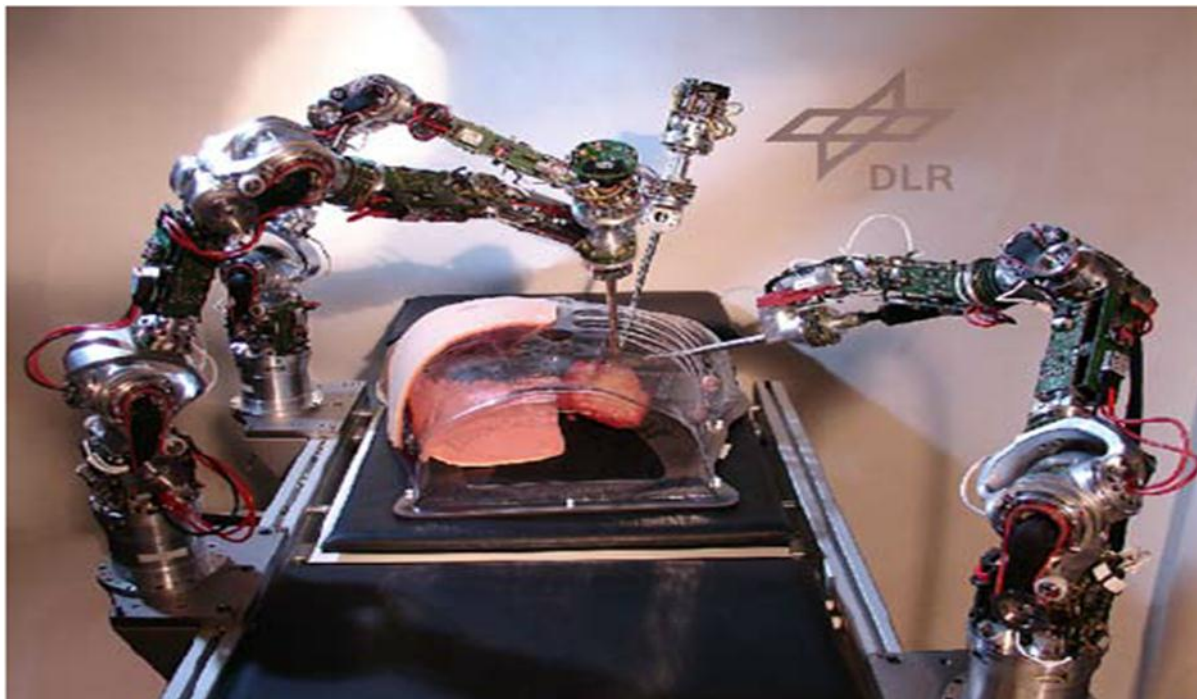


Figure 1.6: Robot MIRO du DLR effectuant une tâche de chirurgie cardiaque

I.4.2 Utilisation des robots manipulateurs flexibles dans le domaine spatial

Les tâches de manipulations dans l'espace nécessitent toujours l'utilisation des robots flexibles tel que le robot **canadarm** conçu par l'agence spatiale canadienne (CSA), afin d'assurer la maintenance de la station spatiale internationale (figure I.7).



Figure 1.7 : Robot manipulateur spatiale canadarm conçu par la CSA

I.5 Modélisation des robots à articulations flexibles

La modélisation des robots flexibles a été proposée comme une extension de la modélisation des robots rigides [12].

Pour les robots industriels dont les corps sont rigides et les articulations sont flexibles, les déformations élastiques sont localisées dans les chaînes de transmission articulaires. Elles sont soit rotoïdes ou prismatiques, elles ajoutent des degrés de liberté flexibles aux degrés de liberté du robot rigide.

-Une raideur de traction-compression introduit une liaison prismatique.

-Une raideur de torsion introduit une liaison rotoïde.

Un robot à flexibilités articulaires avec « n » articulations possède « $2n$ » degrés de liberté. Cette modélisation peut être utilisée pour tous les robots où chaque articulation possède une flexibilité.

I.5.1 Modélisation dynamique d'une articulation flexible

C'est d'établir les relations entre les efforts (couple et /ou forces) développés par les actionneurs et les positions, vitesses et accélérations des articulations, afin d'avoir l'équation de mouvement du robot.

La flexibilité dans une articulation peut être modélisée par une raideur qui représente une déformation élastique, affectant l'axe du moteur qui actionne l'articulation. Une vue schématique d'une articulation élastique (flexible) est donnée dans la figure (I.8)

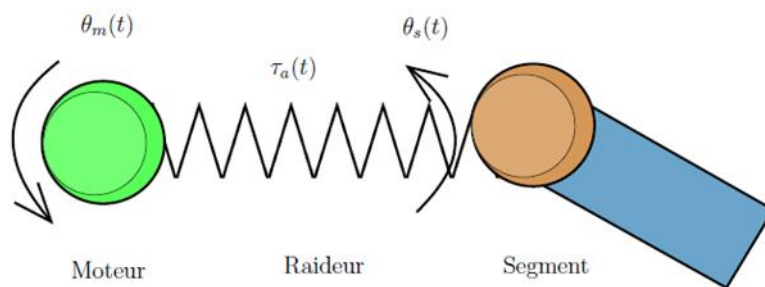


Figure 1.8 : Schéma simplifié d'une articulation flexible

I.5.2 Modèle 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 parcouru 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

$$\dot{x} = f(x) + g(x) \cdot u \quad (I.1)$$

$$y(x) = h(x)$$

Avec :

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix}, g(x) = \begin{bmatrix} g_1(x) \\ \vdots \\ g_n(x) \end{bmatrix} \quad (I.2)$$

$f(x), g(x)$: Champs de vecteurs, $h(x)$: Fonction scalaire non linéaire.

$x \in \mathbb{R}, u \in \mathbb{R}, y \in \mathbb{R}$

Pour l'obtention d'un modèle dynamique, différentes approches sont possibles, parmi les plus utilisées nous pouvons mentionner la méthode des équations d'Euler Lagrange, Newton-Euler et la méthode du principe de moindre action de Hamilton. Une autre méthode qui a été développée récemment, utilisant des éléments de la théorie des graphes linéaires, permet un calcul systématique de modèle dynamique multi corps flexibles. Cette méthode est implémentée sous forme numérique dans le logiciel de calcul symbolique MAPLE.

Dans la suite de ce chapitre, nous utiliserons le formalisme de modélisation par les équations d'Euler Lagrange :

Le lagrangien est défini par :

$$L = T - V \quad (I.3)$$

T : Energie cinétique.

V : Energie potentielle.

Les équations d'Euler Lagrange du système sont données comme suit :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau \quad (I.4)$$

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 I.9).

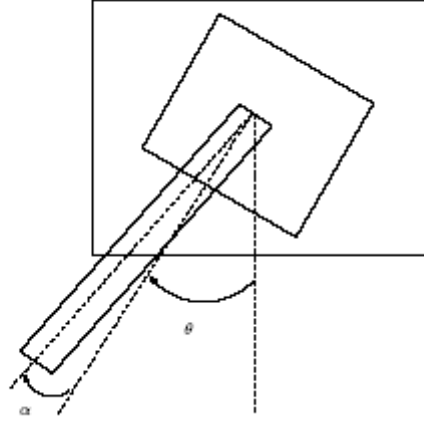


Figure 1.9 : Coordonnées généralisées

I.5.2.1 Calcul d'énergie cinétique

$$T = T_h + T_i \quad (\text{I.5})$$

$$T_h = \frac{1}{2} J_h \dot{\Theta}^2 \quad (\text{I.6})$$

$$T_i = \frac{1}{2} J_i (\dot{\Theta} + \dot{\alpha})^2 \quad (\text{I.7})$$

D'où :

$$T = \frac{1}{2} J_h \dot{\Theta}^2 + \frac{1}{2} J_i (\dot{\Theta} + \dot{\alpha})^2 \quad (\text{I.8})$$

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.

I.5.2.2 Calcul d'énergie potentielle

$$V = V_g + V_s \quad (I.9)$$

$$V_g = mgh \cos(\Theta + \alpha) \quad (I.10)$$

$$V_s = \frac{1}{2} K_s \alpha^2 \quad (I.11)$$

D'où :

$$V = mgh \cos(\Theta + \alpha) + \frac{1}{2} K_s \alpha^2 \quad (I.12)$$

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 (I.3)

Alors

$$L = \frac{1}{2} J_h \dot{\Theta}^2 + \frac{1}{2} J_i (\dot{\Theta} + \dot{\alpha})^2 - mgh \cos(\Theta + \alpha) - \frac{1}{2} K_s \alpha^2 \quad (I.13)$$

On applique le formalisme de Lagrange :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau \end{cases} \quad (I.14)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = J_i (\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) + K_s - mgh \sin(\theta + \alpha) = 0 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = (J_i + J_h) \ddot{\theta} + J_i \ddot{\alpha} - mgh \sin(\theta + \alpha) = \tau \end{cases} \quad (I.15)$$

Le couple moteur τ est en fonction de la tension U appliquée à l'induit qui constitue l'entrée de commande du système (figure I.10).

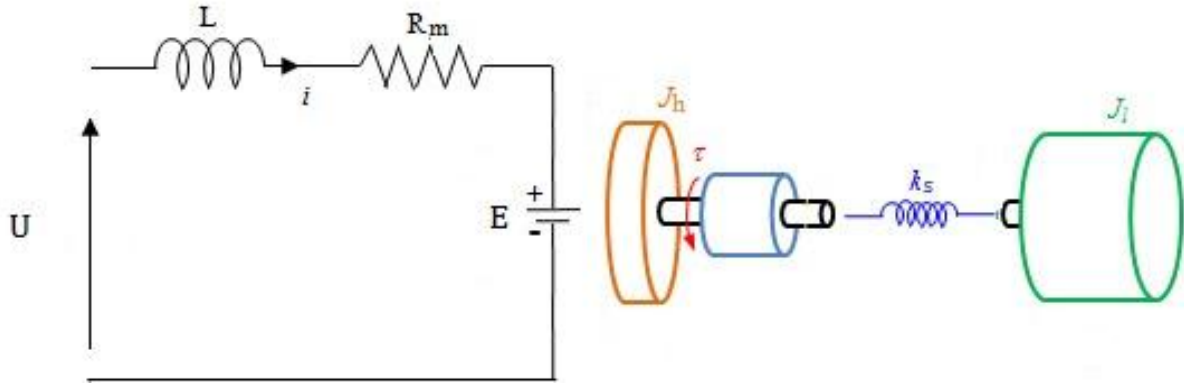


Figure 1.10 : Schéma équivalent d'un moteur

$$U = i R_m + E \quad (I.16)$$

$$E = k_m k_g \Omega \quad (I.17)$$

De l'équation (I.16) et (I.17)

$$i = \frac{U}{R_m} - \left(\frac{K_m K_g}{R_m} \right) \Omega \quad (I.18)$$

On a: $\tau = k_m k_g i \quad (I.19)$

Étant Ω est la vitesse angulaire du moteur.

$$\dot{\Theta} = \Omega$$

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

$$\tau = \left(\frac{K_m K_g}{R_m} \right) U - \left(\frac{k_m^2 k_g^2}{R_m} \right) \dot{\Theta} \quad (I.20)$$

On choisit

$$\Theta = x_1$$

$$\alpha = x_2$$

$$\dot{\Theta} = x_3$$

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

Le système sera écrit de la manière suivante :

$$\dot{x}_1 = x_3$$

$$\dot{x}_2 = x_4$$

$$\dot{x}_3 = \frac{K_s}{J_h} x_2 - \frac{k m^2 k g^2}{R_m J_h} x_3 + \frac{K_m K_g}{R_m J_h} U$$

$$\dot{x}_4 = - \left(\frac{K_s}{J_h} + \frac{K_s}{J_i} \right) x_2 + \frac{k m^2 k g^2}{R_m J_h} x_3 + \frac{m g h}{J_i} \sin(x_1 + x_2) - \frac{K_m K_g}{R_m J_h} U \quad (I.21)$$

La sortie de ce système est la position de segment.

$$y = x_1 + x_2 \quad (I.22)$$

Le système maintenant peut s'écrire sous la forme d'état (équation I.1) :

Avec :

$$f(x) = \begin{pmatrix} x_3 \\ x_4 \\ \frac{Ks}{Jh} x_2 - \frac{km^2 kg^2}{Rm Jh} x_3 \\ - \left(\frac{Ks}{Jh} + \frac{Ks}{Ji} \right) x_2 + \frac{km^2 kg^2}{Rm Jh} x_3 + \frac{mgh}{Ji} \sin(x_1 + x_2) \end{pmatrix}$$

$$g(x) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{KmKg}{RmJh} \\ - \frac{KmKg}{RmJh} \end{pmatrix}$$

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

Les valeurs numériques de notre système sont données par le tableau (I.1)

paramètre	symbole	valeur
Constante d'élasticité	ks	1.61(N/m)
Inertie de moteur	jh	0.0021(Kgm ²)
Masse de segment	m	0.403(Kg)
Constante de gravité	g	-9.81 (N/m)
Hauteur de segment	h	0.06(m)
Constante de moteur	Km	0.00767(N/rad/s)

Inertie de segment	J_i	0.0059(Kgm ²)
Resistance de moteur	R_m	2.6(Ω)

Tableau I.1 : Valeurs numériques du système

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les robots manipulateurs à articulations flexibles et quelques exemples sur les domaines de leurs utilisations, ainsi la particularité de l'articulation flexible qui double le nombre de degré de liberté par rapport au cas rigide. Par la suite, nous avons présenté une modélisation dynamique basée sur la présence d'une souplesse articulaire dominante, ce qui nous permettra de développer un modèle comportemental pour une simulation que nous allons utiliser dans le chapitre 3.

CHAPITRE II

Théorie de la logique floue

II.1 Introduction

Les outils intelligents sont de plus en plus utilisés dans la conception, la modélisation et la commande des systèmes complexes tels que les robots, les procédés biologiques, les véhicules routiers,...etc. On entend par outils intelligents les techniques du *soft computing* tels que la logique floue, les réseaux de neurones artificiels et les algorithmes génétiques [13].

La complexité d'un système peut être caractérisée par plusieurs facteurs : le nombre d'éléments qui les composent, les relations entre ces éléments, leurs caractéristiques, la dynamique de système,...etc. Lorsque la complexité de modéliser un système augmente, Zadeh l'a exprimée sous forme du principe d'incompatibilité [14] : *«lorsque la complexité d'un système augmente, notre capacité à faire une description précise et significative de son comportement diminue jusqu'à un seuil au delà duquel précision et signification (pertinence) deviennent des caractéristiques mutuellement exclusives»*.

La logique floue introduite par Zadeh dans les années soixante constitue un outil très puissant pour la représentation des termes et des connaissances vagues. Elle est issue de la capacité de l'homme à décider et à agir d'une manière intelligente malgré l'imprécision et l'incertitude des données disponibles.

L'utilisation de la commande floue est particulièrement intéressante lorsqu'on ne dispose pas de modèle mathématique précis, voire inexistant, du système à commander, ou lorsque ce dernier présente de fortes non linéarités. Contrairement aux approches classiques de l'automatique, qui se basent en grande partie sur un modèle mathématique, la commande par logique floue, repose sur une collection de règles linguistiques de la forme "Si ...Alors" qui traduisent la stratégie de raisonnement d'un opérateur humain.

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse sur les systèmes flous. Pour ce faire, nous exposons les notions de base de la théorie des ensembles flous ainsi que les outils mathématiques nécessaires à leur manipulation. Ensuite, nous présentons la structure interne d'un système d'inférence floue, ainsi que les différents types de contrôleurs utilisés.

II .2 Définition

La logique floue est une branche des mathématiques qui permet de modéliser le monde réel de la même façon que la pensée humaine ,en utilisant un langage qui permet des définitions ambigües, comme beaucoup, peu, petit, haut, très haut....etc.

La définition de L. Zadeh :

“Fuzzy Logic is determined as a set of mathematical principles for knowledge representation based on degrees of membership rather than on crisp membership of classical binary logic.”

« La logique floue est déterminée comme un ensemble de principes mathématiques pour la représentation des connaissances fondées sur des degrés d'appartenances plutôt que sur l'adhésion croquante de logique binaire classique».

II .3 Historique

La théorie de la logique floue remonte aux années 1920 et 1930, elle démarre par le principe d'incertitude d'Heisenberg qui a conduit au développement de la logique à valeurs multiples. En 1965, Le Professeur L.Zadeh de l'université de Berkeley (Californie) pose les bases théoriques de la logique floue, et il a proposé de modéliser le mécanisme de la pensée humaine par un raisonnement approximatif en utilisant des variables linguistiques. En 1973, L.Zadeh propose d'appliquer la logique floue aux problèmes de réglage. En 1974, la Première application du réglage par la logique floue appliquée à une turbine à vapeur par Mamdani, suivie en 1980 par une application sur un four à ciment, et en 1983 sur un épurateur d'eau. En 1985, les Premiers produits industriels (Japon) utilisant le principe de la logique floue appliqué à des problèmes de réglage et de commande. Plusieurs applications commencent à immerger, notamment au japon. En 1990, il y avait une généralisation de l'utilisation de cette technique.

II.4 Ensembles flous

La notion d'ensemble flou introduit un caractère graduel de l'appartenance d'un élément à un ensemble donné, c'est-à-dire elle autorise à un élément d'appartenir plus ou moins à une classe prédéfinie. Cela permet une meilleure représentation des termes et des connaissances vagues que nous, les humains, manipulons au quotidien.

Mathématiquement, un ensemble flou A d'un univers de discours U , est caractérisé par une fonction d'appartenance, notée μ_A , à valeur dans l'intervalle $[0,1]$ et qui associe à chaque élément x de U un degré d'appartenance $\mu_A(x)$ indiquant le niveau d'appartenance de x à A .

$\mu_A(x) = 1$ et $\mu_A(x) = 0$ correspondent respectivement à l'appartenance et la non-appartenance.

Exemple: Evaluation de la température d'un corps (figure II.1):

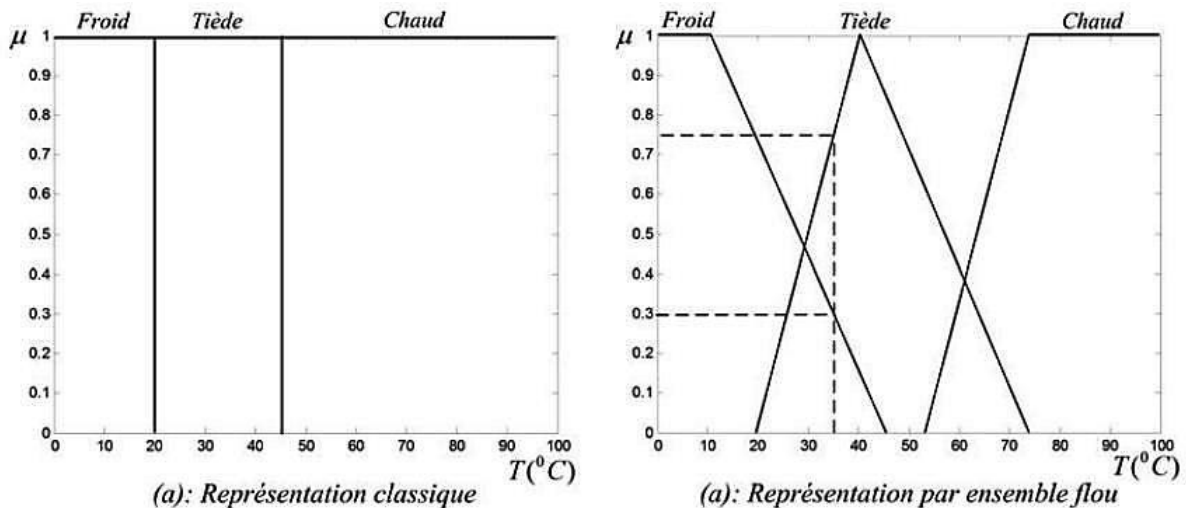


Figure II.1 : Représentation de la température d'un corps par les ensembles classiques et Flous

Comparaison entre la logique floue et la logique classique :

a) En logique booléenne (Figure II.1.a), le degré d'appartenance μ ne peut prendre que deux valeurs (0 ou 1). Dans ce cas, le corps peut être :

- Froid : $\mu_{\text{Froid}} = 1, \mu_{\text{Tiède}} = 0, \mu_{\text{Chaud}} = 0$
- Tiède : $\mu_{\text{Froid}} = 0, \mu_{\text{Tiède}} = 1, \mu_{\text{Chaud}} = 0$
- Chaud : $\mu_{\text{Froid}} = 0, \mu_{\text{Tiède}} = 0, \mu_{\text{Chaud}} = 1$

La température du corps ne peut pas prendre deux qualificatifs à la fois.

- b) En logique floue, le degré d'appartenance devient une fonction qui peut prendre une valeur réelle intermédiaire comprise entre 0 et 1 inclus. Dans ce cas, pour le qualificatif tiède, le corps peut être considéré à la fois, comme froid avec un degré d'appartenance de 0.3 et comme tiède avec un degré d'appartenance de 0.75 (figure II.1.b).

Pour $T=35^{\circ}C$:

$$\mu_{\text{froid}}(T) = 0.3$$

$$\mu_{\text{Tiède}}(T) = 0.75$$

$$\mu_{\text{Chaud}}(T) = 0$$

Selon la logique floue le raisonnement exacte est un cas limite du raisonnement approximatif ; tout n'est qu'un degré. Tout système logique peut être rendu flou. La logique booléenne est un sous-ensemble de la logique floue.

L'importance de la logique floue provient du fait que le raisonnement humain est approximatif.

II. 4.1 Caractéristiques d'un sous-ensemble flou

Un sous-ensemble flou A peut également être décrit par un certain nombre de caractéristiques (figure II.2).

- **Son support** : qui est l'ensemble des éléments de U qui appartiennent au moins un peu à A . Il est défini par :

$$\text{Supp}(A) = \{x \in U / \mu_A(x) \neq 0\}. \quad (\text{II.1})$$

- **Sa hauteur** : qui est sa plus grande valeur prise par sa fonction d'appartenance. Elle est définie par :

$$h(A) = \sup_{x \in U} \mu_A(x). \quad (\text{II.2})$$

- **Son noyau** : qui est l'ensemble des éléments de U pour lesquels la fonction d'appartenance de A vaut 1. Il est défini par :

$$\text{noy}(A) = \{x \in U / \mu_A(x) = 1\}. \quad (\text{II.3})$$

Lorsque le noyau est réduit à un point, celui-ci est appelé « valeur modale ». Pour le triangle, elle correspond à la valeur du sommet.

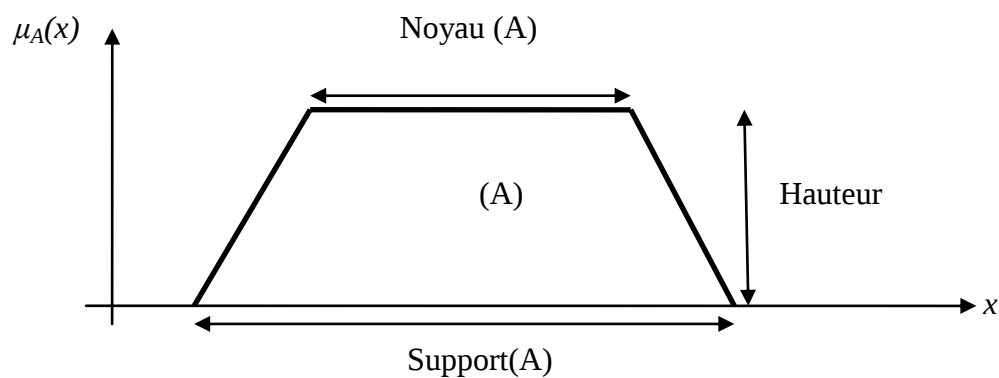


Figure II.2 : Représentation d'un sous- ensemble flou et ses principales caractéristiques

II.4.2 Opérations sur les sous-ensembles flous

Soient A et B deux sous-ensembles flous définis dans un univers du discours U par les fonctions d'appartenance μ_A et μ_B (figure II.3).

L'union, l'intersection, la complémentation et l'inclusion des sous-ensembles flous, peuvent être définis à l'aide des opérations sur les fonctions d'appartenance.

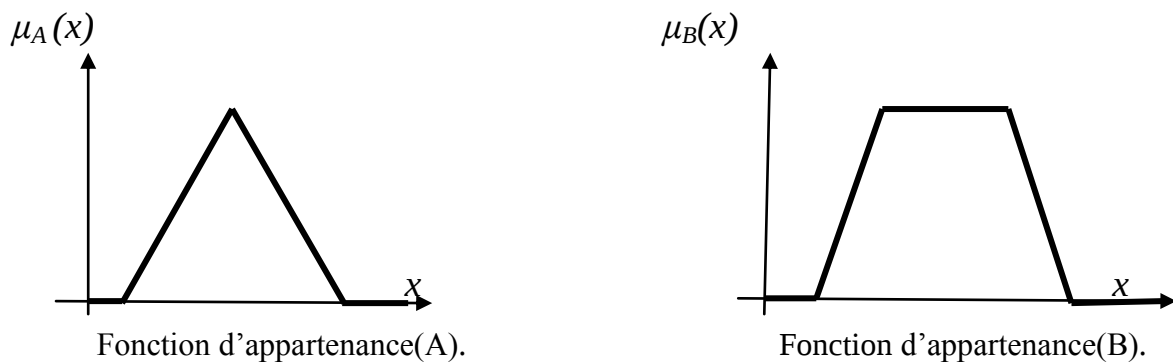


Figure II.3 : Fonctions d'appartenance triangulaire (A), et trapézoïdale (B)

- **Union**

L'union de deux sous-ensembles flous A et B de U est un sous-ensemble flou $A \cup B$ qui est défini par le plus grand sous-ensemble flou qui contient A et qui contient B . Sa fonction d'appartenance est donnée par :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max [\mu_A(x), \mu_B(x)] ; \forall x \in U. \quad (II.4)$$

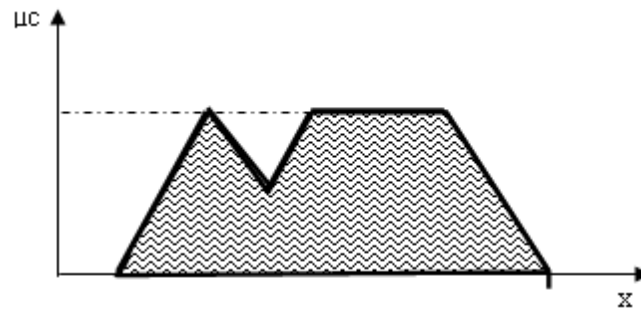


Figure II.4 : Fonction d'appartenance $A \cup B$

- **Intersection**

L'intersection de deux sous-ensembles flous A et B de U est un sous-ensemble flou $A \cap B$ qui est défini par le plus petit sous-ensemble contenu à la fois dans A et B , sa fonction d'appartenance est donnée par :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min [\mu_A(x), \mu_B(x)] ; \forall x \in U. \quad (II.5)$$

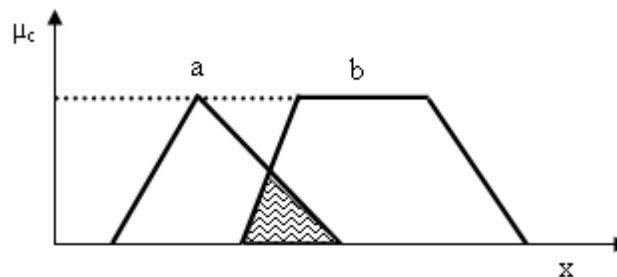


Figure II.5 : Fonction d'appartenance $A \cap B$

- **Complément**

Le complément d'un sous-ensemble flou A est un ensemble flou dénoté par $\bar{A}$ dont la fonction d'appartenance est donnée par :

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) ; \forall x \in U . \quad (\text{II.6})$$

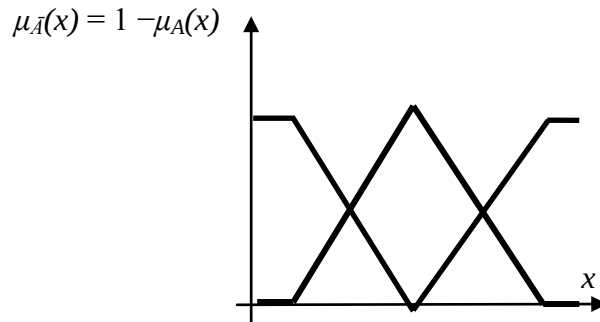


Figure II.6 : Opérateur de complémentation de la fonction d'appartenance A

- **Inclusion**

Si A et B sont deux ensembles flous de U , on dit que A est inclus dans B si :

$$\forall x \in U : \mu_A(x) \leq \mu_B(x). \quad (\text{II.7})$$

II.5 Variables linguistiques

Une variable linguistique appelée aussi attribut linguistique [15] est une variable dont les valeurs sont des mots ou des phrases exprimées dans une langue naturelle, elle peut être définie à partir du triplet (x, U, T_x) où

x : est une variable définie sur l'univers de discours U .

$T_x = A_1, A_2, \dots$ est un ensemble composé de sous-ensembles flous de U qui caractérise x , c'est-à-dire c'est l'ensemble des valeurs linguistiques que peut prendre la variable x .

par exemple $T_x = \{\text{froid, frais, tiède, chaud}\}$. On associe souvent à chaque sous ensemble flou de T_x une valeur ou un terme linguistique (étiquette).

La figure II.7 illustre un exemple de la variable linguistique "vitesse" avec trois termes linguistiques: petite, moyenne et grande.

U : est le domaine associé à la variable x , il est aussi appelé univers de discours. C'est en fait l'ensemble de toutes les valeurs numériques que peut prendre la variable numérique associée à la variable linguistique x .

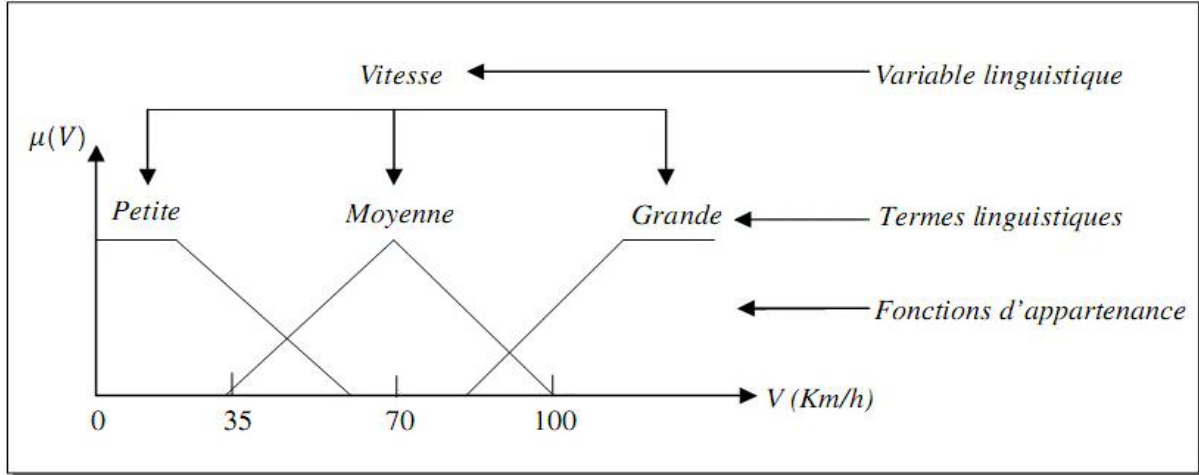


Figure II.7 : Variable linguistique

II.6 Fonction d'appartenance

On représente les variables linguistiques par leurs fonctions d'appartenance.

Soit un ensemble E , et un sous-ensemble A de E , et x un élément de E appartenant à A ($x \in A$). Pour illustrer cette caractéristique, on utilise la fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ compris entre 0 et 1, qui représente le degré d'appartenance de x à l'ensemble flou A . Le plus souvent, la fonction d'appartenance est déterminée par l'une des fonctions suivantes (figure II.3) :

- **Fonction triangulaire**

Elle est définie par trois paramètres $\{a,b,c\}$, qui déterminent les coordonnées des trois sommets (figure II.2.3-a).

$$\mu(x) = \max \left(\min \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right). \quad (\text{II.8})$$

- **Fonction trapézoïdale**

Elle est définie par quatre paramètres $\{a,b,c,d\}$ (figure II.2.3-b).

$$\mu(x) = \max \left(\min \left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right), 0 \right). \quad (\text{II.9})$$

- **Fonction gaussienne**

Elle est définie par deux paramètres $\{\sigma, m\}$ (figure II.2.3-c).

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (\text{II.10})$$

- **Fonction sigmoïde**

Elle est définie par deux paramètres $\{a, c\}$ (figure II.2.3.d).

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a(x-c))}. \quad (\text{II.11})$$

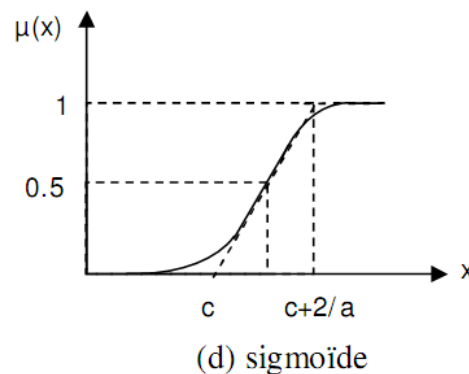
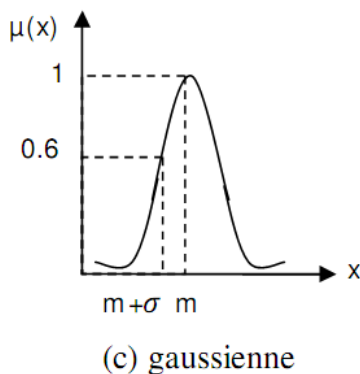
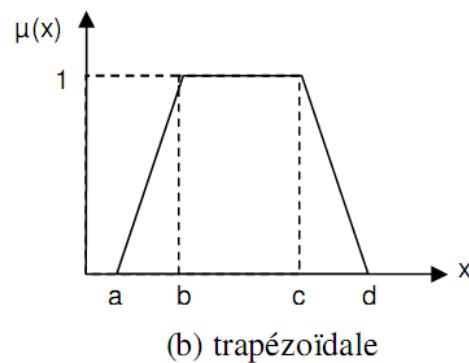
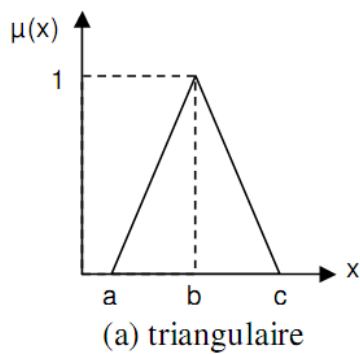


Figure II.8 : Formes usuelles de fonctions d'appartenance

L'allure de la fonction d'appartenance est à choisir selon l'application traitée. La figure II.3, illustre les différentes formes de fonctions d'appartenance les plus utilisées. Cependant, dans certaines applications où l'on doit dériver la fonction d'appartenance, on

choisira plutôt des fonctions en S (sigmoïde) ou des fonctions de type gaussien, continument dérivables sur leur support.

II.7 Règles d'inférences

On appelle règles d'inférences l'ensemble des différentes règles reliant les variables floues d'entrée d'un système à ses variables floues de sortie à l'aide des différents operateurs. Elles se présentent sous la forme :

Si condition 1 ET/OU condition 2 (ET/OU...) Alors action sur les sorties.

La prémisse ou antécédent de la règle est la partie qui suit le *Si*, et conséquence, ou simplement conclusion la partie qui suit le *Alors*. Le caractère flou de la règle provient du fait que prémisses et conclusion sont définies par des mots linguistiques, implémentées par des ensembles flous. L'ensemble des règles de raisonnement forme le moteur d'inférence du système.

Ces règles floues sont déduites des expériences acquises par les experts et peuvent être utilisées dans un processus d'inférence flou. Par exemple, si un expert exprime la règle : si la température de l'eau est chaude, il faut ajouter de l'eau froide. Le système utilisera une règle de genre : si *A* alors *B*.

II.8 Commande Floue

L'objectif de la commande est d'agir sur le processus afin d'atteindre un comportement désiré. De point de vue de l'automatique, il s'agit de synthétiser une loi de commande garantissant des performances sur le comportement du système en termes de stabilité, et de robustesse vis-à-vis de perturbations, etc.

Pour cela on utilise un contrôleur flou dont la structure de base est illustrée dans la figure II.9.

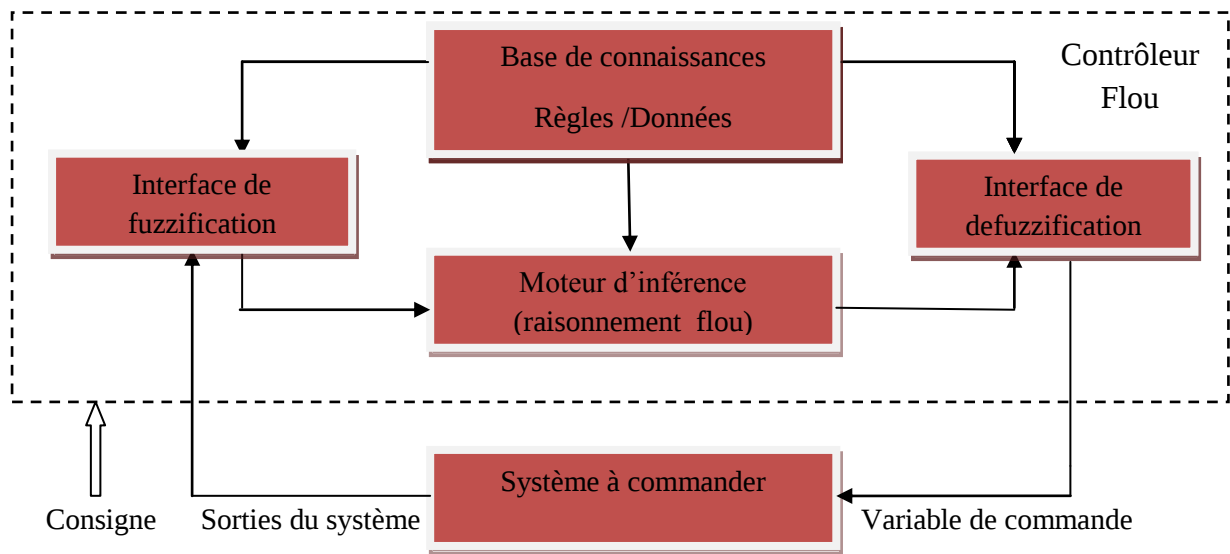


Figure II.9 : Structure de base d'un régulateur flou

Les variables caractéristiques du système à commander et les consignes définissent les variables d'entrée du contrôleur flou. Les variables caractéristiques sont, en général, les grandeurs de sortie du processus. Les variables de sortie du contrôleur flou sont les commandes appliquées au processus.

La configuration de base du contrôleur flou comprend quatre parties :

- La fuzzification des variables d'entrée, avec éventuellement un prétraitement de l'information.
- La Base de connaissances.
- Le Moteur d'inférence floue.
- La defuzzification, avec éventuellement un post-traitement de l'information.

II.8.1 fuzzification

La fuzzification consiste à calculer, pour chaque valeur d'entrée numérique, les degrés d'appartenance aux ensembles flous associés et prédéfinis dans la base de données du système flou. Ce bloc réalise la transformation des entrées numériques en informations symboliques floues utilisables par le mécanisme d'inférence, c'est-à-dire le passage d'une grandeur numérique à une variable floue.

Le choix des formes des fonctions d'appartenance est arbitraire. Des études comparatives ont montré qu'avec les différentes formes des fonctions, les résultats sont pratiquement similaires en boucle fermée. La forme la plus fréquemment utilisée en commande floue est la forme triangulaire. Le nombre de fonctions d'appartenance est généralement impair et se répartissent autour de zéro. Le choix du nombre de sous-ensembles flous pour une variable linguistique dépend de la précision souhaitée.

II.8.2 Base de connaissance

Elle contient les définitions des fonctions d'appartenance (formes et paramètres) associées aux variables d'entrée/sortie, ainsi que l'ensemble des règles floues sous forme « Si-Alors » basées sur la connaissance d'un expert.

II.8.3 Moteur d'inférence floue (Mécanisme d'inférence)

Le mécanisme d'inférence est un mécanisme de décision. Il consiste d'une part à calculer le degré de vérité des différentes règles du système et d'autre part à associer à chacune de ces règles une valeur de sortie (agrégation). Cette valeur de sortie dépend de la partie conclusion des règles qui peut prendre plusieurs formes. Il peut s'agir d'une proposition floue, et l'on parlera dans ce cas de règle de type Mamdani:

$$\text{Si } (\text{.....}) \text{ Alors } Y \text{ est } B, B \text{ est un ensemble flou} \quad (\text{II.12})$$

Il peut également s'agir d'une fonction réelle des entrées, et l'on parlera dans ce cas de règle de type Sugeno:

$$\text{Si } (\text{.....}) \text{ Alors } y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (\text{II.13})$$

où $x_1, \dots, x_n$ sont les valeurs réelles des variables d'entrées.

Parmi les méthodes d'inférences les plus utilisées on cite:

- Méthode d'inférence max-min (Mamdani).
- Méthode d'inférence max-prod (Larsen).
- Méthode d'inférence somme-prod (Sugeno).

➤ *Méthode d'inférences max-min*

La méthode d'inférences max-min réalise, au niveau de la condition l'opérateur OU par la formation du maximum et l'opérateur ET par la formation du minimum. La conclusion dans chaque règle est introduite par ALORS (min).

Pour chaque règle, on obtient la fonction d'appartenance partielle par la relation:

$$\mu_{Ri}(x_R) = \min (\mu_{Ai}(x_R), \mu_{Bi}(x_R)) ; i=1,2,\dots,m \quad (\text{II.13})$$

La fonction d'appartenance résultante est alors donnée par :

$$\mu_{Res}(x_R) = \max (\mu_{R1}(x_R), \mu_{R2}(x_R), \dots, \mu_{Rm}(x_R)) . \quad (\text{II.14})$$

Agrégation des règles :

Le degré d'activation d'une règle est en fonction des propositions qui la constitue. Dans le cas où plusieurs règles sont actives, l'agrégation donne le résultat de la conséquence en considérant le degré d'activation de chaque règle, comme l'illustre la figure II.11.

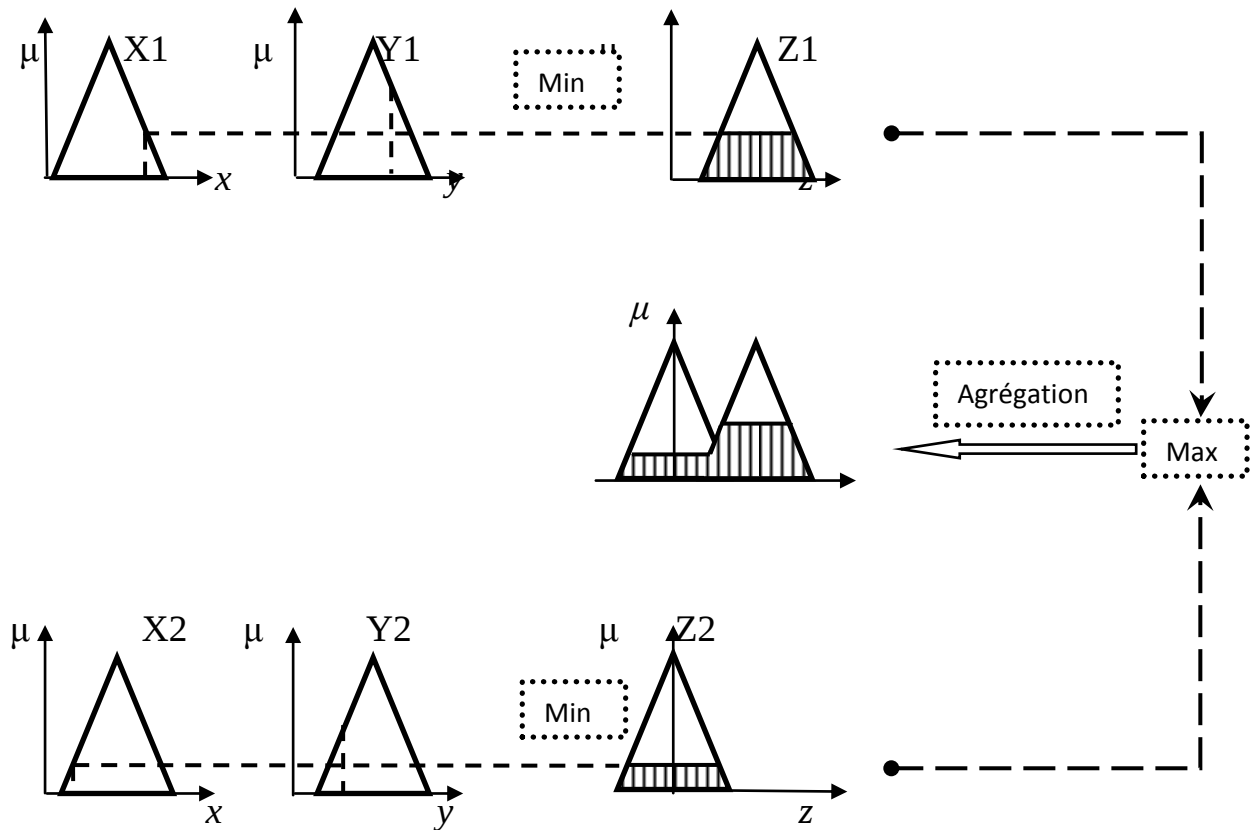


Figure II.10 : Agrégation des règles

➤ *Méthode d'inférence max-prod*

La méthode d'inférences max-prod réalise, au niveau de la condition l'opérateur OU par la formation du maximum et l'opérateur ET par la formation du minimum. La conclusion dans chaque règle est introduite par ALORS (prod).

Pour chaque règle, la fonction d'appartenance partielle $\mu_{Ri}(x_R)$ est donnée par la relation :

$$\mu_{Ri}(x_R) = (\mu_{Ai}(x_R) * \mu_{Bi}(x_R)) ; \quad i=1,2,\dots,m \quad (II.15)$$

La fonction d'appartenance résultante est alors donnée par :

$$\mu_{Res}(x_R) = \max (\mu_{R1}(x_R) , \mu_{R2}(x_R), \dots \mu_{Rm}(x_R)). \quad (II.16)$$

➤ *Méthode d'inférence somme-prod*

Par opposition aux méthodes d'inférence précédentes, la méthode d'inférence somme - prod réalise, au niveau de la condition, l'opérateur OU par la formation de la somme, tandis que l'opérateur ET est réalisé par la formation du produit. La conclusion de chaque règle est précédée par ALORS (la valeur moyenne).

En toute généralité, on obtient la fonction d'appartenance partielle $\mu_{Ri}(x_R)$ de chaque règle par la relation :

$$\mu_{Ri}(x_R) = (\mu_{Ai}(x_R) * \mu_{Bi}(x_R)) ; \quad i=1,2,\dots,m \quad (II.17)$$

La fonction d'appartenance résultante est donnée par :

$$\mu_{Res}(x_R) = \sum (\mu_{R1}(x_R) , \mu_{R2}(x_R), \dots \mu_{Rm}(x_R))/m. \quad (II.18)$$

Où m est le nombre de règles intervenant dans l'inférence.

II.8.4 Défuzzification

La phase de défuzzification est le passage du symbolique vers le numérique. Elle permet de générer une valeur numérique à partir de l'ensemble obtenu par composition des règles.

Les méthodes d'inférence, fournissent une fonction d'appartenance résultante, $\mu_{Res}(x_R)$ pour la variable de sortie x_R , il s'agit donc d'une information floue. Par l'étape de défuzzification, se fait alors le retour aux grandeurs de sortie réelles. Il s'agit à cet effet, de calculer à partir des degrés d'appartenance la valeur correspondante à cette sortie.

Plusieurs stratégies de défuzzification existent, les plus utilisées sont:

- Méthode de centre de gravité.
- Méthode du maximum.
- Méthode de la moyenne des maxima.

➤ **Défuzzification par la Méthode de centre de gravité :**

La défuzzification par la méthode de centre de gravité consiste à calculer l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante μ_r .

$$y^* = \frac{\int y \cdot \mu_r(y) dy}{\int \mu_r(y) dy} \quad (\text{II.19})$$

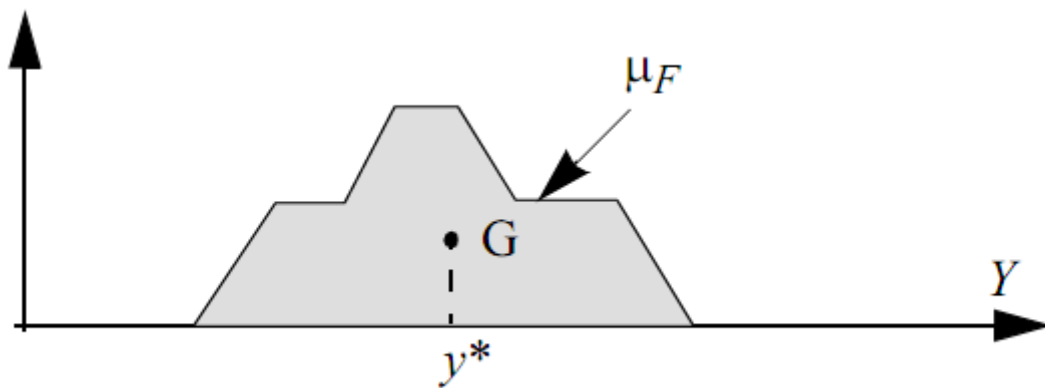


Figure II.11 : Défuzzification par la méthode de centre de gravité

➤ **Défuzzification par la Méthode du maximum**

Cette méthode, s'applique uniquement dans le cas où la fonction d'appartenance associée à l'ensemble de sortie n'admet qu'un seul maximum. On choisit comme sortie l'abscisse y^* correspondant à ce maximum.

➤ **Défuzzification par la Méthode de la moyenne des maxima**

Dans cette méthode, la valeur de sortie est estimée par l'abscisse du point correspondant au centre de l'intervalle M pour lequel la fonction d'appartenance est maximale. Cette valeur est fournie par l'expression:

$$y^* = (\inf(M) + \sup(M))/2 \quad (\text{II.20})$$

Où $\inf(M)$ et $\sup(M)$ sont respectivement les bornes inférieure et supérieure de l'intervalle M .

II.9 Types de systèmes d'inférence floue

Il existe plusieurs types de système d'inférence floue, les plus utilisés sont :

1.9.1 Système d'inférence floue de type Mamdani

La technique de commande par logique floue que Mamdani a présentée pour la première fois, consiste à déterminer un ensemble de règles qui maîtrise le comportement dynamique du système à commander. L'obtention de ces règles est facile auprès des experts qui connaissent bien le système.

Il avait utilisé des règles à prémisses et conclusions symboliques, méthode d'inférence (max, min) et méthode de défuzzification par centre de gravité.

La forme de l'implication floue définie par ce type de contrôleur est de la forme :

$$\text{« Si } x_1 \text{ est } A \text{ et } x_2 \text{ est } B \text{ Alors } y \text{ est } C \text{ »} \quad (\text{II.21})$$

La conséquence de ce type de système est une valeur floue.

1.9.2 Système d'inférence flou de type Takagi-Sugeno [16]

Sugeno et ses collaborateurs [16] ont proposé un autre type de système d'inférence flou appelé “ système d'inférence de type de Takagi-Sugeno-Kang (TSK)”.

Un TSK est constitué d'une base de règles de la forme:

$$\text{« Si } x_1 \text{ est } A_1 \text{ et } x_2 \text{ est } A_2 \text{ et...et } x_r \text{ est } A_r \text{ Alors } y=f(x_1, x_2, \dots x_r) \text{ »}. \quad (\text{II.22})$$

Où :

$x_1, x_2, \dots x_r$ sont les variables d'entrées du contrôleur, y sa sortie, et f est une fonction numérique.

Dans ces systèmes, les prémisses des règles sont exprimées symboliquement et les conclusions par des fonctions.

II.10 Caractéristiques des systèmes d'inférence floue

Chaque système d'inférence flou est caractérisé par son type (Mamdani, Takagi-Sugeno,...), par le mode de partitionnement des domaines de validité des variables utilisées et par un ensemble de caractéristiques structurelles et paramétriques définies comme suit :

II.10.1 Caractéristiques structurelles

Ces caractéristiques spécifient tous les éléments du système d'inférence flou qui influent sur sa structure. Ces éléments sont constitués par :

- Le type de fonction d'appartenance utilisée (triangulaire, trapézoïdale, gaussienne, sigmoïde...) pour caractériser chaque terme linguistique.
- Le nombre de termes linguistiques pour chaque variable.
- Le nombre de règles générées.
- La technique de défuzzification.

II.10.2 Caractéristiques paramétriques

Une fois la structure du système d'inférence flou est choisie, le problème est alors le placement optimal des fonctions d'appartenance d'entrée et de sortie. Les caractéristiques paramétriques présentent en fait l'aspect purement numérique du système flou et définissent les sous-sembles qui le constituent :

- Les paramètres des fonctions d'appartenance des variables d'entrée.
- Les paramètres des fonctions d'appartenance des variables de sortie.

La mise en œuvre d'un système flou, dépend essentiellement de la technique d'induction de règles utilisée qui comporte deux étapes essentielles :

Une étape de génération de règles suivie d'une phase d'optimisation du système à savoir l'optimisation de paramètres et l'optimisation de la structure.

➤ **L'optimisation paramétrique**

Elle consiste à trouver le jeu des fonctions d'appartenance au niveau des prémisses et des conséquences des règles floues. Les méthodes usuelles consistent à opérer par ajustements successifs. Ces dernières années, on assiste toutefois à l'émergence de nouvelles approches basées sur des techniques numériques, telles que les approches hybrides neuro-floue en utilisant les algorithmes d'apprentissage, encore celles qui utilisent les algorithmes génétiques.

➤ **L'optimisation structurelle**

L'optimisation structurelle s'effectue en deux étapes :

- La première étape est la sélection des variables d'entrée :

Elle consiste à choisir parmi les variables qui décrivent le système et celles qui sont susceptibles d'être utilisées comme entrées du système.

- La deuxième étape est la réduction de la base de règles :

Elle consiste à éliminer les termes redondants afin de réduire le temps de calcul et l'exploitation du système flou de façon optimale.

Dans de nombreuses applications, les bases de données disponibles sont importantes en volume et par conséquent, la conception automatique de système d'inférence flou doit intégrer une optimisation structurelle.

Conclusion

La logique floue nous a permis de contourner la difficulté du modèle mathématique en passant au modèle linguistique basé sur une expertise.

Dans ce chapitre, après avoir introduit les concepts de base sur lesquelles reposent les systèmes d'inférence flou, nous avons établi les fondations nécessaires à la maîtrise des techniques intelligentes et nous avons décrit la structure générale d'un contrôleur flou, ainsi que ses différents composants.

Dans le cas des systèmes complexes, la logique floue représente un avantage majeur par rapport à la plupart des autres méthodes qui utilisent un modèle mathématiques souvent imprécis ou difficile à obtenir. Cependant, l'inconvénient majeur réside dans le fait que l'on ne peut pas incorporer les connaissances des experts qualifiés d'une certaine intelligence.

Les systèmes flous permettent désormais une meilleure exploitation de l'intelligence humaine pour accomplir des tâches complexes. Dans le chapitre suivant, nous allons développer un contrôleur flou à base de la logique floue.

Chapitre III

Application

III.1 Introduction

Une loi de commande peut être construite à partir d'un modèle mathématique linéaire ou non linéaire d'un système, lorsqu'un tel modèle est disponible. Cependant, cela n'est pas toujours possible, en effet, il existe des situations où le modèle mathématique, pour une raison ou une autre, n'est pas disponible. Les approches conventionnelles sont alors inadaptées et les contrôleurs basés sur les systèmes d'inférence floue et les réseaux de neurones artificiels sont tout indiqués pour ce genre de situations.

Dans le contrôle des systèmes non linéaires, l'approche de la logique floue a trouvé une position très importante avec sa capacité systématique d'inclusion de connaissances linguistiques humaines dans la conception du contrôleur. Les contrôleurs par logique floue sont largement utilisés dans de nombreuses applications et ils donnent des bons résultats.

Le but de ce chapitre est de développer une commande par logique floue d'un robot manipulateur à articulation flexible. Cette commande doit être capable de réaliser un bon suivi de trajectoire, de minimiser les vibrations et de rejeter les perturbations.

Notre système mécanique est simulé dans l'environnement Matlab/Simulink. Pour tester l'efficacité de la commande proposée, une série de tests par simulation sera effectuée.

III.2 Mise en œuvre de la loi de commande par logique floue

- Dans cette étude, la flexibilité articulaire du robot est représentée par un ressort (figure I.8) et un bras libre attaché à cette articulation (figure I.9). Les valeurs numériques du système sont données par le tableau I.1 et le modèle dynamique par l'équation (I.15).
- Le contrôle de robot avec l'articulation flexible est réalisé par le régulateur flou et cela pour supprimer les vibrations des liaisons et pour atteindre des performances appréciables en poursuite de trajectoire.
- Les variables d'entrée du régulateur sont : l'erreur " e " entre la consigne (la trajectoire désirée) et la trajectoire parcourue et la dérivée de cette erreur " $\dot{e}$ ".
- La variable de sortie de ce régulateur est le signal de commande du notre système.

- La mise en œuvre de la loi de commande par logique floue est effectuée par le logiciel Matlab/Simulink.
- Les fonctions d'appartenance et les bases de règles ont été créées dans Fuzzy éditeur du système d'inférence. La figure III.1 montre un schéma fonctionnel du système et la structure du régulateur flou.

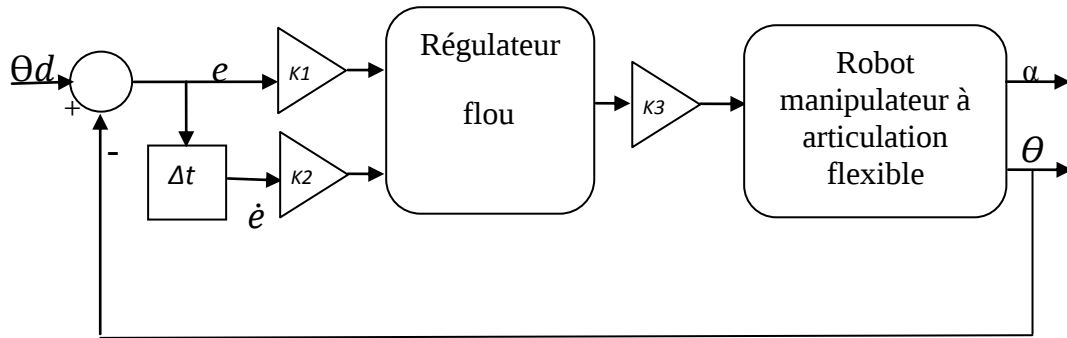


Figure III.1 : Schéma fonctionnel du système et la structure du régulateur flou

Où :

$K1$, $K2$ et $K3$ sont les facteurs d'amplifications ou gains. Ils sont choisis pour parvenir à un ensemble satisfaisant de paramètres du domaine temporel.

- Les fonctions d'appartenance du régulateur flou sont de type triangulaire.
- Les deux entrées et la sortie du régulateur flou sont appliquées avec des fonctions d'appartenance triangulaires, et dans un univers de discours de $[-1, 1]$.
- La méthode d'inférence utilisée dans ce travail est celle de max-min (Mamdani).
- L'étape de défuzzification est réalisée par la méthode de centre de gravité.
- Les règles d'inférence utilisées dans ce régulateur sont décrites par la table III.1 :

No. Règles

1. SI (e est NV) ET ($\dot{e}$ est NV) ALORS (u est NV)
2. SI (e est ZE) ET ($\dot{e}$ est NV) ALORS (u est NV)
3. SI (e est PV) ET ($\dot{e}$ est NV) ALORS (u est ZE)
4. SI (e est NV) ET ($\dot{e}$ est ZE) ALORS (u est PV)
5. SI (e est ZE) ET ($\dot{e}$ est ZE) ALORS (u est ZE)
6. SI (e est PV) ET ($\dot{e}$ est ZE) ALORS (u est NV)
7. SI (e est NV) ET ($\dot{e}$ est PV) ALORS (u est ZE)
8. SI (e est ZE) ET ($\dot{e}$ est PV) ALORS (u est NV)
9. SI (e est PV) ET ($\dot{e}$ est PV) ALORS (u est NV)

Table III.1 Règles d'inférence du régulateur flou

NV: Negative.

ZE : Zero.

PV : Positive.

III.3 Simulations et interprétations

Afin de traiter les problèmes de suivi de trajectoire et de comportement vibratoire pour le robot manipulateur à articulation flexible, nous avons proposé une stratégie de commande basée sur les outils de la logique floue.

Pour montrer l'efficacité de cette commande, plusieurs tests par simulation ont été réalisés, car nous avons choisi cinq trajectoires différentes.

Bloc de simulation :

Le bloc de simulation comporte essentiellement quatre sous blocs.

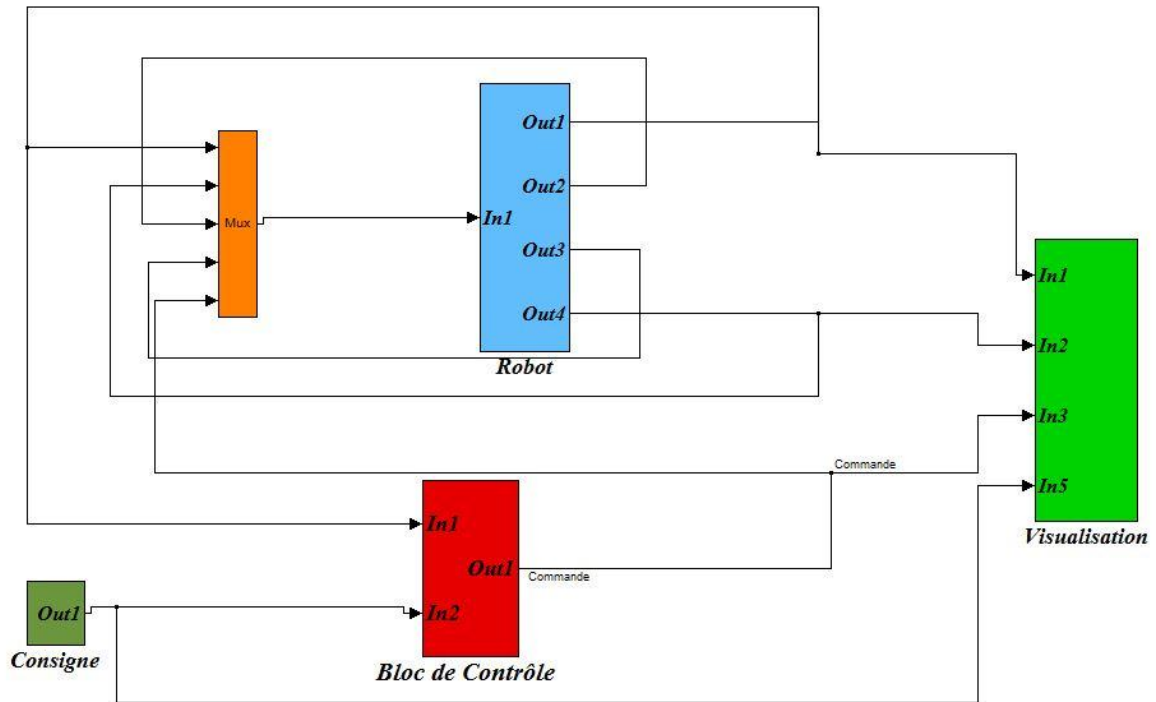


Figure III. 2 : Bloc de simulation

1. Consigne :

Ensemble des trajectoires désirées qui doit suivre le robot. Dans cette étude, nous avons traité cinq trajectoires différentes.

2. Robot :

Ce bloc comporte le modèle de notre système (figure III.3).

3. Bloc de contrôle :

Il est constitué des différents facteurs d'amplifications (gains) et le régulateur flou (figure III.4).

4. Visualisation :

C'est le scope qui nous permettra de visualiser les différents signaux.

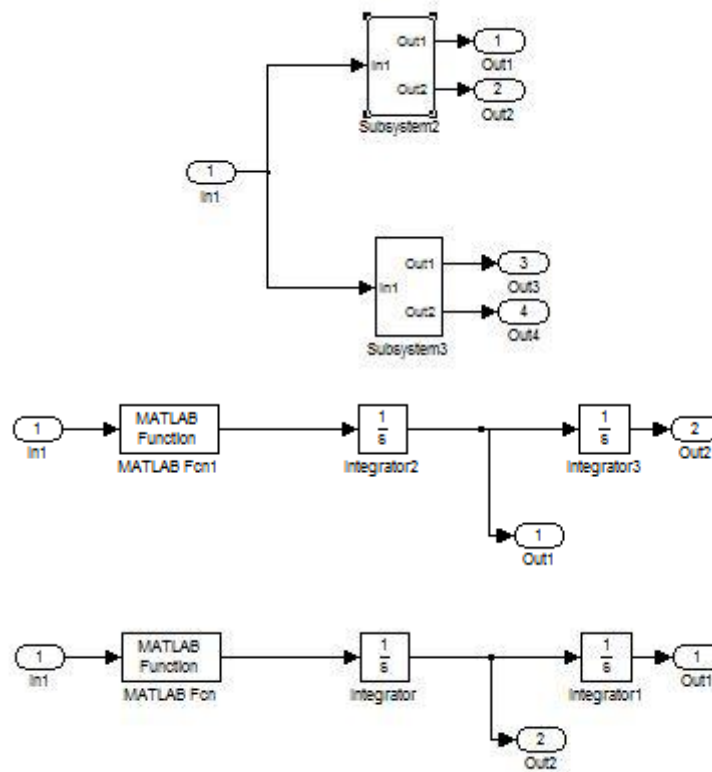


Figure III.3 : Modèle d'un bras à articulation flexible

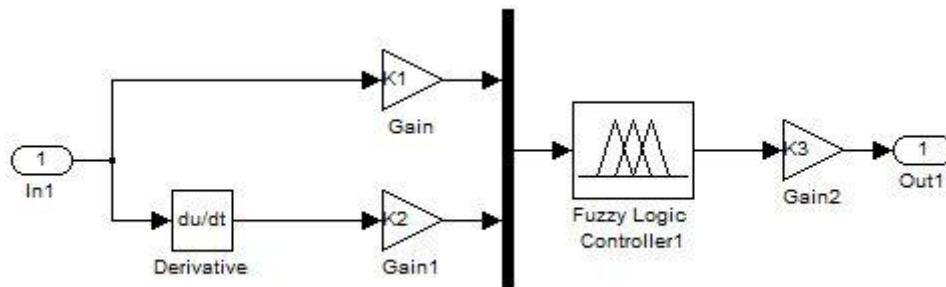


Figure III.4 Schéma bloc du contrôleur flou

Comme nous avons précisé précédemment, nous avons traité plusieurs exemples pour tester l'efficacité de notre commande.

Exemple N°1 :

Le but de cet exemple est de tester la poursuite d'une trajectoire sous forme d'une exponentielle.

$$Ampli = \pi$$

La consigne à suivre est :

$$\theta_d = Ampli * (1 - e^{-t})$$

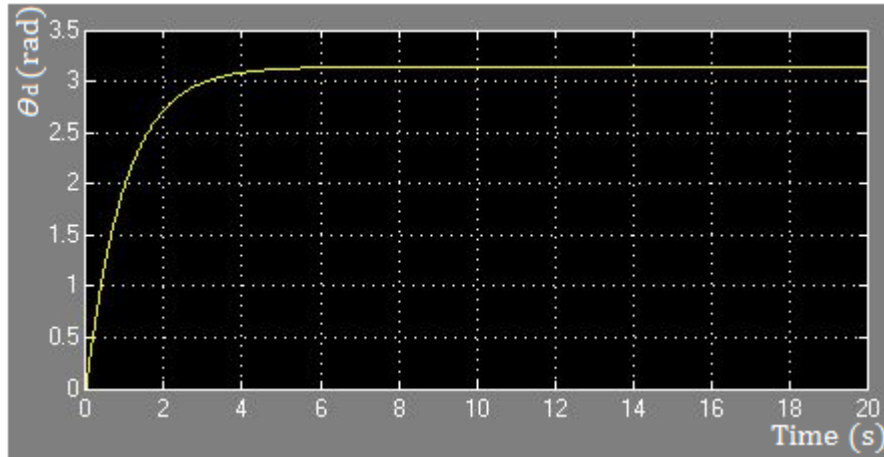


Figure III.5 : Angle θ désiré

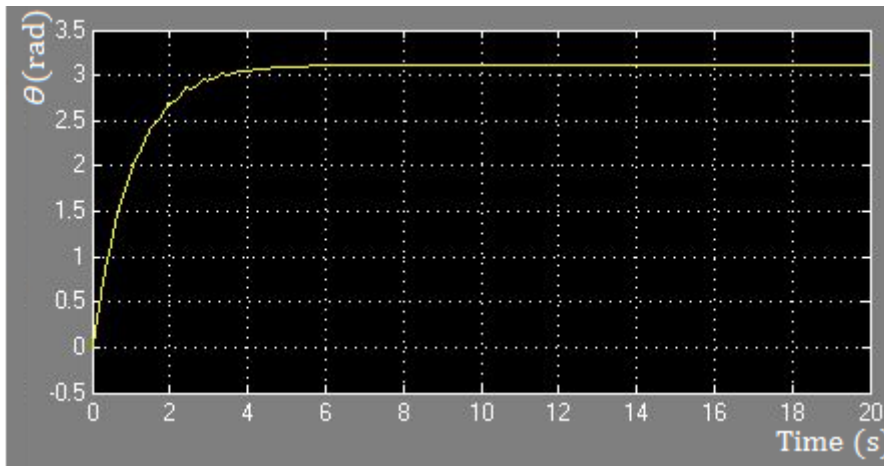


Figure III.6 : Angle θ mesuré

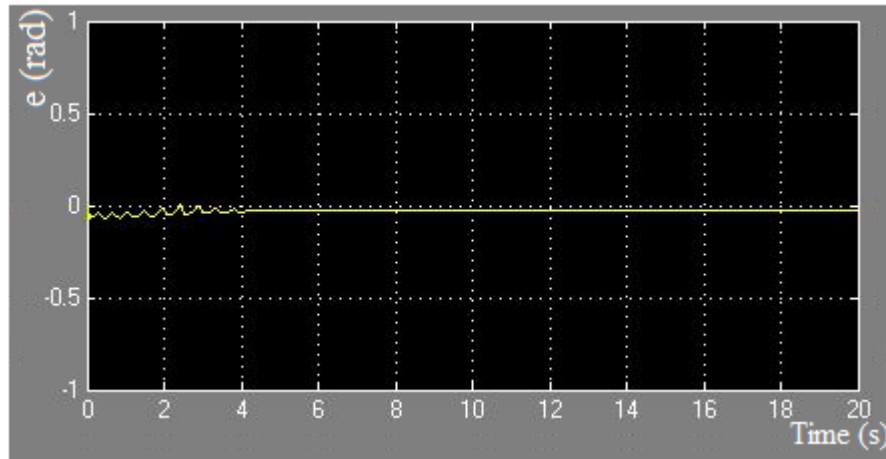


Figure III.7 : Erreur de poursuite

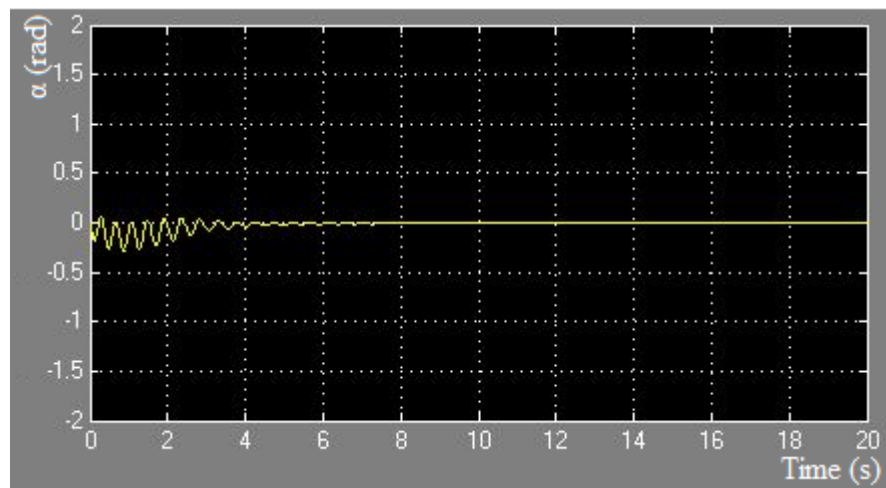
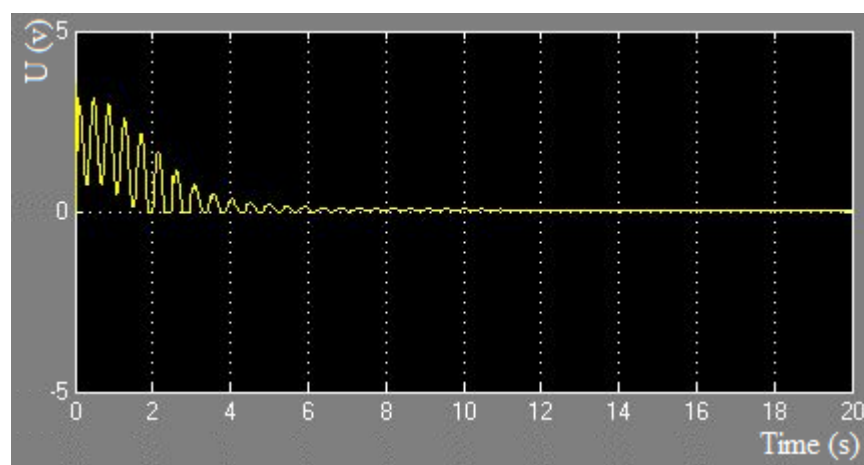
Figure III.8 : Angle de déflexion α 

Figure III.9 : Signal de commande

Déduction N°1 :

La trajectoire désirée et la trajectoire réelle sont illustrées par la figure III.5 et III.6. On voit clairement que le contrôleur flou atteint un très bon suivi de trajectoire avec un temps de réponse d'environ 4 s. L'erreur de poursuite qui est donnée par la figure III.7 est d'ordre de 0.001 rad. La figure III.8 présente la trajectoire de la déflexion α . Les vibrations sont très faibles et rapidement atténuées. L'évolution de la commande floue est montrée par la figure III.9. Dans un premier temps, elle présente des oscillations et un dépassement de 3 V. Elle finit par devenir nulle lorsque le déplacement désiré soit atteint et les vibrations sont amorties.

Exemple N°2 :

Augmentation d'amplitude de la consigne.

$$Ampli = 3 * \pi$$

La consigne à suivre est :

$$\theta_d = Ampli * (1 - e^{-t})$$

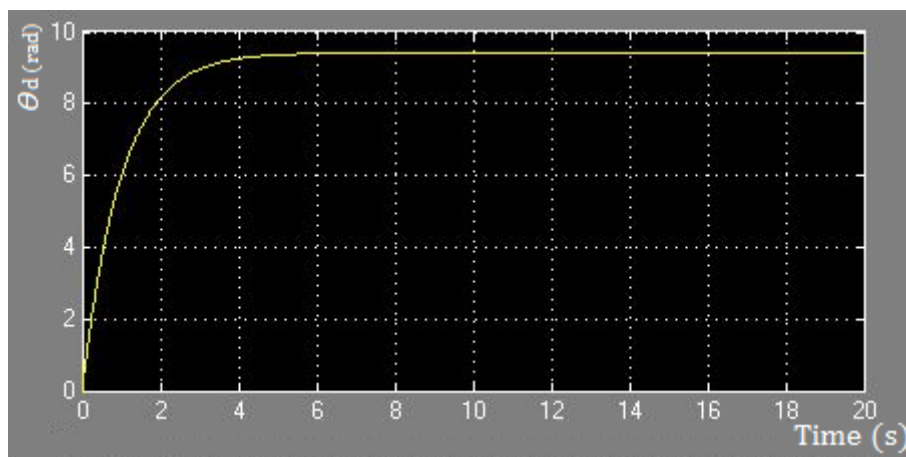


Figure III.10 : Angle θ désiré

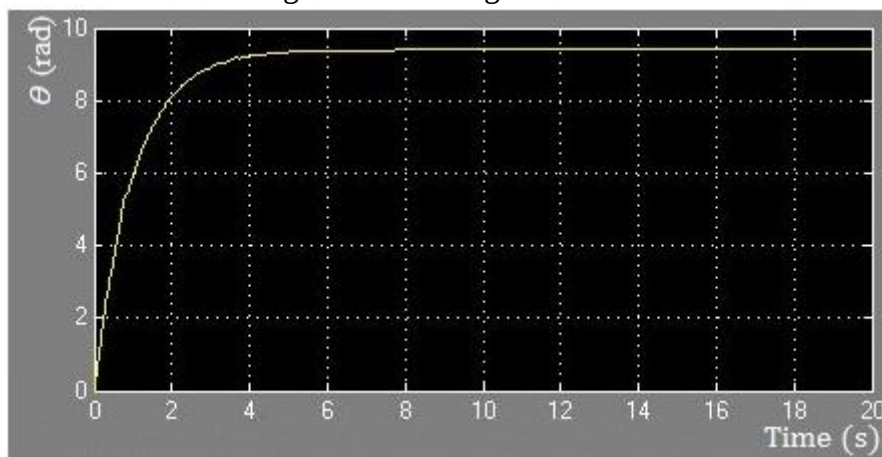


Figure III.11 : Angle θ mesuré

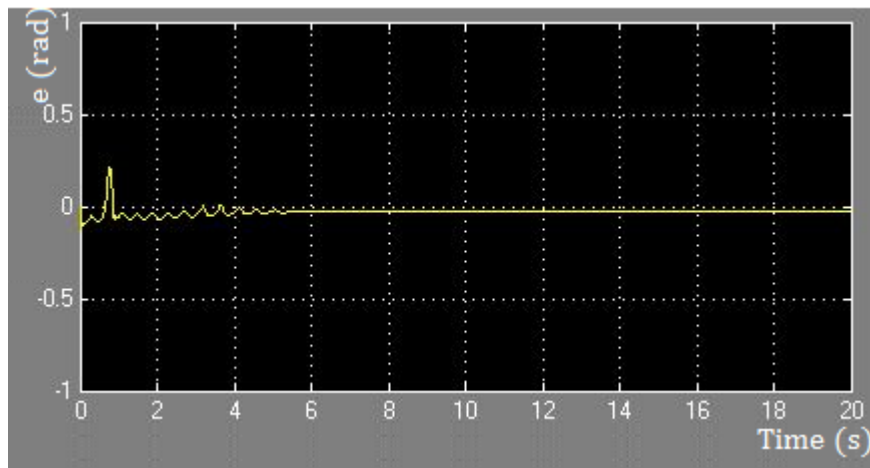


Figure III.12 : Erreur de poursuite

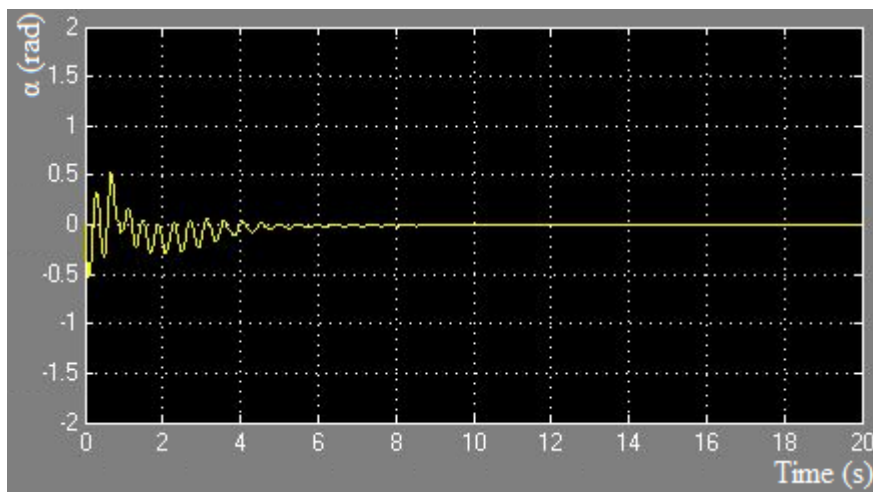
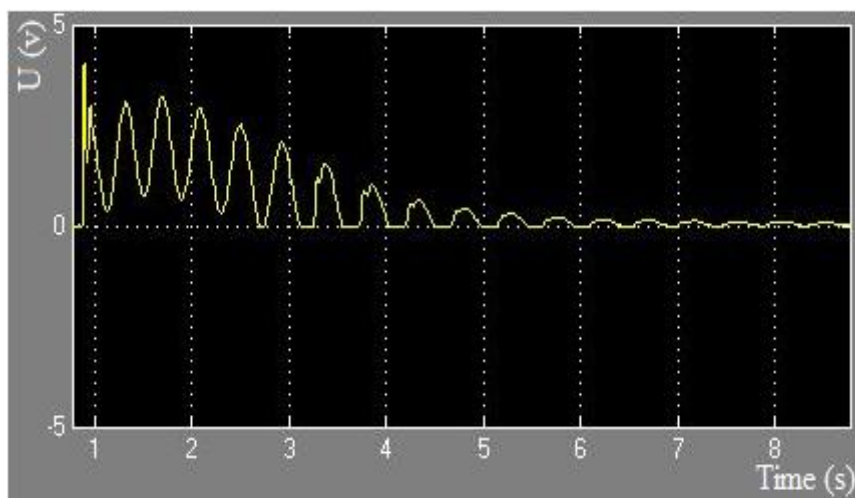
Figure III.13 : Angle de déflexion α 

Figure III.14 : Signal de commande

Déduction N° 2 :

On remarque que le contrôleur flou fonctionne d'une façon normale même en cas d'augmentation d'amplitude de la consigne. On constate juste une légère augmentation des erreurs (figure III.12) qu'on peut réduire par les facteurs d'amplifications. La chose la plus importante qu'on peut noter est que les vibrations de la trajectoire de déflexion α sont toujours très faibles.

Exemple N° 3 :

Le but de cet exemple est de tester la poursuite d'une trajectoire sous forme d'une sinusoïde.

Ampli = 1 ; fr = 0.5 Hz

La consigne à suivre est :

$$\theta_d = \text{Ampli} * \sin(\omega t)$$

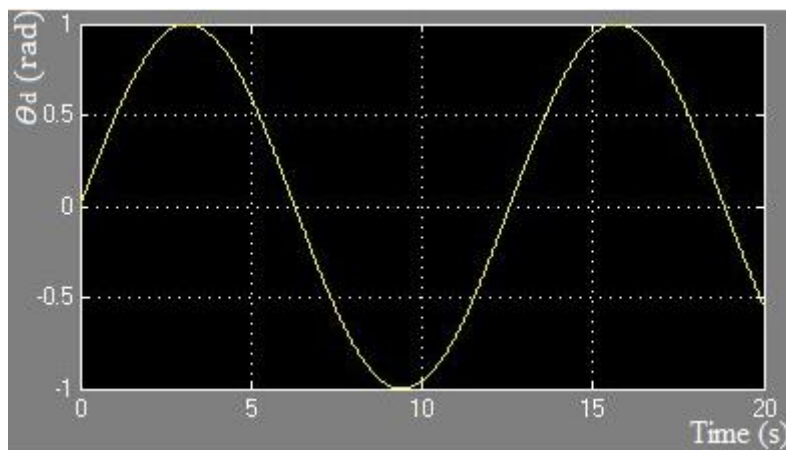


Figure III.15 : Angle θ désiré

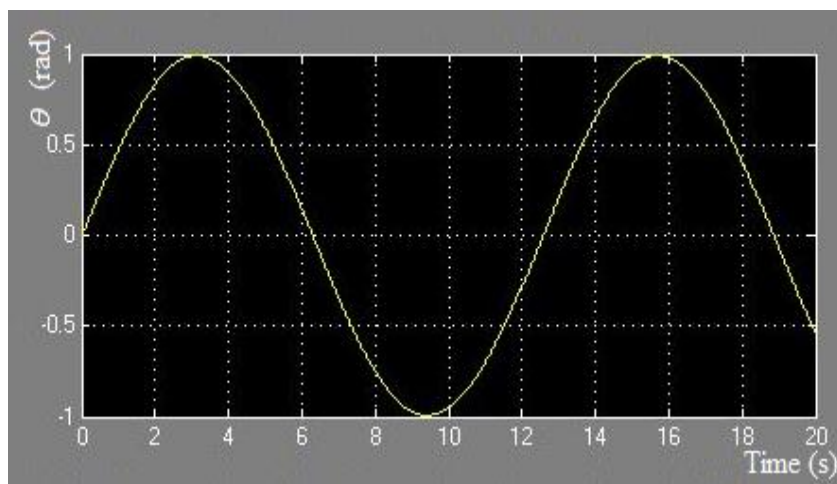


Figure III.16 : Angle θ mesuré

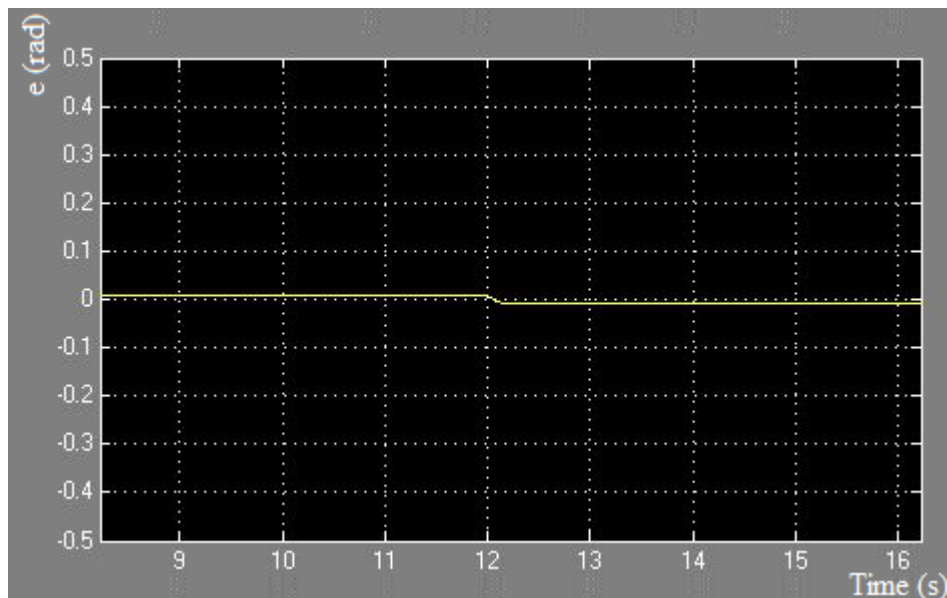
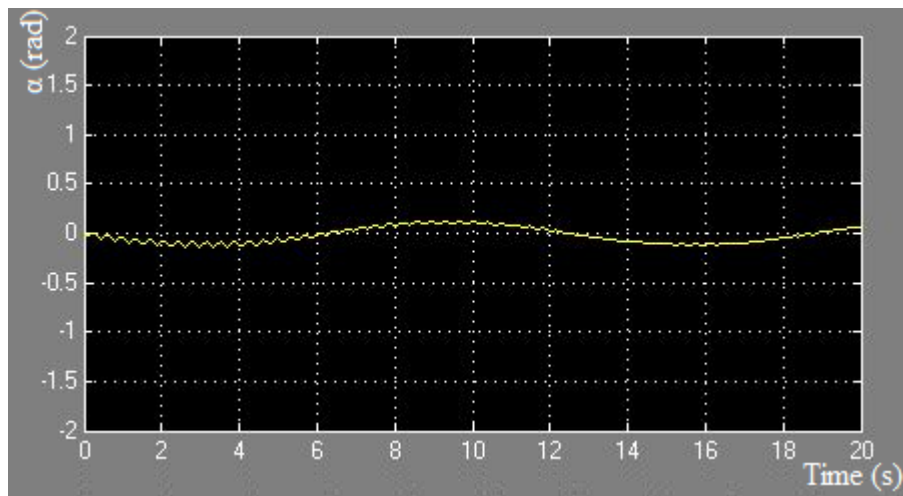


Figure III.17 : Erreur de poursuite

Figure III.18 : Angle de déflexion α **Déduction N° 3:**

Dans ce cas, nous avons choisi une consigne sinusoïdale. Le contrôleur flou nous a permis d'atteindre un bon suivi de trajectoire (figure III.15 et III.16), avec une très faible erreur de poursuite qui est de l'ordre de 0.005 rad comme montrée par la figure III.17. Nous constatons aussi des faibles vibrations au niveau de la trajectoire de déflexion α quand peut

réduire en cas de nécessité par les facteurs d'amplifications (gains) ou par le choix des ensembles flous et des fonctions d'appartenances (figure III. 18).

Exemple N° 4 :

Changement de la fréquence de la consigne.

Ampli = 1 ; fr = 1hz

La consigne à suivre est :

$$\theta_d = \text{Ampli} * \sin(wt)$$

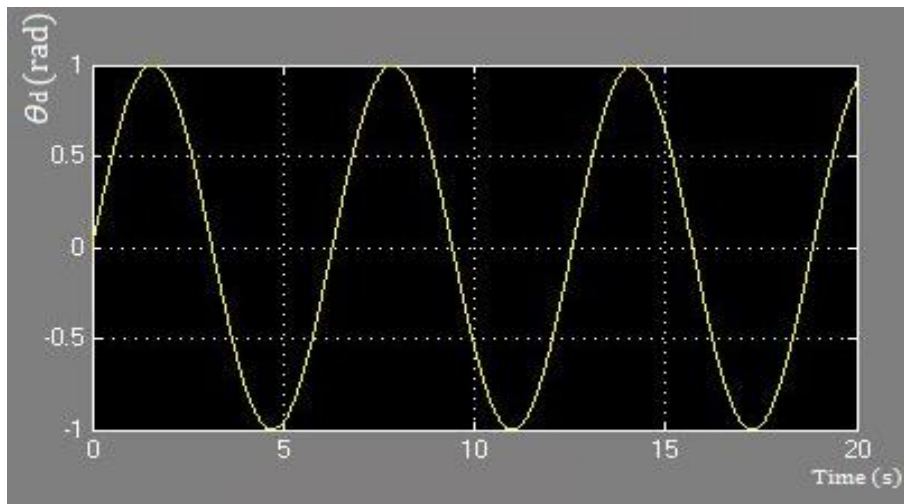


Figure III.19 : Angle θ désiré

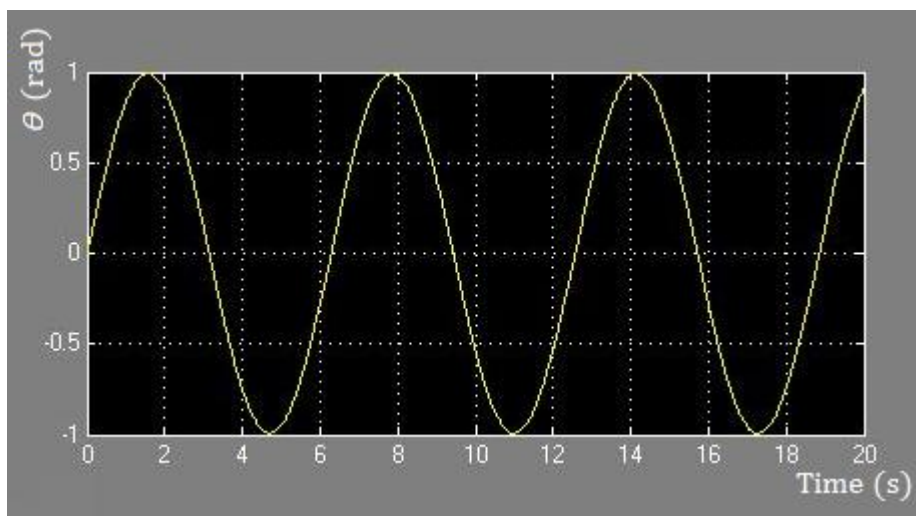


Figure III.20 : Angle θ mesuré

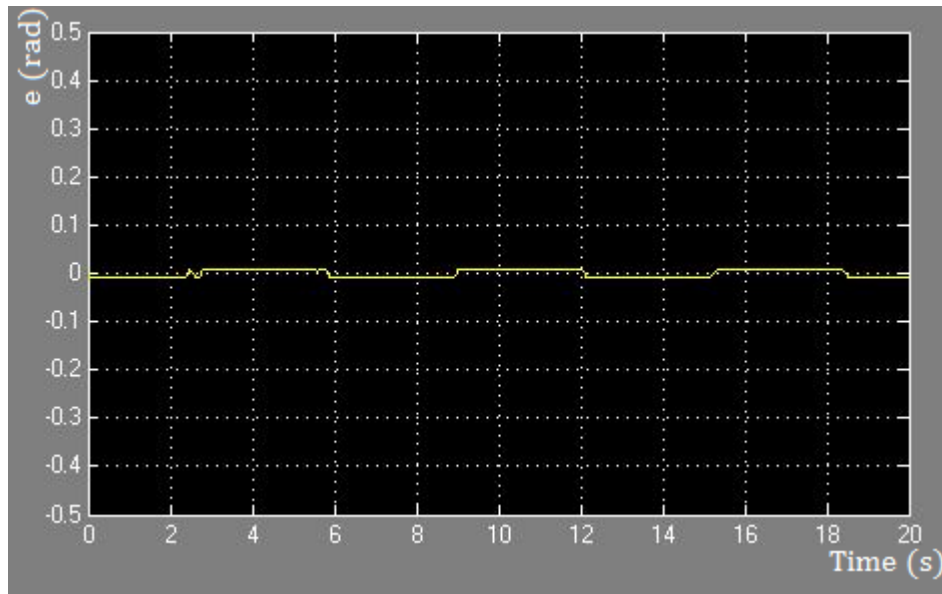
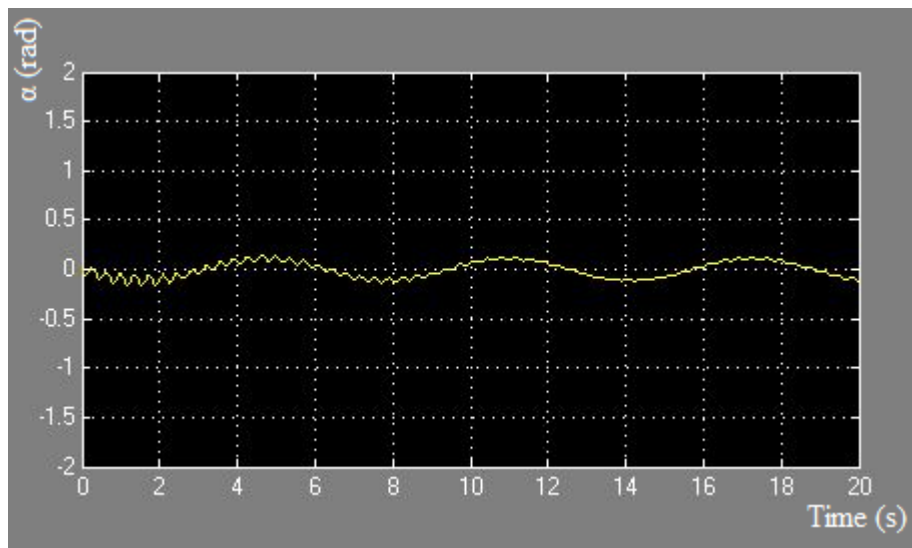


Figure III.21 : Erreur de poursuite

Figure III.22 : Angle de déflexion α **Déduction N° 4:**

Quoique la fréquence de la consigne sinusoïdale a changée (figure III.19), le résultat de la simulation ne diffère pas de celui de l'exemple précédent et sans apporter aucune modification sur le contrôleur flou.

Exemple N° 5 :

Dans ce cas, nous étudions l'effet d'une perturbation au cours de la poursuite d'une trajectoire. Ce problème est simulé par le changement de la masse de segment de robot. Nous avons considéré une variation paramétrique.

Alors :

Nous avons $m = 0.403(\text{Kg})$, elle est augmentée à $m=0.600(\text{Kg})$.

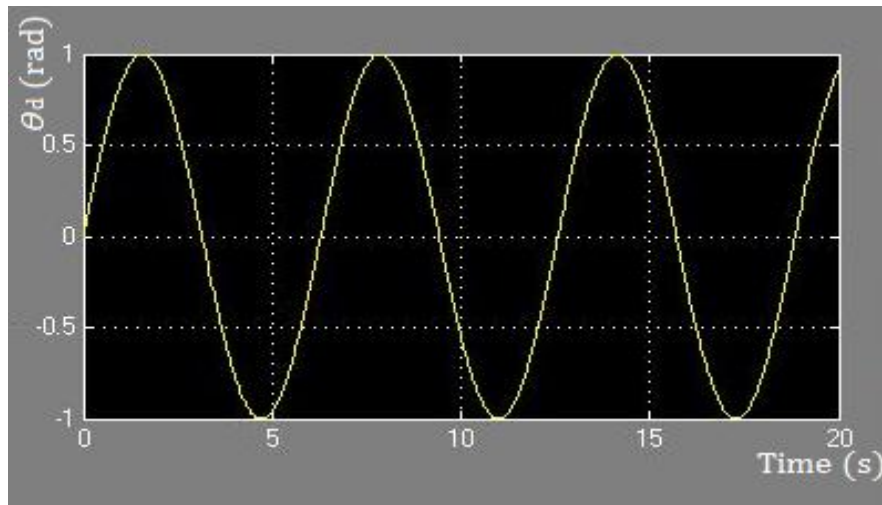


Figure III.23 : Angle θ désiré

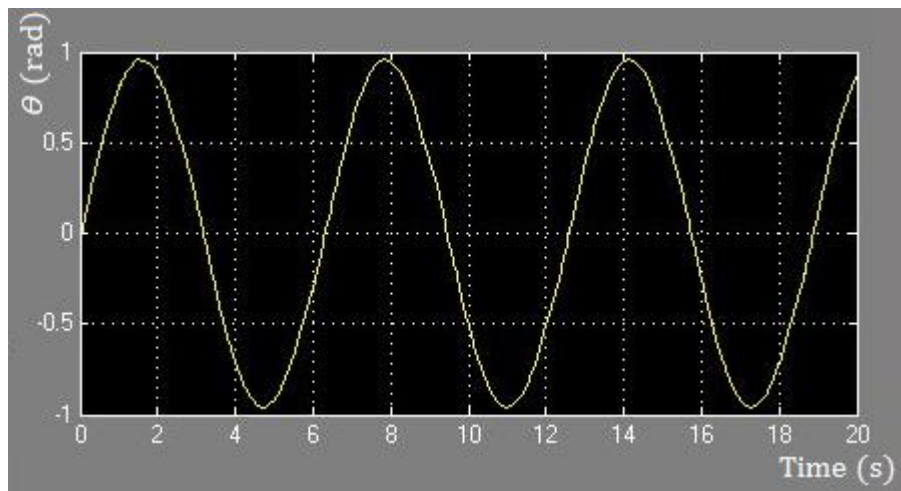


Figure III.24 : Angle θ mesuré

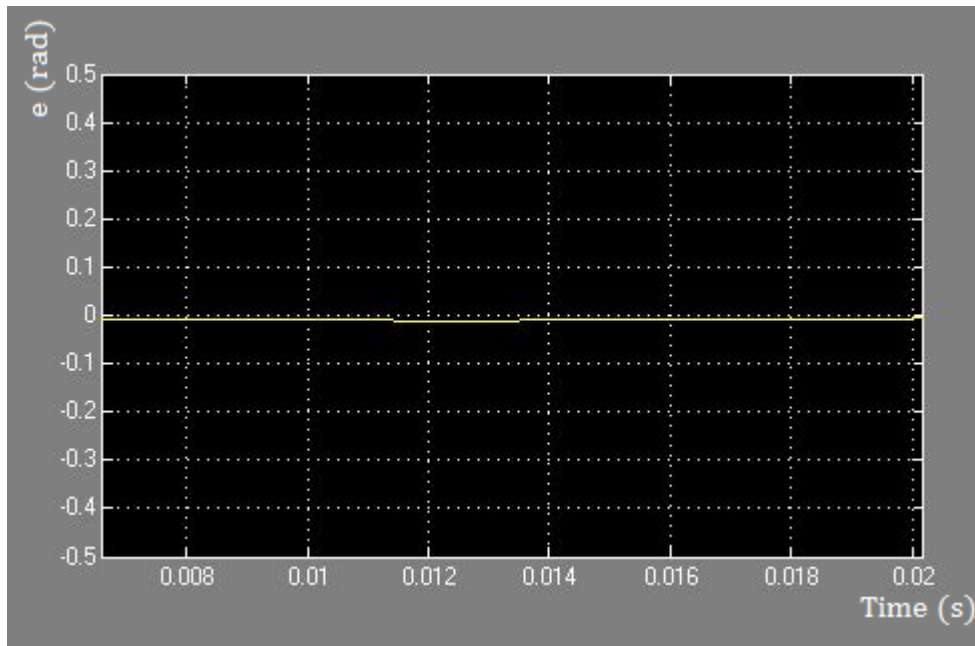
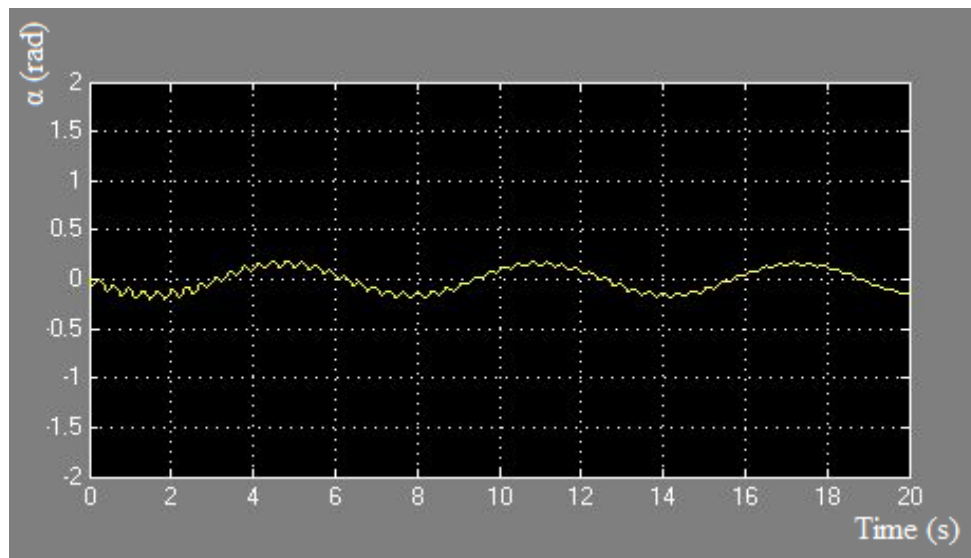


Figure III.25 : Erreur de poursuite

Figure III.26 : Angle de déflexion α **Déduction N° 5:**

Le changement brusque de la masse du segment du robot est bien supporté par le contrôleur flou comme montré sur les figures III.24 à III.26 sans nécessité de modifications au niveau du contrôleur flou.

D'après les résultats de simulations, nous constatons que le système a atteint des performances appréciables et le comportement vibratoire est considérablement réduit.

Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté la stratégie de commande par logique floue, appliquée sur un robot manipulateur à articulation flexible. A travers les résultats de simulations, nous concluons que nous avons atteint notre objectif qui est de suivre les trajectoires de références en temps fini, avec une grande précision, une bonne robustesse et une réduction considérable des vibrations.

La logique floue nous a permis de contourner la difficulté du modèle mathématique en passant au modèle linguistique basé sur une expertise. Le contrôleur flou nous a permis de remplacer les contrôleurs classiques tels que le PD et le PID. Il permet de compenser les incertitudes paramétriques et les perturbations. Le contrôleur flou est valable pour un système linéaire comme pour un système non linéaire. La logique floue peut être utilisée, en plus de la régulation, à gérer des architectures de contrôle intelligentes complexes.

Conclusion générale

Conclusion générale

Nous nous sommes intéressés dans ce travail, au problème de la commande de mouvement des robots manipulateurs à articulations flexibles. Ces systèmes sont non-linéaires, complexes et vibratoires ce qui rend difficile leurs contrôle.

Afin de satisfaire à la fois les spécifications de performances en suivi de trajectoire et d'amortissement de vibrations, nous avons proposé une stratégie de commande basée sur la théorie de la logique floue pour son raisonnement humain et approximatif. Pour atteindre cet objectif, nous avons divisé notre travail en trois chapitres.

Au chapitre I, nous avons présenté dans un premier temps, la description des robots manipulateurs flexibles d'une façon générale, et leurs importances dans l'industrie moderne. Dans un second temps, nous avons élaboré le modèle dynamique d'un robot manipulateur à articulation flexible en utilisant le formalisme d'Euler-Lagrange. Ceci nous a permis de tenir compte des non linéarités de notre système.

Dans le chapitre II, nous avons présenté les notions de base des ensembles flous qui ont deux propriétés principales, le traitement se fait en termes linguistiques et la capacité de représenter l'imprécision et l'incertitude d'un expert-humain. Cette approche trouve son intérêt dans des applications de commande où on ne dispose pas d'un modèle précis du système.

Le troisième chapitre porte sur l'application de la théorie de la logique floue sur un robot manipulateur à articulation flexible.

Les performances de la commande proposée ont été vérifiées à travers une série de tests par simulation. Les tests effectués en simulation ont été réalisés avec succès et les résultats obtenus ont montré l'efficacité et la robustesse de la commande proposée.

Les travaux décrits dans ce travail peuvent se poursuivre sur plusieurs voies de recherche.

- Il serait intéressant d'appliquer la commande proposée sur un robot manipulateur à segments et articulations flexibles.
- Introduire la commande de l'angle de déflexion.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] Zadeh, L.A(1965).fuzzy sets. Informatic and Control, vol 8 , pp.338–353.
- [2] définition sur le site de l'ATILF, <http://www.atilf.fr/ressources/grand-public/mots-de-la-science/cadres/robot.htm>.
- [3] Mais le docteur est d'or (Titre original : Gold) Pocket, (ISBN 978-2-266-06926-7) pp. 235.
- [4] B.Sciciliano Dynamic Model of Planar Multilink Lightweight Robots, IEEE Transactions on Systems, MAN, and Cybernetics, 21,pp. 826-839, 1991. and Khatib,2008
- [5] Laetitia Matignon cours robotiques Université de Caen, France.
- [6] Singer 1990, Book 1993, Gawronski 1997.
- [7] Oh, J. H. and Lee, J. S. (1997) Control of Flexible Joint Robot System by Backstepping Design Approach.Proc.of IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 3435–3440.
- [8] Ghorbel, F., Hung, J.Y. and Spong, M.W. (1989)Adaptive Control of Flexible Joint Manipulators. Control Systems Magazine. 9, pp. 9-13.
- [9] Lin, L.C. and Yuan, K. (2007) Control of Flexible Joint Robots via External Linearization Approach. Journal of Robotic Systems. 1, pp. 1-22.
- [10] Spong, M. W., Khorasani, K. and Kokotovic, P. V.(1987) An Integral Manifold Approach to the Feedback Control of Flexible Joint Robots. IEEE Journal of Robotics and Automation. 3, pp.291-300.
- [11] Tomei, P. (1991) A Simple PD Controller for Robots with Elastic Joints. IEEE Trans. on Automatic Control. 36, pp. 1208-1213.
- [12] M. A. A, Composite Fuzzy Logic Control Approach ,Control & Instrumentation (COINS) Research Group, Faculty of Electrical Engineering, University of Malaysia Pahang, Pekan, Malaysia.
- [13] Thèse de doctorat délivré par l'Université Toulouse III - Paul Sabatier Présentée et soutenue par O .GUENOUNOU , Méthodologie de conception de contrôleurs intelligents par l'approche génétique- application à un bioprocédé.

Références Bibliographiques

- [14] Zadeh, L.A. (1971). Quantitative fuzzy semantics. Information sciences, vol.3, pp.159-176.
- [15] Kim, E., M. Park, S. Ji et M. Park (1997). A new approach to fuzzy modeling. IEEE Transactions on Fuzzy Systems 5(3), pp. 328–337.
- [16] T. Takagi, M. Sugeno, “Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control”, IEEE Transactions on systems Man and cybernetics, Vol. 15, n° 1, 1985, pp. 116-132.