

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

Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou



Faculté De Génie Electrique Et D'informatique  
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

**Mémoire de Fin d'Etude  
de MASTER ACADEMIQUE**  
Spécialité : **commande des systèmes**

*Présenté par*  
**NESSAH MOULOUD  
DEHANI NABIL**

Mémoire dirigée par **M.SAIDI** Khayreddine

Thème

Utilisation d'un contrôleur à base du flou adaptatif pour commander un système non linéaire (application bras manipulateur à 2ddl)

*Mémoire soutenu publiquement le ..... mois 2014 devant le jury composé de :*

**M TOUAT**

Grade, Lieu d'exercice, Président

**M SAIDI**

Grade, Lieu d'exercice, Rapporteur

**M SALHI**

Grade, Lieu d'exercice, Examineur

---

## **Remerciements**

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur Monsieur **SAIDI Khayreddine**, pour la proposition de ce sujet et pour ses conseils et son soutien tout au long de ce travail.*

*Nous adressons nos vifs remerciements à Monsieur **HAMACHE**, pour son aide et l'intérêt qu'il a porté à ce travail.*

*Ensuite, les enseignants du département automatique en particulier **M. MELLAH Rabah** et **M. TOUAT**.*

*Que tous mes amis et collègues trouvent ici le témoignage de notre amitié et de notre reconnaissance.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail*

À ma mère  
À mon père  
Mes chers frères et sœurs  
Et à toute ma famille

**NABIL « BABICHE »**

# *Dédicaces*

Je dédie ce travail

*À ma mère*

*À mon père*

*Mes chers frères*

*Et à toute ma famille*

**MOULOU**

# SOMMAIRE

---

## SOMMAIRE

Introduction générale

### Chapitre I : généralité et modélisation des bras manipulateurs

I.1 Introduction .....	1
I.2 Généralité sur le robot : .....	1
I.2.1 Constituants mécaniques d'un robot : .....	1
I.2.1.1 Organe terminal .....	2
I.2.1.2 Système mécanique articulé : .....	2
I.2.1.3 Articulations .....	3
I.2.1.4 actionneurs .....	3
I.2.1.5 capteurs .....	3
I.3 Modélisation des robots .....	4
I.3.1 Structure géométrique des robots .....	4
I.3.2 Modèles géométriques .....	5
I.3.2.1 Modélisation géométrique directe .....	5
I.3.2.1.1 Calcul du modèle géométrique direct du PUMA 762 .....	7
I.3.2.2 Modélisation géométrique inverse .....	9
I.3.2.2.1 Méthode de calcul du modèle géométrique inverse .....	9
I.3.2.2.2 Calcul du modèle géométrique inverse du PUMA762 .....	10
I.3.3 Modélisation cinématique .....	11
I.3.3.1 Modèle cinématique direct .....	11
I.3.3.2 Modèle cinématique inverse .....	11
I.3.4 Modélisation dynamique .....	12
I.3.4.1 Le modèle dynamique inverse .....	12
I.3.4.2 Le modèle dynamique direct .....	12
I.3.4.2.1 Formalisme de Lagrange _ Euler .....	12
I.3.4.2.2 Modélisation dynamique d'un bras manipulateur à 2d.d.l .....	13
I.4 Conclusion .....	16

# SOMMAIRE

---

## Chapitre II : aperçu sur la logique floue et la commande adaptative

II.1 Introduction.....	17
II.2 Logique floue et la commande floue.....	17
II.2.1 La logique floue.....	18
II.2.2 Notion de sous-ensemble flou.....	18
II.2.3 Univers de discours.....	18
II.2.4 Variable et valeur de variable linguistique.....	19
II.2.5 Règles d'inférence.....	19
II.2.6 Représentation des fonctions d'appartenance.....	20
II.2.6.1 Fonction triangulaire.....	20
II.2.6.2 Fonction trapézoïdale.....	20
II.2.6.3 Fonction sigmoïde.....	20
II.2.6.4 Fonction gaussienne.....	20
II.2.7 Opérations sur les ensembles flous.....	21
II.2.7.1 Egalité.....	21
II.2.7.2 Inclusion.....	21
II.2.7.3 La disjonction floue, 'OU' ou Union.....	21
II.2.7.4 La conjonction floue, 'ET' ou intersection.....	21
II.2.7.5 La complémentation, négation ou inverse.....	22
II.2.8 Configuration interne d'un système d'inférence flou (SIF).....	24
II.2.8.1 Fuzzification.....	24
II.2.8.2 Base de règles floues.....	26
II.2.8.3 Le moteur d'inférence flou.....	26
II.2.8.4 Défuzzification.....	26
II.2.8.5 Les différents systèmes d'inférence floue.....	28
II.3 Correcteur proportionnel dérivée flou (FPD).....	31
II.4 Avantages et désavantages du réglage par la logique floue.....	32
II.5 Etude de la commande adaptative.....	33
II.5.1 Introduction.....	33
II.5.2 Rappel sur la théorie des systèmes asservis.....	33
II.5.3 Commande adaptative.....	34
II.5.4 Quelques approches de la commande.....	36
II.6 Conclusion.....	37

## Chapitre III : Applications et résultats de simulation

# SOMMAIRE

---

III.1	Introduction.....	39
III.2	Application de la logique floue sous Matlab.....	39
III.2.1	Structure de la commande floue.....	39
III.2.2	Conception d'un contrôleur flou.....	40
III.3	La Loi de commande proportionnelle dérivée avec compensation de l'effet de gravité (point à point).....	42
III.4	Résultats de simulation.....	44
III.5	Interprétation des résultats.....	45
III.6	la commande floue adaptative.....	46
III.6.1	Commande en poursuite de trajectoire.....	46
III.7	Résultats de simulation.....	47
III.8	Interprétation des résultats.....	49
III.9	La régulation.....	50
III.10	Résultats de simulation.....	51
III.11	Interprétation.....	54
III.12	Conclusion.....	54
	Conclusion générale	

# Introduction générale

---

## **Introduction Générale :**

Quand nous parlons de la robotique, plusieurs idées viennent à l'esprit de chacun de nous. Historiquement, nous pourrions nous référer aux premiers concepts et automates de l'antiquité ou aux premiers robots comme à des personnages de la mythologie. Même le mot robot a sa propre histoire. Séparer la science de la science-fiction n'est pas une chose aisée, surtout lorsque en robotique nous cherchons parfois à faire réalité la fiction. Un exemple de l'influence des fictions nous est donné par les lois de la robotique.

Les robots étaient conçus en respectant les contraintes imposées par le milieu industriel, comme la répétabilité, la précision dans la réalisation des tâches, le respect des cadences de production, etc. Prenons l'exemple des bras manipulateurs industriels des années 80 très semblables aux bras industriels actuels, ils se déplacent à très grandes vitesses sur des trajectoires calculées hors ligne dans des environnements protégés et structurés, sans interaction avec les opérateurs humains.

C'est avec les développements scientifiques, spécifiquement de l'électronique et de l'informatique mais aussi automatique, mathématique, mécanique, matériaux, que la technologie robotique a progressé. Les robots actuels sont dotés d'une « intelligence » qui leur donne une certaine autonomie qui va leur permettre de se diffuser dans de nouveaux domaines. [10]

L'objectif de notre travail consiste à commander un bras manipulateurs à deux degrés de liberté par un régulateur flou adaptatif.

La commande adaptative est un ensemble de techniques permettant de fournir une Approche systématique, dans le but d'achever ou de maintenir des performances désirées pour le système de commande lorsque la dynamique du procédé est inconnue et/ou change au cours du temps. Ce type de commande est aussi caractérisé par la présence d'une boucle d'identification en temps réel. [11]

Des études faites ont montré que dans une boucle de commande, l'homme réagit comme un régulateur robuste non linéaire dont les paramètres varient au cours du temps. Ainsi, les régulateurs flous peuvent être vus comme un cas de commande experte, elle-même caractérisée par l'utilisation d'un mécanisme représentatif des jugements de l'être humain. [2][18]

La théorie de la logique floue a été établie par L. Zadeh. Cette logique permet la représentation et le traitement de connaissances imprécises ou approximatives.

# Introduction générale

---

Le nombre d'applications basées sur la théorie de la logique floue a augmenté considérablement ces dernières années. Ceci est dû au fait que la logique floue est exprimée usuellement par des règles linguistiques de la forme Si-Alors ; elle est utilisée pour résoudre les problèmes de décisions en contrôle ou bien pour décrire le comportement dynamique d'un système inconnu ou mal défini. [21]

Une commande floue est caractérisée par :

- Son aptitude à appréhender des problèmes tels que les non linéarités et les retards
- La possibilité de prise en compte d'objectifs contradictoires
- L'utilisation du savoir d'un expert sur la façon de piloter le système et donc la

Suppression de la procédure de modélisation mathématique du processus à commander.

Le contexte de notre mémoire est d'appliquer la commande adaptative utilisant la logique floue pour commander certains types de systèmes robotiques (bras manipulateur à 2.d.d.1).

Pour atteindre notre objectif, il fallait diviser notre travail en trois chapitres :

Dans le premier chapitre : aura pour objet une étude sur les robots et leurs modélisations

Le second chapitre : se résumera la logique floue, où nous présentons toutes les notions et les définitions nécessaires pour comprendre cette théorie. On donne des généralités et des notions de la commande adaptative d'une manière générale.

Dans le chapitre qui suit : sera consacré à l'étude de la commande adaptative à base de logique floue, Application et résultats de simulations.

Enfin, nous terminons par une conclusion, présentant le bilan de ce travail, ainsi que les Perspectives envisagées.

### I.1 Introduction :

Pour concevoir, simuler et commander un robot, il est nécessaire, entre autres, de disposer de certains modèles mathématiques du mécanisme. Plusieurs niveaux de modélisation sont possibles, qui dépendent des spécifications du cahier des charges de l'application envisagée, tel que :

Les modèles géométriques direct et inverse qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction de la configuration du mécanisme et inversement ; ces derniers nécessitent le passage par la description de la structure géométrique du robot et ensuite par les modèles de transformation entre l'espace opérationnel (dans lequel est définie la situation de l'organe terminale) et l'espace articulaire (dans lequel est définie la configuration du robot).

Le modèle dynamique définit 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.

Dans ce chapitre vont être exposés les trois types de modélisation cités, en débutant chacune par un petit rappel théorique.

Mais dans un premier temps nous allons donner quelques éléments de description géométrique des robots.

### I.2 Généralité sur le robot :

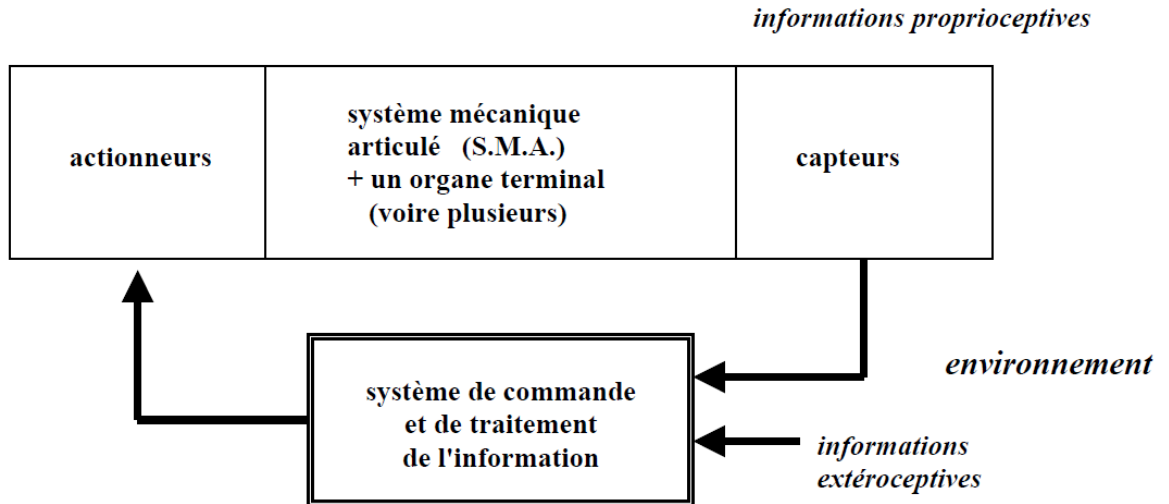
#### I.2.1 Constituants mécaniques d'un robot : [14]

Un robot manipulateur est constitué par deux sous-ensembles distincts, un (ou plusieurs) organe terminal et une structure mécanique articulée, comme le montre la figure suivante :



**Figure I.1** image réelle d'un robot manipulateur du type SCARA

ON DISTINGUE CLASSIQUEMENT 04 PARTIES PRINCIPALES DANS UN ROBOT MANIPULATEUR : [14]



**Figure I.2** : les 04 parties principales dans un robot manipulateur

### I.2.1.1 Organe terminal :

Sous le terme organe terminal, on regroupe tout dispositif destiné à manipuler des objets (dispositifs de serrage, dispositifs magnétiques, à dépression, ...), ou à les transformer (outils, torche de soudage, pistolet de peinture, ...). En d'autres termes, il s'agit d'une interface permettant au robot d'interagir avec son environnement. Un organe terminal peut être multifonctionnel, au sens où il peut être équipé de plusieurs dispositifs ayant des fonctionnalités différentes. Il peut aussi être monofonctionnel, mais interchangeable. Un robot, enfin, peut-être multi-bras, chacun des bras portant un organe terminal différent. On utilisera indifféremment le terme organe terminal, préhenseur, outil ou effecteur pour nommer le dispositif d'interaction fixé à l'extrémité mobile de la structure mécanique [14].

### I.2.1.2 Système mécanique articulé :

Le système mécanique articulé (S.M.A.) est un mécanisme ayant une structure plus ou moins proche de celle du bras humain. Il permet de remplacer, ou de prolonger, son action (le terme "manipulateur" exclut implicitement les robots mobiles autonomes). Son rôle est d'amener l'organe terminal dans une situation (position et orientation) donnée, selon des caractéristiques de vitesse et d'accélération données. Son architecture est une chaîne cinématique de corps, généralement rigides (ou supposés comme tels), assemblés par des liaisons appelées articulations. Sa motorisation est réalisée par des actionneurs électriques, pneumatiques ou

hydrauliques qui transmettent leurs mouvements aux articulations par des systèmes appropriés [14].

### **I.2.1.3 Articulations :**

Une articulation lie deux corps successifs, en limitant le nombre de degré de liberté de l'un par rapport à l'autre. Soit  $m$  le nombre de degré de liberté résultant, encore appelé mobilité de l'articulation. la mobilité est telle que  $0 \leq m \leq 6$ .

Lorsque  $m = 1$ , ce qui est le cas le plus fréquent en robotique, l'articulation est dite simple : soit rotoïde, soit prismatique [14].

#### **a-Articulation rotoïde :**

Il s'agit d'une articulation de type pivot, notée R, réduisant le mouvement entre deux corps à une rotation autour d'un axe qui leur est commun. La situation relative entre les deux corps est donnée par l'angle autour de cet axe [14].

#### **b-Articulation prismatique :**

Il s'agit d'une articulation de type glissière, notée P réduisant le mouvement entre deux corps à une translation le long d'un axe commun. La situation relative entre les deux corps est mesurée par la distance le long de cet axe.

On peut constituer des liaisons de mobilité supérieure à 1, en combinant des articulations simples. Une rotule par exemple est obtenue avec trois articulations rotoïdes dont les axes sont concourants [14].

### **I 2.1.4 actionneurs :**

C'est l'organe qui anime la structure mécanique par la conversion de l'énergie source en énergie mécanique. On dispose de deux types d'actionneurs [14] :

#### **a-Actionneurs électriques :**

Essentiellement des moteurs, leurs types diffèrent suivant le domaine d'utilisation, on trouve les moteurs à courant continu, moteurs pas à pas, hybrides, synchrones etc. [14]

#### **b-actionneurs pneumatiques et hydrauliques :**

Le transfert de l'énergie est réalisé par des vérins linéaires, angulaires, rotatifs, simple effet, double effet, etc. [14]

### **I.2.1.5 capteurs :**

Ils traduisent le phénomène physique caractérisant l'environnement en un signal électrique exploitable. Le robot peut être équipé par différents capteurs [14] :

Capteurs internes ou proprioceptifs.

Capteurs externes ou extéroceptifs.

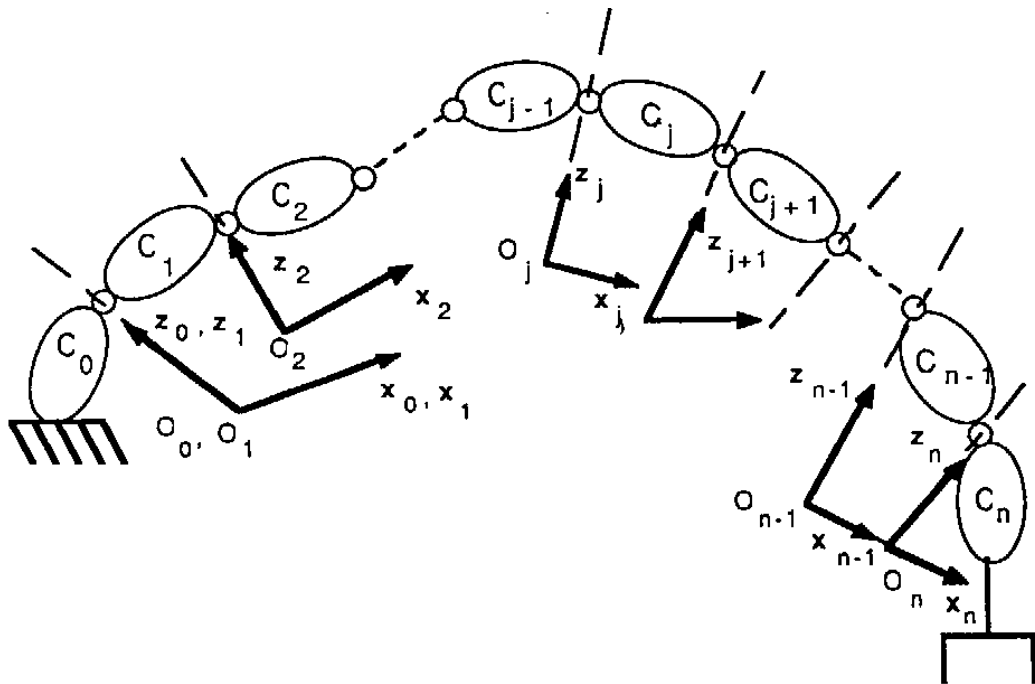
## I.3 Modélisation des robots :

### I.3.1 Structure géométrique des robots [19] :

Avant d'entrer dans le vif du sujet (modélisation), un passage en revue des principales conventions et notations utilisées en modélisation s'impose.

On considère qu'un robot est composé de  $n+1$  corps, notés  $C_0, \dots, C_n$ , et donc de  $n$  articulations.

Le corps  $C_0$  désigne la base et le corps  $C_n$  le corps qui porte l'organe terminal. L'articulation  $j$  connecte le corps  $C_j$  au corps  $C_{j-1}$  (figure I.3).



**Figure I.3 :** Structure géométrique d'un robot à chaîne cinématique ouverte

La variable de l'articulation  $j$  est notée  $q_j$  ;

Le corps  $j$  est noté  $C_j$  ;

Les corps sont supposés parfaitement rigides. Ils sont connectés par des articulations considérées comme idéales (pas de jeu mécanique, pas d'élasticité) ;

Le repère  $R_j$  est lié au corps  $C_j$  ;

L'axe  $Z_j$  du repère  $R_j$  est porté par l'articulation  $d_j$  ;

Les paramètres qui permettent de définir  $R_j$  par rapport au repère précédent sont indicés ( $j$ ) ;

Le repère  $R_j$ , fixé au corps  $C_j$ , est défini de telle sorte que :

L'axe  $Z_j$  est porté par l'axe de l'articulation  $j$ ,

l'axe  $X_J$  est porté par la perpendiculaire commune aux axes  $Z_J$  et  $Z_{J+1}$ . Si les axes  $Z_J$  et  $Z_{J+1}$  sont parallèles ou colinéaires,

Le choix de  $X_J$  n'est pas unique :

Des conditions de symétrie ou de simplicité permettent alors un choix rationnel.

### I.3.2 Modèles géométriques :

#### I.3.2.1 Modélisation géométrique directe :

On peut dire que la modélisation géométrique directe est l'ensemble des relations qui permettent d'exprimer la situation de l'organe terminal du robot en fonction de ses coordonnées articulaires (ou coordonnées opérationnelles en fonction des coordonnées généralisées), ces relations sont décrites par la fonction suivante :

$$X_i = F(q_i) \quad (I.1)$$

♦ La situation de l'organe terminal est définie par 'n' coordonnées :

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T. \quad (I.2)$$

♦ Les variables articulaires sont définies par :  $\theta_i = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m]^T$  (I.3)

Donc le modèle géométrique direct définit les coordonnées de l'organe terminal dans l'espace opérationnel en fonction des variables articulaires du robot ( $q_i$ ).

Ceci se fait en définissant un repère fixe généralement à la base du robot ( $R_0$ ) et un autre au bout de l'organe terminal ( $R_n$ ), et de calculer la matrice de passage entre  $R_0$  et  $R_n$  en suivant les étapes décrites dans la section précédente.

#### a-Principe de Denavit Hatenberg :

Le passage de  $R_{J-1}$  à  $R_J$  s'exprime en fonction des quatre paramètres suivants :

$\alpha_J$  : angle entre les axes  $Z_{J-1}$  et  $Z_J$ , correspondant à une rotation autour de  $X_{J-1}$ .

$d_J$  : distance entre  $Z_{J-1}$  et  $Z_J$ , le long de  $X_{J-1}$ .

$\theta_J$  : angle entre les axes  $X_{J-1}$  et  $X_J$ , correspondant à une rotation autour de  $Z_{J-1}$ .

$r_J$  : distance entre  $X_{J-1}$  et  $X_J$ , le long de  $Z_{J-1}$ .

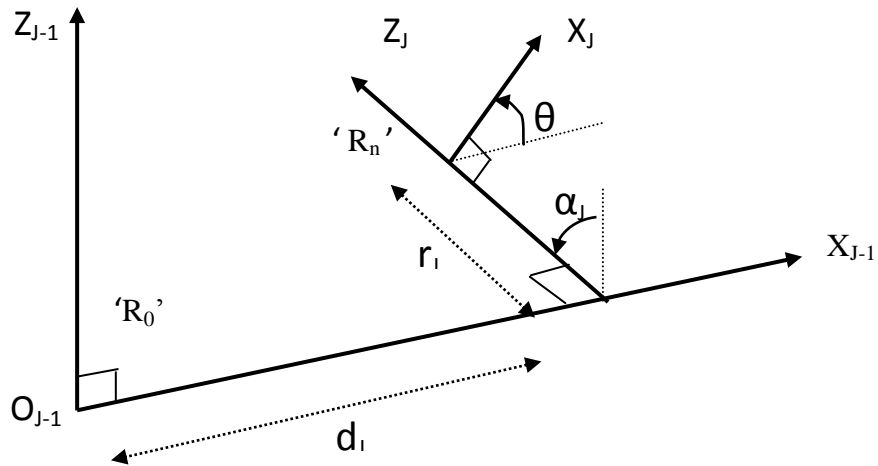


Figure I.4 Paramètres géométriques dans le cas d'une structure ouverte simple

La variable articulaire  $q_j$  associée à la  $j^{\text{ème}}$  articulation est  $\theta_j$ .

La matrice de transformation homogène définissant le repère  $R_j$  dans le repère  $R_{j-1}$  est donnée par :

$${}^{j-1}T_j = \text{Rot}(x, \alpha_j) * \text{Trans}(x, d_j) * \text{Rot}(z, \theta_j) * \text{Trans}(z, r_j) \quad (\text{I.4})$$

Avec :

Rot : rotation

Trans : translation

$${}^{j-1}T_j = \begin{bmatrix} C\theta_j & -S\theta_j & 0 & d_j \\ C\alpha_j S\theta_j & C\alpha_j C\theta_j & -S\alpha_j & r_j S\alpha_j \\ S\alpha_j S\theta_j & S\alpha_j C\theta_j & C\alpha_j & r_j C\alpha_j \end{bmatrix}$$

I.3.2.1.1 Calcul du modèle géométrique direct du PUMA 762 :

La figure ci-dessous est la représentation géométrique du robot PUMA 762

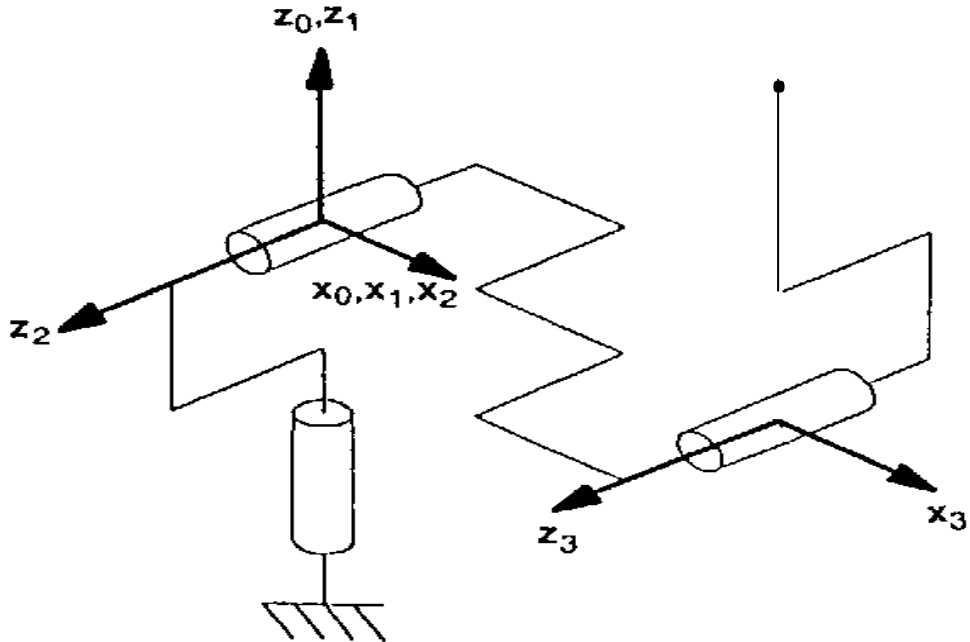


Figure I.5 Structure du robot et placement des repères

Ce qui donne le tableau des paramètres géométriques du robot

$i$	1	2	3	4
$\sigma_i$	0	0	0	0
$\alpha_{i-1}$	0°	+90°	0°	+90°
$a_{i-1}$	0	0	a2	0
$\theta_i$	q1	q2	q3	q4
$r_i$	r1	r2	r3	r4

Tableau I.1 paramètres de ' DENAVIT-HARTENBERG ' pour le PUMA 762

Et les matrices de transformations élémentaires  ${}^{i-1}T_i$  :

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & 0 \\ S\theta_1 & C\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -r_2 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & a_2 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r_3 \end{bmatrix}$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r_4 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Après la multiplication des matrices des transformations élémentaires, nous obtenons la matrice finale ( ${}^0T_4$ ) qui exprime **le modèle géométrique direct**

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} C_1C_{2+3} & -C_1S_{2+3} & S_1 & -C_1S_{2+3}r_4 + C_1C_2a_2 + S_1(r_3+r_2) \\ S_1C_{2+3} & -S_1S_{2+3} & -C_1 & -C_1S_{2+3}r_4 + C_1C_2a_2 - C_1(r_3+r_2) \\ S_{2+3} & C_{2+3} & 0 & C_{2+3}r_4 + S_2a_2 + r_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

**Remarque :**

Pour la matrice  ${}^3T_4$ , on a considéré que le repère du quatrième corps est fixe par rapport au repère du 3<sup>ème</sup> corps, et se trouve à une distance  $r_4$  le long de  $Z_4$  par rapport au troisième repère.

**I.3.2.2 Modélisation géométrique inverse :**

Elle consiste à calculer les variables articulaires en fonction des coordonnées opérationnelles qui spécifient la position de l'organe terminal ; c'est le modèle dont on a le plus besoin pour le déplacement de l'organe terminal.

Nous décrivons le modèle géométrique inverse par la fonction inverse du modèle géométrique direct :

$$X_i = \text{Fct}^{-1}(q_i) \tag{I.5}$$

**I.3.2.2.1 Méthode de calcul du modèle géométrique inverse :**

Considérons la matrice de passage homogène qui a pour expression :

$${}^0T_n = {}^0T_1 {}^1T_2 \dots {}^{n-1}T_n \tag{I.6}$$

On note :

$$U_0 = {}^0T_1 {}^1T_2 \dots {}^{n-2}T_{n-1} {}^{n-1}T_n \tag{I.7}$$

Et :

$$U_0 = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matrice  $U_0$  est une donnée du problème : elle correspond à la situation désirée de l'organe terminal (Elle correspond à la matrice qui exprime le modèle géométrique direct).

Nous avons utilisé la méthode de Paul qui consiste à pré multiplier successivement les deux membres de l'équation par les matrices  ${}^jT_{j-1}$ , pour  $j$  variant de 1 à  $n-1$ , opérations qui permettent d'isoler et d'identifier l'une après l'autre les variables articulaires que l'on recherche.

Pour un robot à  $n$  degrés de liberté, on procède comme suit :

- La multiplication à gauche par  ${}^1T_0$ , ce qui donne :

$${}^1T_0 U_0 = {}^1T_2 {}^2T_3 \dots {}^{n-2}T_{n-1} {}^{n-1}T_n \tag{I.8}$$

Puisque chaque matrice  ${}^{n-1}T_n$  est fonction des variables  $q_n$ , le terme de droite est fonction des variables  $q_2, \dots, q_{n-1}, q_n$ . terme déjà calculé lors de l'établissement du modèle géométrique direct. Le terme de gauche n'est fonction que des éléments de  $U_0$  et du terme  $q_1$ .

- $q_1$  est alors obtenu par identification d'un ou de deux éléments, parmi les plus simples qui constituent l'expression de droite, avec les termes correspondant de gauche.
- Partant de l'expression (I.8), on pré multiplie par  ${}^2T_1$  et on réitère le même processus. La succession des équations permettant le calcul de tous les  $q_j$  est la suivante :

$$\left. \begin{aligned}
 U_0 &= {}^0T_1 {}^1T_2 \dots {}^{n-2}T_{n-1} {}^{n-1}T_n \\
 {}^1T_0 U_0 &= {}^1T_2 {}^2T_3 \dots {}^{n-2}T_{n-1} {}^{n-1}T_n \\
 {}^2T_1 U_0 &= {}^2T_3 {}^3T_4 \dots {}^{n-2}T_{n-1} {}^{n-1}T_n \\
 \cdot &\quad \cdot \quad \cdot \\
 \cdot &\quad \cdot \quad \cdot \\
 {}^{n-2}T_{n-1} U_0 &= {}^{n-1}T_n
 \end{aligned} \right\} \quad (I.9)$$

$$\text{Avec } U_j = {}^jT_{j-1} U_{j-1} \quad (I.10)$$

Après ces étapes on parvient à trouver des expressions relativement complexes reliant les variables articulaires aux coordonnées désirées, cependant l'utilisation de la méthode de Paul sur un grand nombre d'exemples de robots industriels a permis de constater que les principaux types rencontrés sont peu nombreux,

Trouver ces équations et leurs solutions ne veut pas dire résoudre, car d'après la configuration finale de l'organe terminal on se trouve confronté à 3 cas :

1. Absence de solutions lorsque la position se trouve en dehors de l'espace de travail du robot.
2. Une infinité de solutions.
3. Un nombre fini de solutions.

C'est dans ce dernier cas que le robot est dit résoluble.

### **I.3.2.2.2 Calcul du modèle géométrique inverse du PUMA 762 :**

Pour notre robot (PUMA762) on a fait abstraction de l'orientation de l'organe terminal, ce qui revient à dire que la matrice  $U_0$  se réduit à un vecteur  $V_0 [P_x P_y P_z 1]^T$

Ainsi la méthode de Paul citée ci-dessus devenait des prés multiplications des matrices  ${}^{n-1}T_n$  avec le vecteur  $V_0$  à la place de la matrice  $U_0$ .

En identifiant les expressions trouvées avec les types cités, nous obtenons des expressions qui sont en annexe 1.

Lors du calcul du modèle géométrique inverse plusieurs solutions sont possibles :

Deux solutions pour la première articulation ;

Deux solutions pour la seconde pour chaque solution de la première ;

Une solution unique pour la troisième articulation ;

Ce qui donne quatre solutions pour une configuration donnée, donc ce calcul implique le choix d'une solution parmi celles offertes ;

Nous avons essayé d'être intuitifs lors de ce choix, la solution choisie dépend essentiellement de la position courante, car de quelque bout qu'on le prenne le problème consiste à déplacer le robot d'une configuration à une autre, donc de partir d'une position initiale vers une position finale.

Partant de ces considérations à priori nous avons adopté l'algorithme suivant :

calcul des deux valeurs possibles de première variable articulaire :  $\theta_{11}, \theta_{12}$  ;

si  $\text{abs}(\theta_{1\_courante} - \theta_{11}) < \text{abs}(\theta_{1\_courante} - \theta_{12})$  alors  $\theta_1 = \theta_{11}$  ;

Sinon  $\theta_1 = \theta_{12}$  ;

calcul des deux valeurs de  $\theta_2$  :  $\theta_{21}, \theta_{22}$  ;

si  $\text{abs}(\theta_{2\_courante} - \theta_{21}) < \text{abs}(\theta_{2\_courante} - \theta_{22})$  alors  $\theta_2 = \theta_{21}$  ;

Sinon  $\theta_2 = \theta_{22}$  ;

calcul de  $\theta_3$  ;

### I 3.3 Modélisation cinématique :

Dans le modèle géométrique on prend en considération seulement la position l'orientation des corps et de l'organe terminal, dans le modèle cinématique, Il y a apparition des vitesses, celles de l'organe terminal et des actionneurs.

#### I.3.3.1 Modèle cinématique direct :

En dérivant les équations du modèle géométrique direct par rapport au temps, on obtient le modèle cinématique direct suivant[1] :

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\partial F}{\partial q} \frac{dq}{dt} \quad (\text{I.11})$$

$\frac{dX}{dt} = \dot{X}$ : Vecteur de position et d'orientation de l'organe terminal.

$\frac{\partial F}{\partial q} = J(q)$  : matrice jacobéenne.

$\frac{dq}{dt} = \dot{q}$  : vecteur de vitesse généralisée (vitesse des actionneurs)

#### I.3.3.2 Modèle cinématique inverse :

Le modèle cinématique inverse nous permet l'obtention des vitesses qu'il faut appliquer aux actionneurs en fonction des vitesses désirées pour l'organe terminal dans l'espace de la tâche, il est donné sous la forme suivante :

$$\dot{q} = J^{-1}(q)\dot{X} \quad (\text{I.12})$$

### I.3.4 Modélisation dynamique[4] :

Les modèles dynamiques des bras manipulateurs sont décrits par un ensemble d'équations mathématiques qui portent des informations dynamiques de ces robots. Peuvent être simulés sur un ordinateur dans le but de synthétiser une commande conditionnée par des performances désirées. L'ensemble des équations dynamiques peut être déterminé par des lois mécaniques classiques Newtoniennes et Lagrangiennes. Les approches d'Euler Lagrange et Newton-Euler permettent d'aboutir aux équations du mouvement des robots.

Dans la modélisation dynamique on constate deux modèles :

#### I.3.4.1 Le modèle dynamique inverse :

Le modèle dynamique inverse est représenté par la relation de la forme

$$\tau = \mathbf{G}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, \mathbf{f}_{ext})$$

#### I.3.4.2 Le modèle dynamique direct :

Le modèle dynamique direct est représenté par la relation de la forme

$$\mathbf{q} = \mathbf{G}(\mathbf{q}, \ddot{\mathbf{q}}, \tau, \mathbf{f}_{ext})$$

La méthode la plus utilisées et la plus à manipuler, est constituée par les **équations de Lagrange\_ Euler**.

##### I.3.4.2.1 Formalisme de Lagrange \_ Euler :

Le formalisme **d'Euler-Lagrange** et la transformation homogène de **Denavit et Hartenberg** amènent à un algorithme consiste à présenter les équations dynamiques du mouvement. L'approche d'Euler-Lagrange sert à modéliser et à présenter la dynamique des robots à travers les équations du mouvement. L'approche d'Euler-Lagrange est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{q}_i} = \tau_i \quad (\text{I.13})$$

Avec  $E_D$  est l'énergie de dissipation en cas de présence de frottement visqueux,  $T_i$  est la force où le couple généralisé à la  $i^{\text{ème}}$  articulation,  $n$  est le nombre de degré de liberté,  $q_i$  est la coordonnée généralisée de l'articulation  $i$ ,  $\dot{q}_i$  est la dérivée de la coordonnée généralisée et  $L$  est le Lagrangien exprimé par l'équation suivante :

$$\mathbf{L} = \mathbf{E}_c - \mathbf{E}_p \quad (\text{I.14})$$

Avec :

$\mathbf{E}_c$  : L'énergie cinétique.

$\mathbf{E}_p$  : L'énergie potentielle.

I.3.4.2.2 Modélisation dynamique d'un bras manipulateur à 2d.d.l :

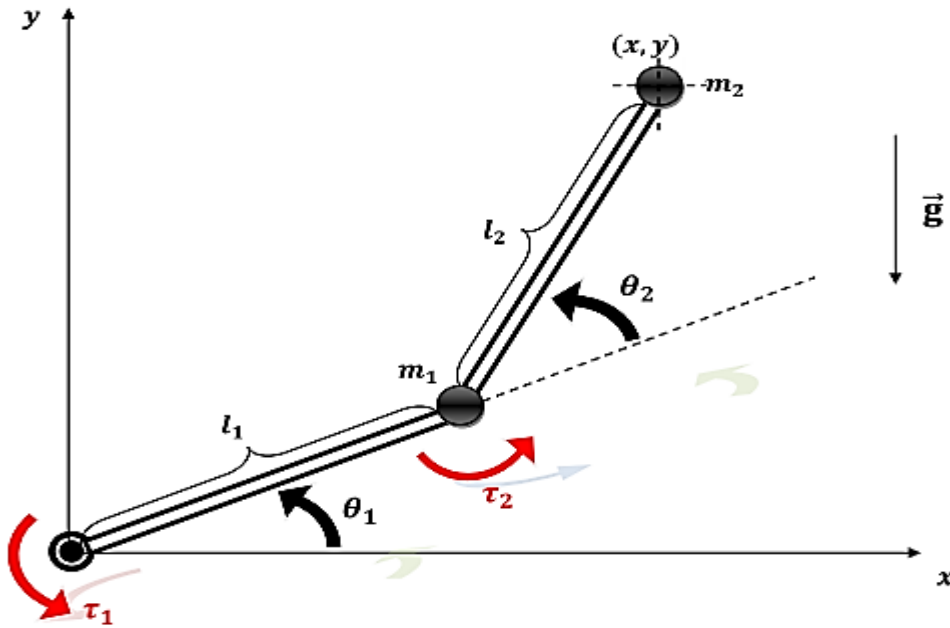


Figure I.6 Robot manipulateur à 2 d.d.l.

- $\theta_i$  L'angle adjoint à chaque bras avec l'axe des abscisses.
- $m_i$  La masse située au centre de gravité de chaque bras.
- $l_i$  Longueur du bras.
- $\tau_i$  le couple.
- $\vec{g}$  La force de gravité.

On admettra que les masses des tiges composant le robot sont concentrées en leurs extrémités. Le robot manipulateur est commandé en couple  $\tau_1$  et  $\tau_2$  fournis par les actionneurs dont on négligera l'étude dynamique.

Les coordonnées cartésiennes sont :

$$1^{\text{ere}} \text{ extrémité : } \begin{cases} x_1 = l_1 \cos \theta_1 \\ y_1 = l_1 \sin \theta_1 \end{cases} \quad 2^{\text{eme}} \text{ extrémité : } \begin{cases} x_2 = x_1 + l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) \\ y_2 = y_1 + l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) \end{cases}$$

Le modèle dynamique est donné comme suit:

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \tag{I.15}$$

Avec :

- **Matrice d'inertie  $M(q)$**   
 $M(q)$  est symétrique définie positive.
- **Vecteur de forces centripètes / Coriolis  $V(q, \dot{q})$**   
 $V(q, \dot{q})$  est quadratique en  $\dot{q}$ .  
 $V(q, \dot{q}) = V_m(q, \dot{q})\dot{q}$

Dans  $V_m(q, \dot{q})$ , les termes impliquant un produit  $q_i^2$  sont appelés centrifuges impliquant un produit  $q_i q_j$  avec  $i \neq j$  sont les termes de Coriolis.

- **Vecteur de gravité  $G(q)$**

$$\|G(q)\| \leq g_b$$

$g_b$ : Étant une fonction scalaire constante.

- **Equation du mouvement Lagrange [6]**

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad (I.16)$$

$q_i$  :  $i^{\text{ème}}$  coordonnée généralisée

$\tau_i$  : Force généralisée appliquée au  $i^{\text{ème}}$  élément du système. Elle représente un couple si l'articulation est rotoïde, et une force si l'articulation est prismatique.

Le Lagrangien  $L$  du système étant la différence entre l'énergie cinétique et potentielle.

$$L = E_c - E_p \quad (I.17)$$

- **Energie cinétique**

L'énergie cinétique du bras manipulateur à 2ddl (figure I.6) est donnée comme suit :

$$E_c = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 \quad (I.18)$$

- **Energie potentielle**

La seule source d'énergie potentielle est la gravitation. L'axe des abscisses sera pris comme origine des énergies potentielles gravitationnelles. L'énergie potentielle du bras manipulateur à 2ddl (figure I.6) est donnée comme suit :

$$E_p = (m_1 + m_2) g l_1 \sin \theta_1 + m_2 g l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (I.19)$$

- **Lagrangien du système**

$L =$

$$\frac{1}{2} (m_1 + m_2) l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 - [(m_1 + m_2) g l_1 \sin \theta_1 + m_2 g l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] \quad (I.20)$$

L'application de formalisme de Lagrange sur le système amène à l'équation suivante :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_1} = \tau_1 \\ \frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_2} = \tau_2 \end{cases} \quad (I.21)$$

La dynamique du robot manipulateur est donnée sous la forme l'équation différentielle non linéaire suivantes : [6]

- $\tau_1 =$   

$$[(m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2 \cos \theta_2]\ddot{\theta}_1 + [m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos \theta_2]\ddot{\theta}_2 - m_2l_1l_2\dot{\theta}_2(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 + (m_1 + m_2)gl_1 \cos \theta_1 + m_2gl_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (I.22)$$

- $\tau_2 =$   

$$[m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos \theta_2]\ddot{\theta}_1 + [m_2l_2^2]\ddot{\theta}_2 + m_2l_1l_2\dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 + m_2gl_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (I.23)$$

En réécrivant les équations du système sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2 \cos \theta_2 & m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos \theta_2 \\ m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos \theta_2 & m_2l_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -m_2l_1l_2\dot{\theta}_2(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 \\ m_2l_1l_2\dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)gl_1 \cos \theta_1 + m_2gl_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ m_2gl_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (I.24)$$

On identifie les différents termes :

$$M(q) = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2 \cos \theta_2 & m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos \theta_2 \\ m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos \theta_2 & m_2l_2^2 \end{bmatrix} \quad (I.25)$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_2l_1l_2\dot{\theta}_2(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 \\ m_2l_1l_2\dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} \quad (I.26)$$

$$V_m(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -2m_2l_1l_2\dot{\theta}_1 \sin \theta_2 & -m_2l_1l_2\dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\ m_2l_1l_2\dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (I.27)$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)gl_1 \cos \theta_1 + m_2gl_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ m_2gl_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (I.28)$$

### Remarque :

Si en fait la modélisation de ce robot en compte des perturbations le modèle dynamique de ce robot est donné par l'équation matricielle suivante :

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) + T_d = \tau \quad (I.29)$$

$T_d$  ; Perturbation .

### I.4 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes structures et les modèles des bras Manipulateurs, nous avons constaté d'après cette approche que l'extraction du modèle d'un Consiste à Savoir toute sa caractéristique géométrique et mécanique et nous avons vu aussi les deux méthodes essentielles pour obtenir le modèle dynamique des bras manipulateur, il s'agit de la méthode de Newton-Euler et de Lagrange.

Nous avons constaté durant ce chapitre que l'obtention de différents modèles n'est pas aisée, la difficulté variant selon la complexité de la cinématique de la chaîne articulée.

### II.1 Introduction :

L'avantage principal d'un régulateur flou par rapport à un régulateur traditionnel (Conventionnel) est que les régulateurs flous sont capables d'incorporer des informations Linguistiques floues fournies par un certain opérateur, ce qui n'est pas faisable par un régulateur conventionnel.

Dans ce chapitre nous allons essayer d'appliquer la théorie de la logique floue pour la commande adaptative d'un bras manipulateur.

### II.2 Logique floue et la commande floue :

La modélisation est devenue une issue importante dans l'ingénierie et la science. Les Approches traditionnelles de modélisation insistaient énormément sur la précision et la description exacte des systèmes. L'utilisation des outils mathématiques comme les équations différentielles, équations aux différences, fonctions de transfert, ...etc. est appropriée et justifiée pour les systèmes bien définis. Mais, quand la complexité augmente, ces outils deviennent moins efficaces. Le traitement des systèmes complexes nécessite souvent la manipulation d'informations vagues, imprécises, incertaines ou à la fois imprécises et incertaines. L'être humain est compétent dans la manipulation de tels systèmes de façon naturelle. Au lieu de raisonner en termes mathématiques, l'être humains décrit le comportement du système par des propositions linguistiques. Par exemple, un conducteur peut formuler une partie de sa connaissance par : " Si la vitesse est élevée et qu'il y a un virage, alors freiner ".

Afin de pouvoir représenter ce type d'informations, Zadeh a proposé de modéliser le mécanisme de la pensée humaine par un raisonnement approximatif basé sur des variables linguistiques. Il a introduit la théorie des sous-ensembles flous en 1965, qui constitue une interface entre les mondes linguistiques et numériques. Plus généralement, le terme de la logique floue correspond à tous les développements issus de la théorie des sous-ensembles flous.[22]

Comme application, la modélisation floue est le processus par lequel un système dynamique est modélisé non dans la forme conventionnelle des équations différentielles ou Aux différences, mais dans la forme d'un ensemble de règles floues et fonctions d'appartenance. C'est une approche permettant de modéliser des systèmes non linéaires complexes, de façon qualitative.

#### II.2.1 La logique floue:

La notion de logique floue permet d'étendre la notion de logique classique, associée aux variables booléennes ne prenant que deux valeurs 0 et 1. Il est alors possible d'associer à

des variables des coefficients d'appartenance à des sous-ensembles flous prenant des valeurs dans l'intervalle  $[0, 1]$ . Un événement certain pour la variable se traduira par un coefficient d'appartenance au sous-ensemble flou, c'est-à-dire à la propriété, égal à 1 alors que la valeur sera inférieure à 1 en présence d'incertitudes. Il vient alors qu'une valeur nulle pour un coefficient d'appartenance indique que la possibilité d'appartenance au sous-ensemble sélectionné de la variable représentant la grandeur concernée est complètement rejetée [5].

### II.2.2 Notion de sous-ensemble flou:

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

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

En logique floue, un sous-ensemble flou  $A$  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  $A$  [15].

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

### II.2.3 Univers de discours :

L'univers de discours représente l'ensemble de référence ou le domaine de variation de la variable linguistique, ou domaine de fonctionnement du processus dans le cas de réglage, comme illustré sur la figure (II.1) dont plusieurs sous-ensembles sont décrits par des fonctions d'appartenance (FA) triangulaires et trapézoïdales [16].

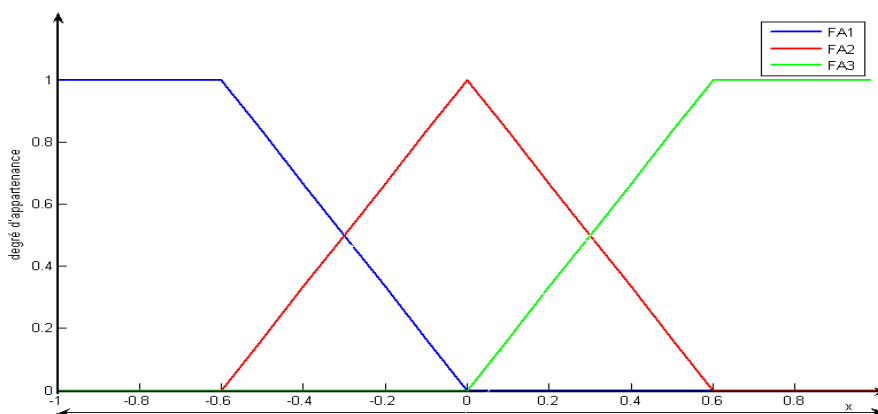


Figure II.1 : Univers de discours normalisé uniforme de 3 ensembles.

**II.2.4 Variable et valeur de variable linguistique :**

La variable linguistique représente un phénomène ou une grandeur, par des termes linguistiques : « quelque, beaucoup, souvent », « négative, environ zéro et positive » ce sont les valeurs linguistiques [16].

**II.2.5 Règles d'inférence :**

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

*Si condition 1 ET/OU condition 2 (ET/OU...) alors action sur les sorties OU*  
*Si condition 3 ET/OU condition 4 (ET/OU...) alors action sur les sorties OU*  
 ⋮  
*Si condition n ET/OU condition n+1 (ET/OU...) alors action sur les sorties.*

Ou par une matrice d'inférence sous forme d'un tableau donné ci-dessous [8].

U		Θ		
		N	EZ	P
dθ/dt	N	N	N	EZ
	EZ	N	EZ	P
	P	EZ	P	P

**Tableau II.1 : Règles d'inférence pour RLFT**

**II.2.6 Représentation des fonctions d'appartenance :**

On représente les variables linguistiques par leurs fonctions d'appartenances. Donc à chaque sous-ensemble flou  $A_i$  est associé une fonction d'appartenance  $\mu_{A_i}(x)$  où  $x$  est la variable linguistique. Tel que, à chaque point  $x$  est associé une valeur précise de  $\mu_{A_i}(x)$ , qui désigne, le degré d'appartenance de  $x$  à  $A_i$  [7].

La fonction d'appartenance peut être représentée par plusieurs formes : Triangulaire, trapézoïdale, sigmoïdale et gaussienne. On peut définir d'autres formes de fonctions d'appartenance, mais dans le réglage par logique floue, les formes déjà citées et illustrées sur la figure (II.2) sont largement suffisantes pour délimiter les ensembles flous [7].

**II.2.6.1 Fonction triangulaire :**

Elle est définie par trois paramètres  $\{a, b, c\}$ , qui déterminent les coordonnées des trois sommets [7].

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (\text{II.2})$$

**II.2.6.2 Fonction trapézoïdale :**

Elle est définie par quatre paramètres  $\{a, b, c, d\}$ , qui déterminent les coordonnées des quatre sommets.

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (\text{II.3})$$

**II.2.6.3 Fonction sigmoïde :**

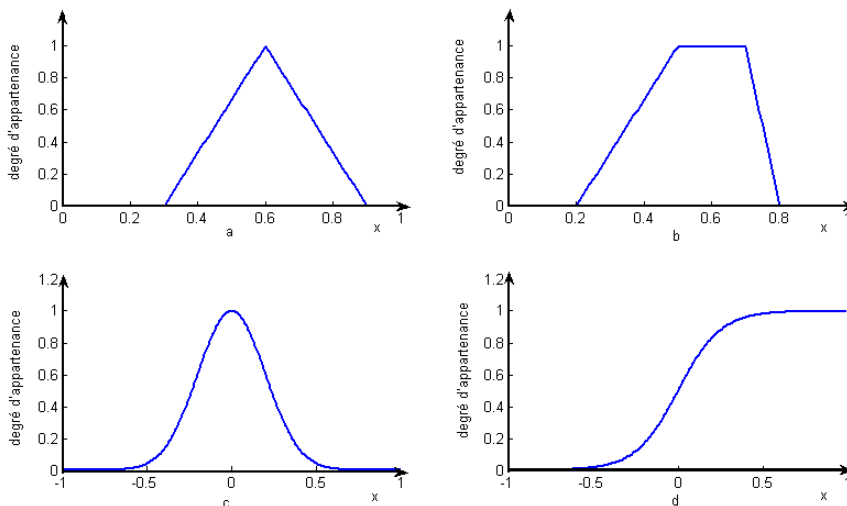
Elle est définie par deux paramètres  $\{a, b\}$ ,

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a(x - c))} \quad (\text{II.4})$$

**II.2.6.4 Fonction gaussienne :**

Elle est définie par deux paramètres  $\{\sigma, m\}$

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x - m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (\text{II.5})$$



**II.2.7 Opérat**

**Figure II.2 :** Formes des fonctions d'appartenance usuelles

Les opérations d'union, d'intersection et de complémententation dans les ensembles flous sont définies à l'aide de leurs fonctions d'appartenance [15].

**II.2.7.1 Egalité :**

$$A = B \Leftrightarrow \forall x \in U, f_A(x) = f_B(x). \tag{II.6}$$

**II.2.7.2 Inclusion:**

$$A \subset B \Leftrightarrow \forall x \in U, f_A(x) \leq f_B(x). \tag{II.7}$$

**II.2.7.3 La disjonction floue, 'OU' ou Union :**

La fonction d'appartenance (*Figure II.5*)  $\mu_{A \cup B}$  est définie, pour tout  $u \in U$ , par :

**Mamdani :** 
$$\mu_{A \cup B}(u) = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \tag{II.8}$$

**Sugeno :** 
$$\mu_{A \cup B}(u) = \mu_A(u) + \mu_B(u) - \mu_A(u) \cdot \mu_B(u) \tag{II.9}$$

**II.2.7.4 La conjonction floue, 'ET' ou intersection :**

La fonction d'appartenance *Figure (II.6)*  $\mu_{A \cap B}$  est définie, pour tout  $u \in U$ , par :

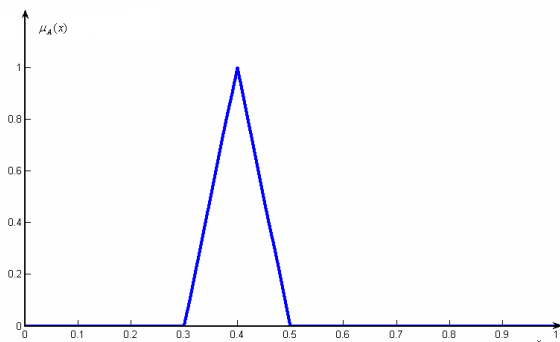
**Mamdani :** 
$$\mu_{A \cap B}(u) = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \tag{II.10}$$

**Sugeno :** 
$$\mu_{A \cap B}(u) = \mu_A(u) \cdot \mu_B(u) \tag{II.11}$$

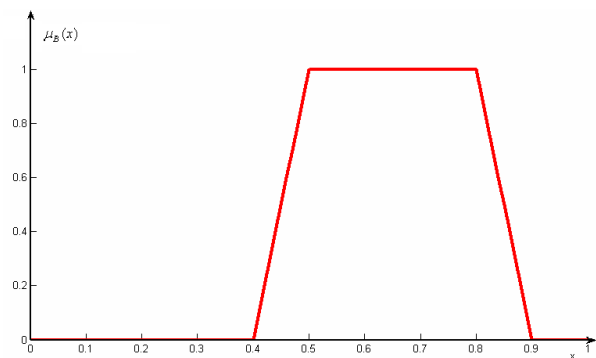
**II.2.7.5 La complémententation, négation ou inverse :**

La fonction d'appartenance *Figure (II.7)*  $\mu_{\bar{A}}$  du complément d'un ensemble  $A$  est définie, pour tout  $u \in U$ , dans les deux cas par :

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A(u) \tag{II.12}$$



**Figure II.3:** Fonction d'appartenance A



**Figure II.4:** Fonction d'appartenance B

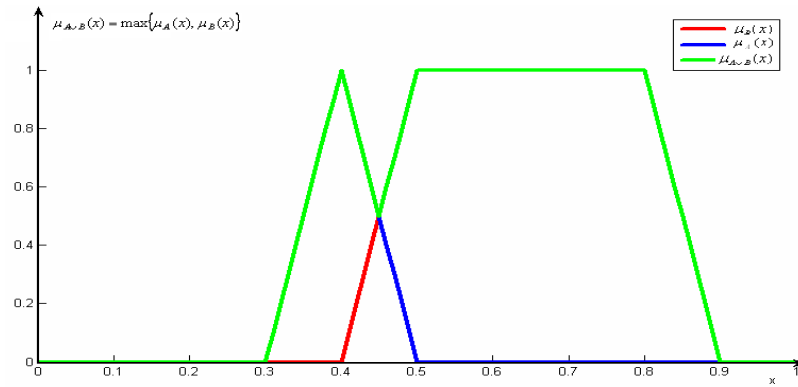


Figure II.5 : Fonction d'appartenance de l'union

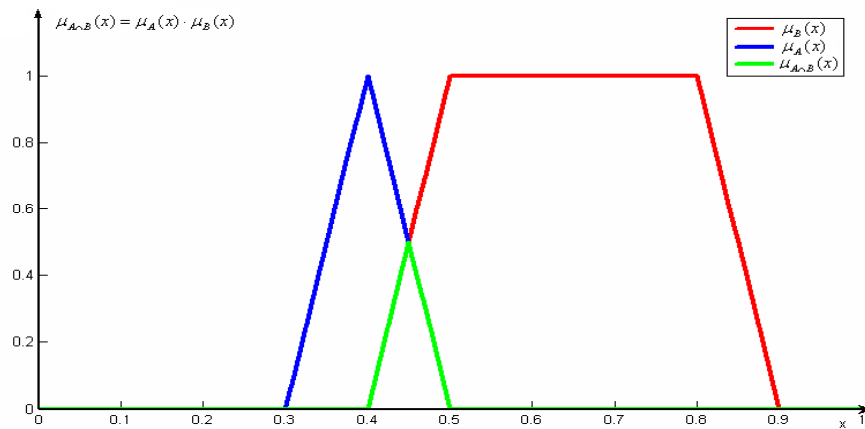


Figure II.6 : Fonction d'appartenance d'intersection

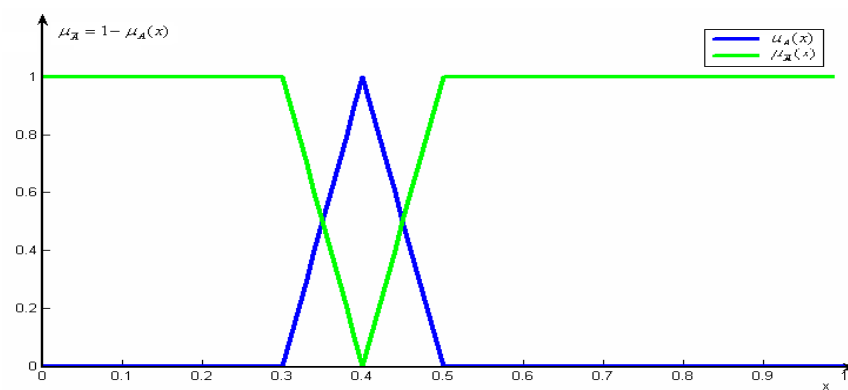


Figure II.7 : Operateur de complémentation de la fonction d'appartenance A

II.2.8 Configuration interne d'un système d'inférence flou (SIF) [20] :

Un système flou est un système à base de connaissances particulières, dont l'architecture de base est illustrée par la figure (II.8), se compose essentiellement de quatre modules.

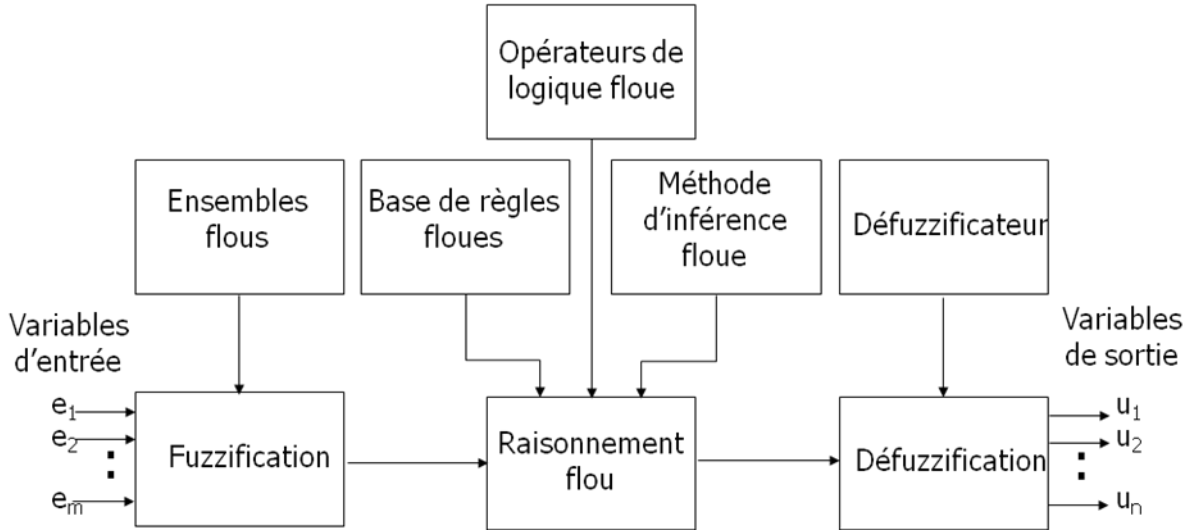


Figure II.8 : Architecture d'un contrôleur par logique floue

II.2.8.1 Fuzzification :

C'est le mécanisme réalisant l'interface " Numérique - Linguistique" qui permet de transformer une grandeur générée par un capteur à l'entrée en partie floue définie sur un espace de représentation lié à l'entrée. Du choix de cet espace de représentation (numérique ou linguistique) dépend la nature de la partie floue E résultante de la partie fuzzification. Cette dernière peut être un sous ensemble numérique (élément de  $F(X)$ ) ou un sous ensemble flou symbolique (élément  $F(L(X))$ ). On distingue alors deux types de fuzzification respectivement appelées fuzzification numérique et fuzzification symbolique [20].

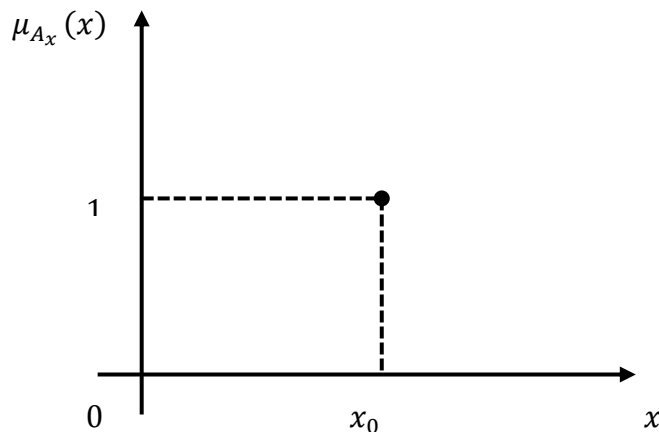


Figure II.9 : Méthode de fuzzification

**Fuzzification numérique :**

Une fuzzification numérique transforme toute valeur numérique  $x$  de l'entrée en valeur floue numérique, c'est-à-dire un élément de  $F(X)$ , en utilisant la Fuzzification singleton ou non singleton.

La fuzzification Singleton de la valeur  $x = x_0$  est la partie floue numérique  $N(x_0)$  dont la fonction d'appartenance est définie par [3]:

$$\mu_{N(x_0)}(x) = \begin{cases} 1 & \text{Si } x = x_0 \\ 0 & \text{Si } x \neq x_0 \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Dans la fuzzification non Singleton de la valeur  $x = x_0$ , la fonction d'appartenance de la partie floue numérique  $N(x_0)$  peut être définie par une fonction gaussienne.

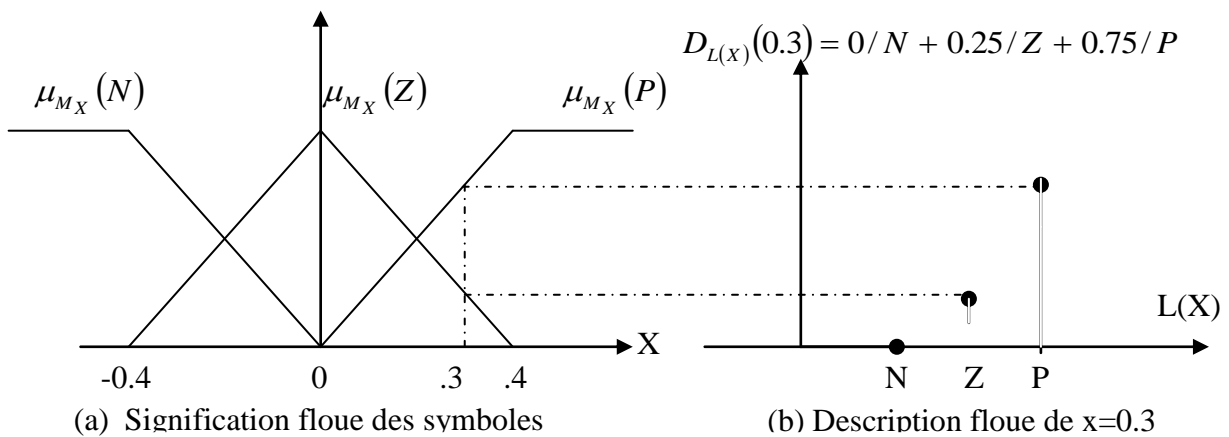
$$\mu_{N(x_0)}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - x_0}{\beta}\right)^2\right) \quad (\text{II.14})$$

Où  $\beta$  est paramètre qui caractérise la largeur de la fonction d'appartenance.

**Fuzzification Symbolique :**

Elle transforme toute valeur numérique  $x$  en une partie floue linguistique, c'est-à-dire un élément de  $F(L(X))$ . Cette partie floue permet de caractériser à quel point la valeur numérique peut être décrite par le symbole  $L(X)$ , en utilisant la description supérieure ou inférieure de l'entrée  $x$ , comme suit [17] :

Supposons que l'ensemble des symboles relatifs à l'entrée  $x$  soit défini par  $L(x) = \{N, Z, P\}$ , où  $N$ = Négative,  $Z$ = Zéro,  $P$ = Positive et que l'univers de discours associé  $X$ , soit défini par  $X = [-0.4, 0.4]$ . La signification floue des différents symboles est donnée par  $M_X$ . Ainsi, la figure suivante montre la description floue d'une entrée  $x = 0.3$ .



**Figure II.10:** Lien entre signification floue et description floue

### II.2.8.2 Base de règles floues :

C'est une base de connaissances qui contient les règles floues décrivant le comportement du système. L'ensemble des règles se présente sous la forme d'une énumération de type:

- Si condition 1 et/ou condition 2 (et/ou...) alors action sur les sorties
- Si condition 3 et/ou condition 4 (et/ou...) alors action sur les sorties
- Si condition 5 et/ou condition 6 (et/ou...) alors action sur les sorties

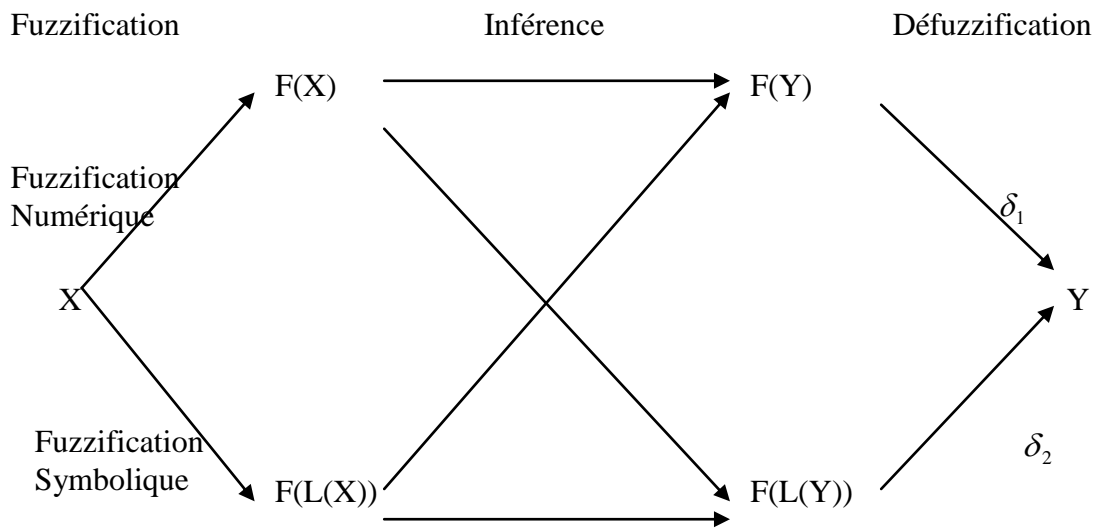
### II.2.8.3 Le moteur d'inférence flou :

Il transforme à l'aide des techniques de raisonnement flou, la partie floue issue de la fuzzification en une nouvelle partie floue, afin d'évaluer le degré de vérité d'une règle  $i$  à partir des fonctions d'appartenance liées à la prémisse et à la conclusion. L'agrégation des  $n$  règles s'effectue en combinant les différentes règles floues à l'aide de l'opérateur **Ou**. En effet, une telle énumération est comprise dans ce sens:

- Si condition 1 et/ou condition 2 ( et/ou...) alors action sur les sorties  
**ou**
- Si condition 3 et/ou condition 4 ( et/ou...) alors action sur les sorties  
**ou**
- Si condition 5 et/ou condition 6 ( et/ou...) alors action sur les sorties

### II.2.8.4 Défuzzification :

C'est une interface " Linguistique - Numérique" qui transforme la partie floue de l'inférence en valeurs numériques directement exploitables par le processus. Le résultat de l'inférence peut être soit une partie floue numérique, soit une partie floue symbolique. Afin de les transformer en une valeur numérique, on aura besoin de deux types de défuzzification: une défuzzification numérique  $\delta_1$ , et une défuzzification symbolique  $\delta_2$  [17].



**Figure II.11** : Défuzzification numérique et symbolique

**Défuzzification numérique :**

La méthode la plus couramment utilisée dite défuzzification par calcul centre de gravité dont l'énoncé est le suivant:

Soit  $F \in F(Y)$ , la partie floue numérique issue de l'inférence. La valeur numérique  $y^*$  produite par l'application de la méthode de centre de gravité est donnée par:

$$y^* = \delta_1(F) = \frac{\int_{y \in Y} \mu_F(y) \cdot y \cdot dy}{\int_{y \in Y} \mu_F(y) \cdot dy} \text{ si } Y \text{ est continue} \tag{II.15}$$

La valeur  $y^*$  produite par défuzzification  $\delta_1$  est définie comme étant la coordonnée  $y$  du centre de gravité (G) de la surface située sous  $\mu_F$  voir la figure (II.12). Cependant, son calcul est relativement complexe puisqu'il nécessite le calcul d'une intégrale, ou d'une somme pondérée dans le cas discret.

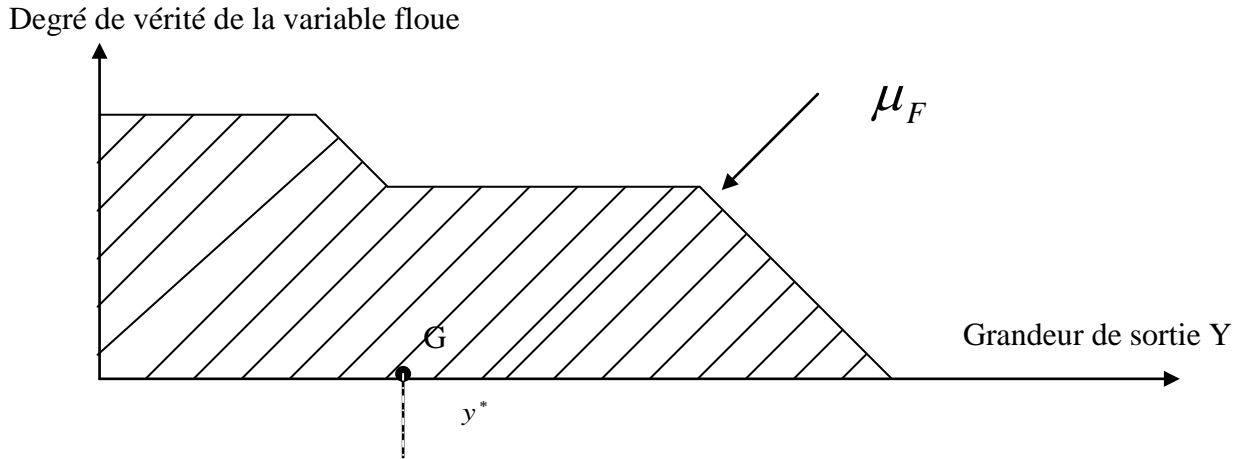


Figure II.12: Défuzzification par calcul du centre de gravité

➤ **Défuzzification symbolique :**

La défuzzification symbolique  $\delta_2$  dans la figure( III.11) transforme un sous ensemble flou symbolique en une valeur numérique, en considérant la défuzzification symbolique comme étant la composition de deux opérations  $\delta_3$  et  $\delta_1$ , c'est-à-dire  $\delta_2(F) = \delta_1(\delta_3(F))$  où  $\delta_1$  est la fonction de la défuzzification numérique et  $\delta_3$  est une fonction qui transforme un sous ensemble flou symbolique de  $F(L(Y))$  en un sous ensemble flou numérique de  $F(Y)$ , par application de la règle compositionnelle d'inférence

$$\forall y \in Y \quad \mu_{\delta_3(F)}(y) = \bigwedge_{L' \in L(Y)} T(\mu_F(L'), \mu_R(L', y)) \quad (\text{II.16})$$

**II.2.8.5 Les différents systèmes d'inférence floue : [12]**

Le système d'inférence flou est composé essentiellement de la base de règles, de la base de données (les paramètres des fonctions d'appartenance) et du raisonnement flou. Les types les plus courants sont représentés sur les deux figures suivantes:

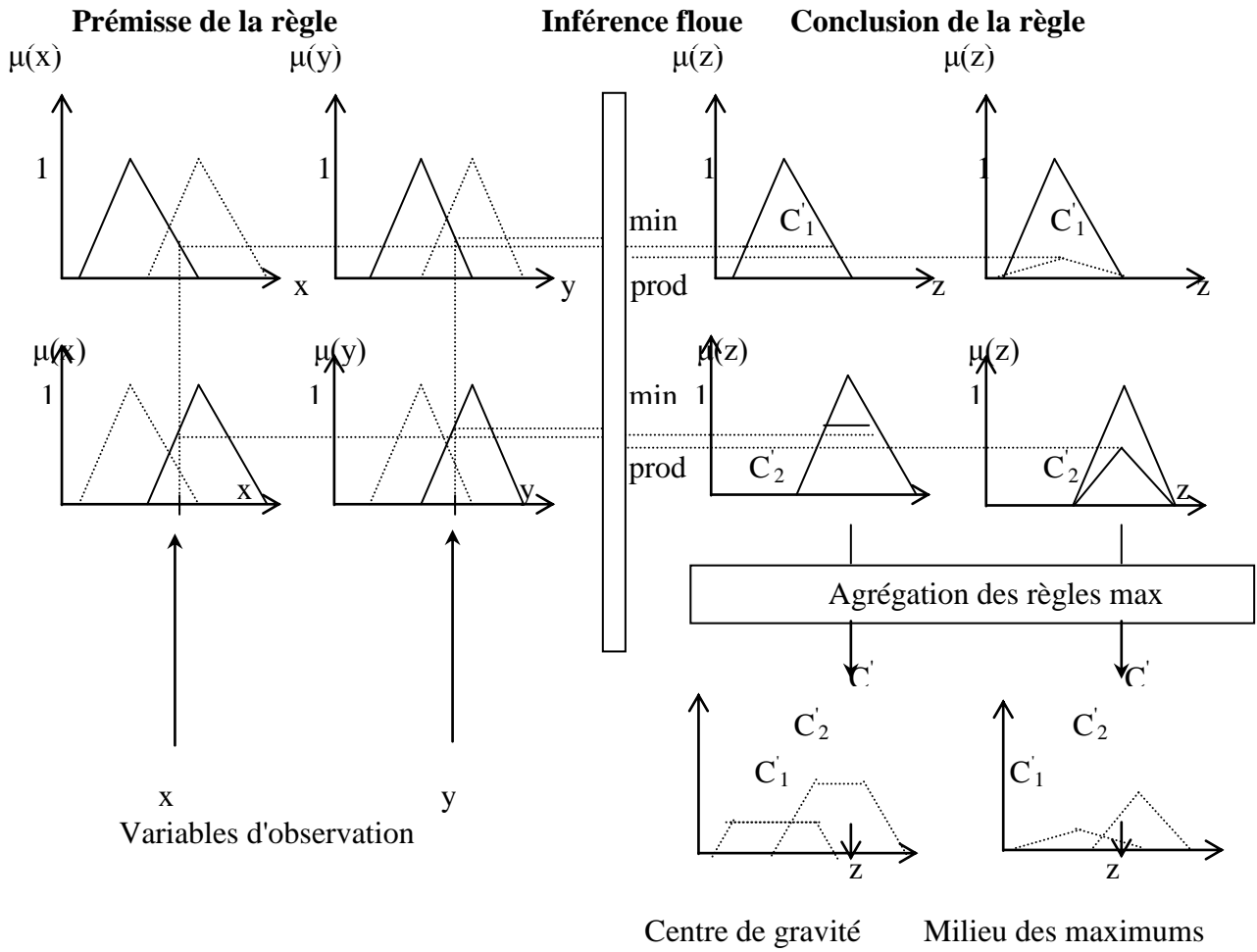


Figure II.13: Système d'inférence flou de Mamdani

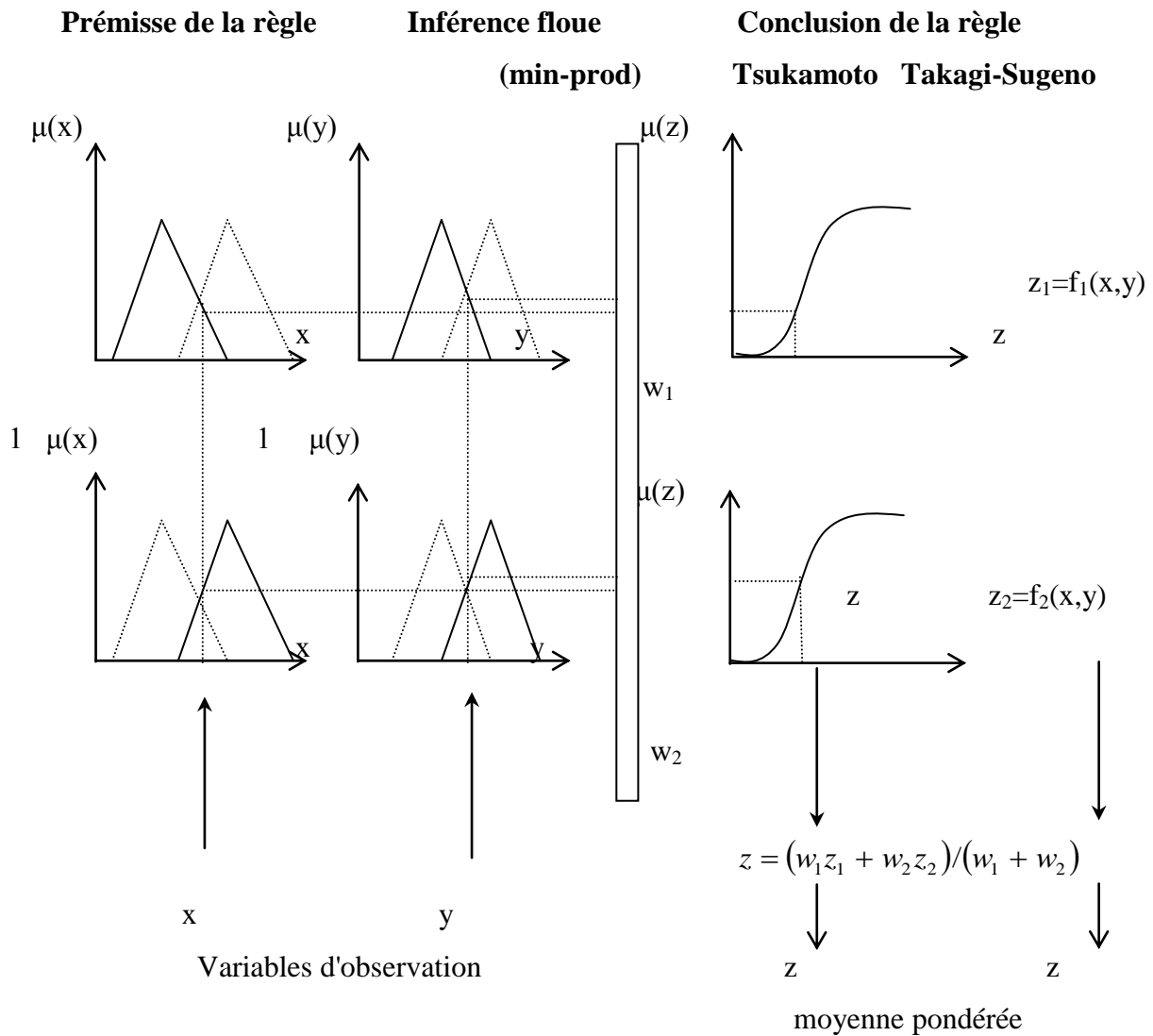


Figure II.14: Système d'inférence floue de Tsukamoto et Takagi-Sugeno

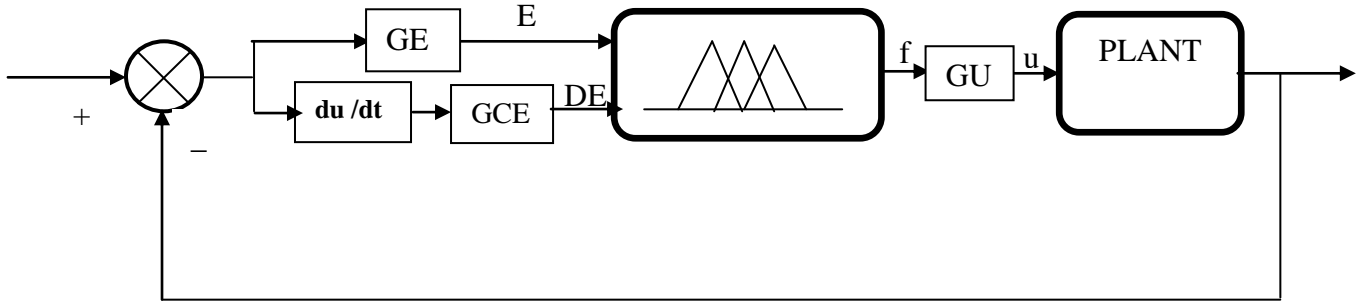
Dans la méthode de Mamdani, les prémisses et les conclusions des règles sont floues. L'inférence floue est réalisée à l'aide de l'opérateur min (minimum) ou prod (produit) et l'agrégation des règles à l'aide de l'opérateur max (maximum). La défuzzification est généralement effectuée par la méthode du centre de gravité.

Pour TSUKAMOTO, la fonction d'appartenance de chaque conclusion est une fonction monotone croissante. L'inférence floue est réalisée par l'opérateur min ou prod. La sortie numérique est une moyenne pondérée des valeurs issues des fonctions monotones.

La méthode de TAKAGI-SUGENO, est très efficace du point de vue de calcul car elle privilégie l'analyse mathématique, elle fonctionne bien avec les techniques linéaires, l'optimisation et les techniques dites adaptatives. L'inférence floue est réalisée avec l'opérateur min ou prod. Les conclusions des règles sont des valeurs numériques calculées à partir des entrées et la valeur finale est obtenue en effectuant une moyenne pondérée des conclusions.

**II.3 Correcteur proportionnel dérivée flou (FPD) :[13]**

Le correcteur proportionnel dérivé a comme entrée : l'erreur « e » et sa dérivée « de » illustré par la figure (II.15):



**Figure II.15:** Structure d'un régulateur flou type PD

Dans ce cas le signal de commande  $u_k$  est une fonction non linéaire en fonction de l'erreur « e » et la dérivée de l'erreur « de »,  $u_k$  est donné comme suit :

$$u_k = f(GE \cdot e_k, GCE \cdot de_k) \cdot GU \quad (II.17)$$

De même un choix de structure interne peut conduire à employer l'approximation linéaire de  $f$  comme suit :

$$u_k = (GE \cdot e_k + GCE \cdot de_k) \cdot GU \quad (II.18)$$

Avec  $de_k = \frac{e_k - e_{k-1}}{T_s}$ .

Ce qui donne :

$$u_k = GE \cdot GU \cdot \left( e_k + \frac{GCE}{GE} \cdot \frac{e_k - e_{k-1}}{T_s} \right) \quad (II.19)$$

Dans le cas d'un correcteur proportionnel dérivé donne :

$$u_k = K_c \cdot \left( e_k + T_d \cdot \frac{e_k - e_{k-1}}{T_s} \right) \quad (II.20)$$

Par identification les deux dernières relations donnent :

$$GE \cdot GU = K_c \quad (II.21)$$

$$\frac{GCE}{GE} = T_d \quad (II.22)$$

### II.4 Avantages et désavantages du réglage par la logique floue :

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

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

Par contre les désavantages sont :

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

### II.5 ETUDE DE LA COMMANDE ADAPTATIVE :[9]

#### II.5.1 Introduction :

Dans la plupart des installations industrielles, il est nécessaire de maintenir les grandeurs physiques à des valeurs prescrites, quelles que soient les variations internes ou externes qui peuvent avoir une influence sur ces grandeurs. Il résulte qu'un système de réglage automatique est constitué d'un ensemble d'éléments reliés les uns aux autres de telle manière qu'ils puissent s'opposer aux effets des perturbations que le système subit.

#### II.5.2 Rappel sur la théorie des systèmes asservis :

##### a-Définition d'un système asservis :

Un système asservi est un système dont l'imposition d'une loi à l'entrée entraîne la correction par lui-même de l'écart entre la sortie réelle et la sortie désirée (consigne)

##### b-Schéma fonctionnel d'un système asservis :

Tout système asservi peut être représenté par un schéma fonctionnel la fig. II-1 nous montre les différents signaux

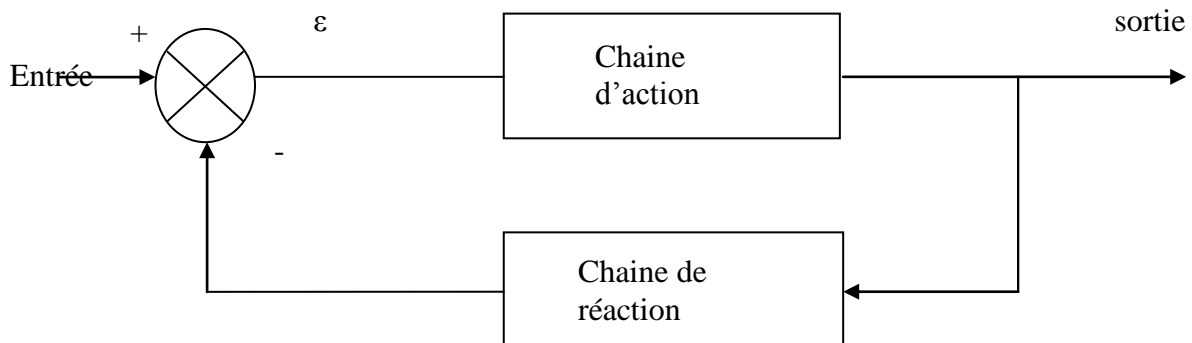


Figure II.16 : Schéma fonctionnel d'un système asservi

##### c-Boucle d'un système asservis :

La chaîne d'action et la chaîne de réaction forment la boucle d'un système asservi.

##### d-Fonction de transfert :

Tout système possède une fonction de transfert qui est le rapport entre sa sortie et son entrée.

Dans le domaine analogique  $F(p) = S(p)/E(p)$ .

Avec  $E(p), S(p)$  sont respectivement les transformées de LAPLACE de  $e(t)$  et  $s(t)$

##### e-Performance d'un système :

##### . Stabilité

On dit qu'un système asservi est stable s'il est apte de revenir à son état d'équilibre permanent après avoir subi une perturbation.

### **. Rapidité**

La rapidité d'un système est liée au temps de réponse de celui-ci qui est défini comme étant le temps nécessaire pour atteindre la sortie désirée avec une certaine marge d'erreur. On dit qu'un système est rapide si son temps de réponse est faible.

### **. Précision :**

On dit qu'un système possède une bonne précision si l'écart entre la valeur de sa sortie désirée et sa sortie réelle tend vers zéro.

### **II.5.3 Commande adaptative :**

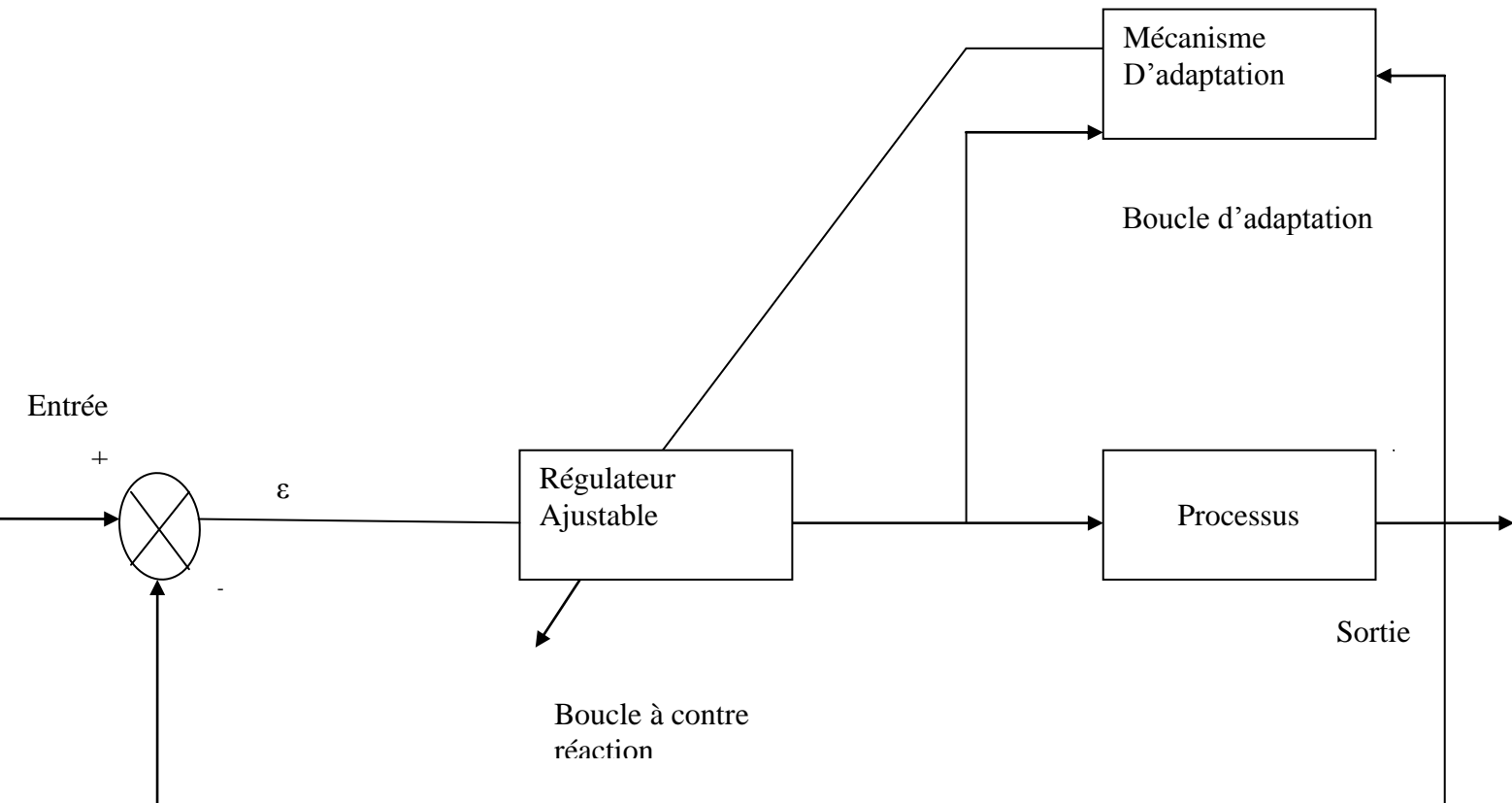
#### **a-Définition :**

La commande adaptative est un ensemble de concepts et de techniques utilisées pour l'ajustement automatique et en temps réel des régulateurs mis en œuvre dans la commande d'un processus lorsque les paramètres de ce dernier sont difficiles à déterminer ou varient avec le temps.

Dans le cas où les paramètres du système varieraient, les performances du système de commande classique se dégradent au fur et à mesure que l'écart entre les paramètres réels et ceux utilisés dans le calcul de la commande augmente. Pour y remédier, une identification du système en temps réel permet un réajustement de la loi de commande en fonction des performances désirées. Le schéma ainsi obtenu est celui d'une commande adaptative. On rappelle que la commande adaptative est l'ensemble des techniques utilisées pour l'ajustement automatique en ligne et en temps réel des régulateurs des boucles de commande, afin de réaliser ou maintenir un certain niveau de performances quand les paramètres du procédé sont, soit, inconnus, soit, varient dans le temps. Deux approches principales existent pour la commande adaptative des processus à paramètres inconnus ou variables dans le temps. Pour la première, il s'agit de la commande adaptative directe dans laquelle les paramètres du régulateur sont ajustés directement et en temps réel à partir des comparaisons entre performances réelles et performances désirées (c'est le cas en particulier de la commande adaptative à modèle de référence). Pour la seconde, il s'agit de la commande adaptative indirecte qui suppose une estimation des paramètres du processus par une procédure d'identification (c'est le cas de régulateurs auto-ajustable). Cette dernière est plus utilisée que la précédente car elle tient compte des caractéristiques d'évolution du processus .

### b-Commande adaptative directe :

Dans ce type de commande, les paramètres du régulateur mis en œuvre dans la commande, sont ajustés directement et en temps réel à partir d'une comparaison entre les performances désirées.



**Figure II.17 :** Commande adaptative direct

### c-Commande adaptative indirecte :

Dans ce cas l'ajustement des paramètres du régulateur se fait en deux étapes, la première étape consiste en l'estimation du modèle du processus et la seconde consiste en l'ajustement des paramètres du régulateur.

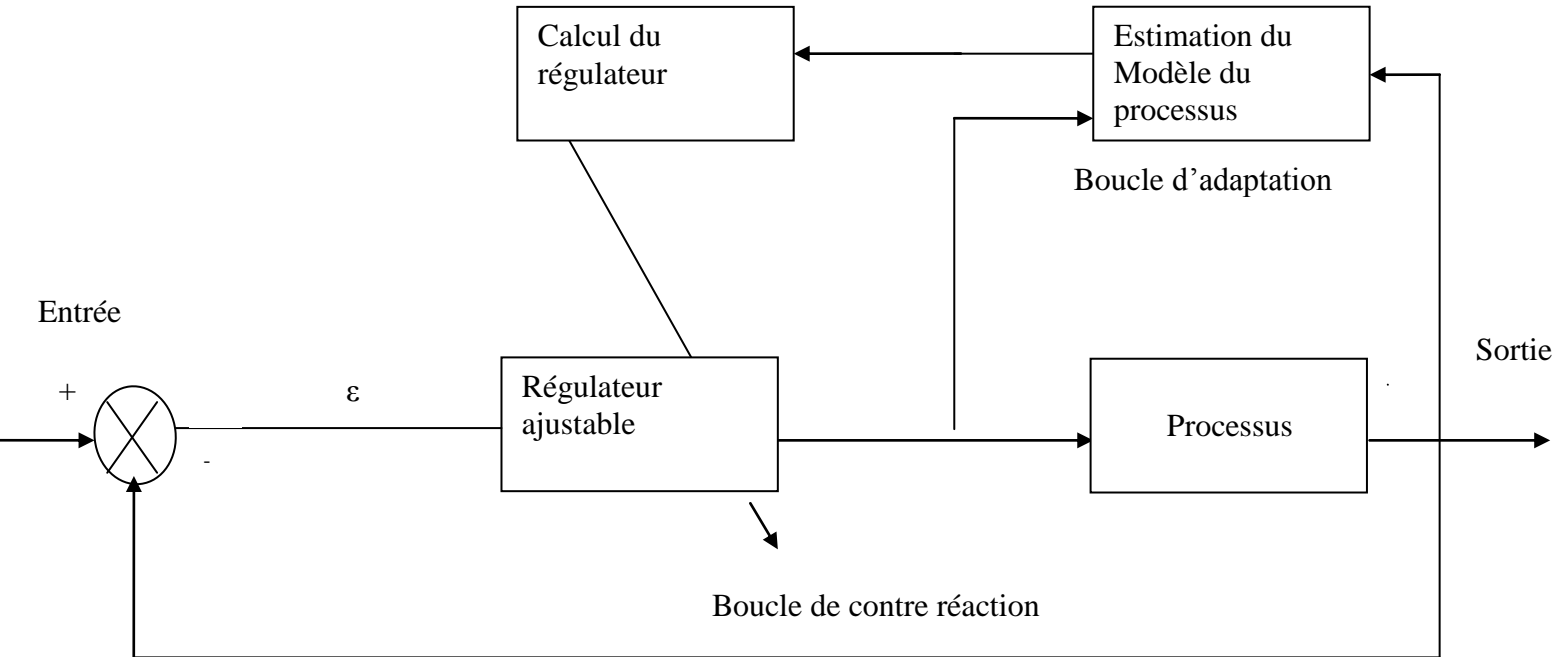
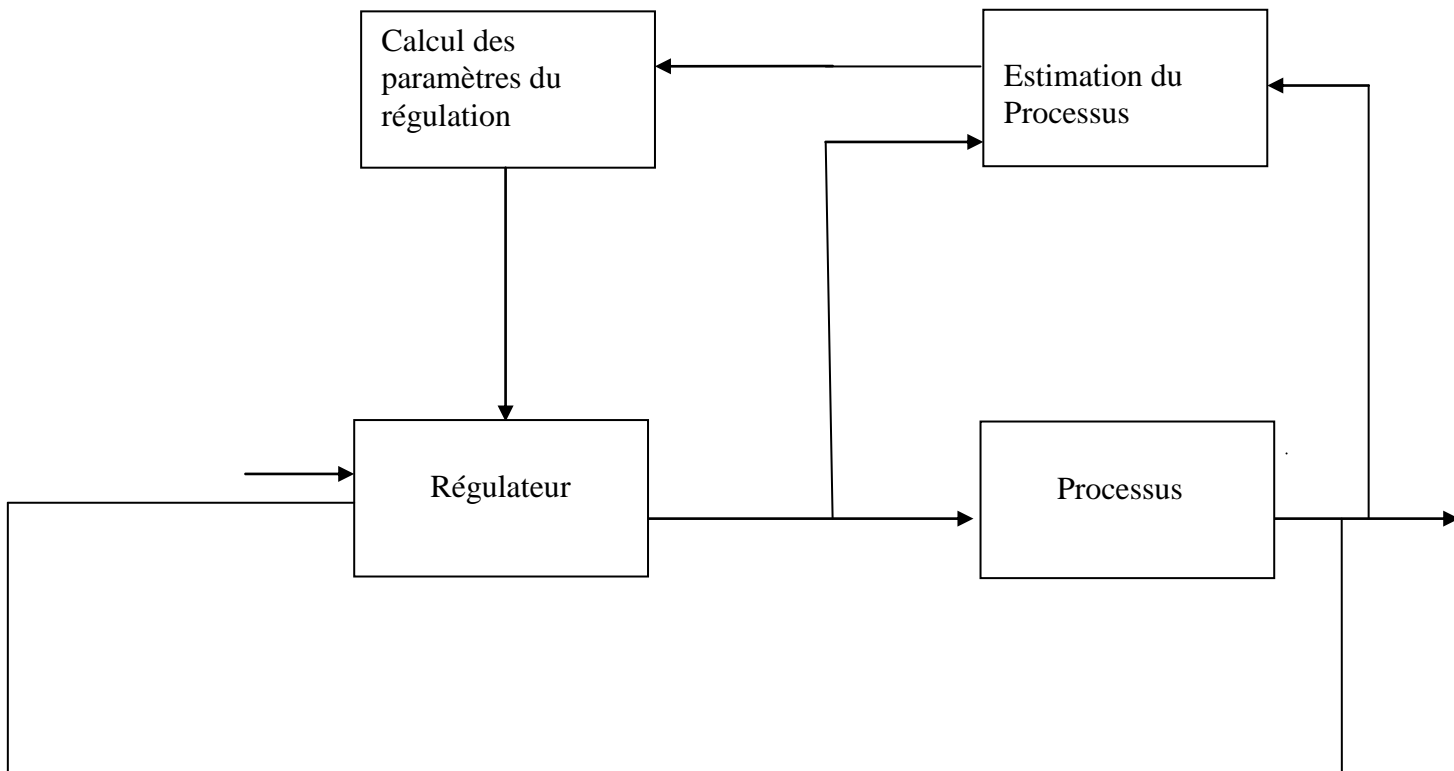


Figure II.18 : Commande adaptative indirecte

### II.5.4 Quelques approches de la commande :

#### a-Commande adaptative avec régulateur auto-ajustable :

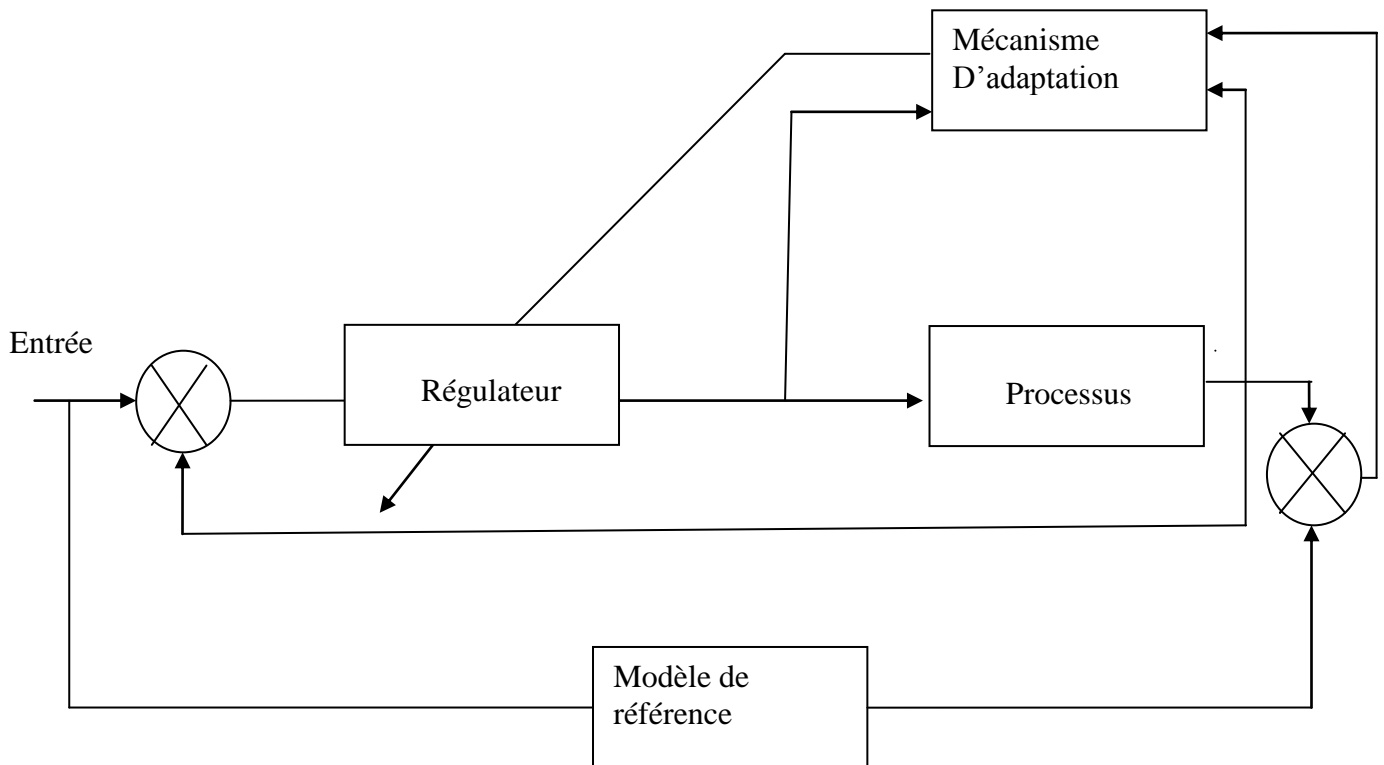
Cette approche consiste en l'utilisation d'un estimateur paramétrique qui est utilisé soit pour estimer directement les paramètres du régulateur, ce qui est le cas d'une commande directe, soit pour identifier les paramètres du processus puis calculer les nouveaux paramètres du régulateur, ce qui nous conduit à une commande indirecte.



**Figure II.19 :** Commande adaptative avec régulateur auto-ajustable

### **b-Commande adaptative avec modèle de référence :**

Dans ce type de commande les paramètres du régulateur sont adaptés en fonction de l'écart entre la sortie réelle du système et la sortie du modèle de référence qui est considérée comme une sortie.



**Figure II.20** : Commande adaptative avec modèle de référence

### II.6 Conclusion :

Dans cette approche, un schéma de contrôle pour la synthèse d'une commande adaptative à base du flou d'un robot manipulateur, est développé. Dans cette conception, les systèmes flous sont utilisés pour approximer les parties inconnues des fonctions non linéaires.

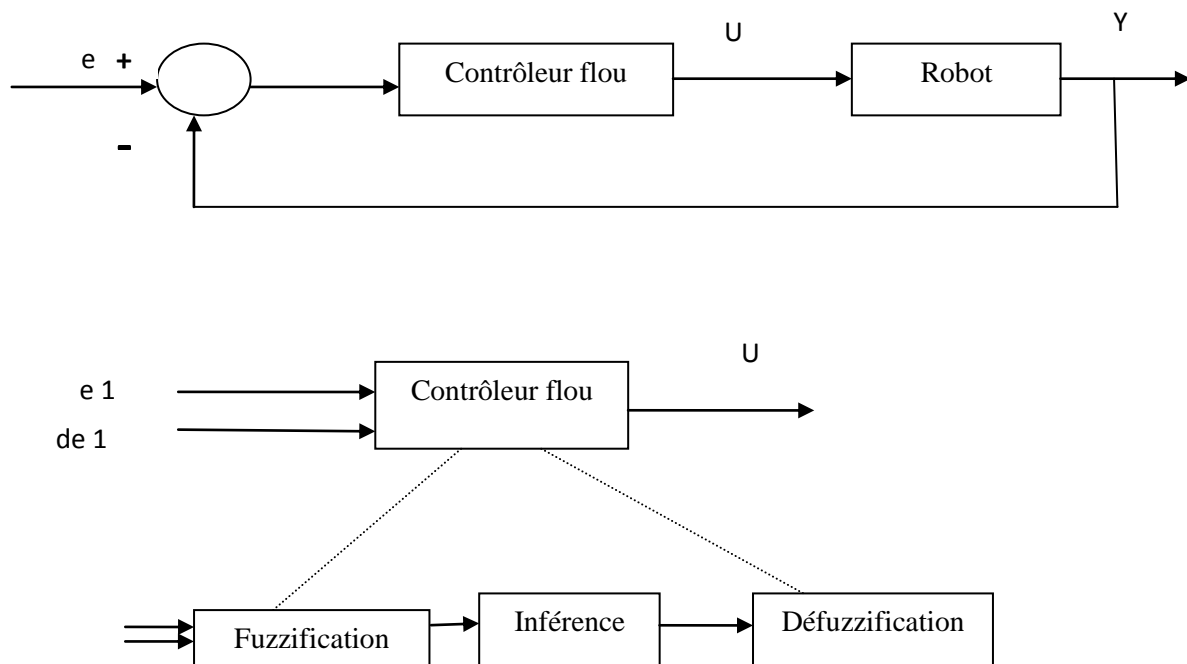
**III.1 Introduction :**

L'objectif de ce travail est de résoudre le problème de poursuite et de régulation d'un système non linéaire. Il s'agit de faire la synthèse des différentes commandes : utilisation d'un contrôleur à base du flou adaptatif pour commander un bras manipulateur à 2ddl et la commande à action proportionnel dérivée. Afin d'allier l'efficacité de la commande adaptative. Cette méthode simple est facilement généralisable à certains systèmes non linéaires ayant une grande incertitude et/ou une non connaissance des variations des paramètres.

**III.2 Application de la logique floue sous Matlab :**

Pour l'interface graphique, des représentations scientifiques et même artistiques des objets peuvent être créées sur l'écran en utilisant les expressions mathématiques. Les graphiques sur Matlab sont simples et attirent l'attention des utilisateurs, vu les possibilités importantes offertes par ce logiciel.

**III.2.1 Structure de la commande floue :**



**Figure III.1 :** configuration d'un système commandé par contrôleur flou

### III.2.2 Conception d'un contrôleur flou :

Pour atteindre l'objectif voulu c'est-à-dire la commande du bras manipulateur à 2ddl on a utilisé un proportionnel dérivé flou de type Mamdani dont ses étapes sont :

#### a-La fuzzification :

C'est le mécanisme réalisant l'interface " Numérique - Linguistique" qui permet de transformer une grandeur générée par un capteur à l'entrée en partie floue définie sur un espace de représentation lié à l'entrée. Sous Matlab cette étape représentée par la fenêtre suivante de la boîte à outil *Toolbox*

#### b-Choix de la forme des classes :

Pour permettre une commande progressive et non pas par paliers, la forme triangulaire semble préférable pour toutes les classes des variables d'entrée **abse (e et de)** et de sortie **alpha**, ce qui permet également de simplifier les calculs.

#### c- Définition des référentiels pour les deux variables d'entrées (e, de) :

Dans le but d'effectuer la transformation numérique symbolique, il est nécessaire de connaître la plage de variation réelle de chaque grandeur d'entrée afin d'y faire correspondre son ensemble flou, ce dernier étant lui-même divisé en sous-ensembles flous. Nous avons donc défini 5 sous-ensembles flous (ou classes) respectivement nommés : **Grand négatif(GN)**, **Négatif(N)**, **Zéro (Z)**, **Grand (G)**, **très Grand (TG)**.

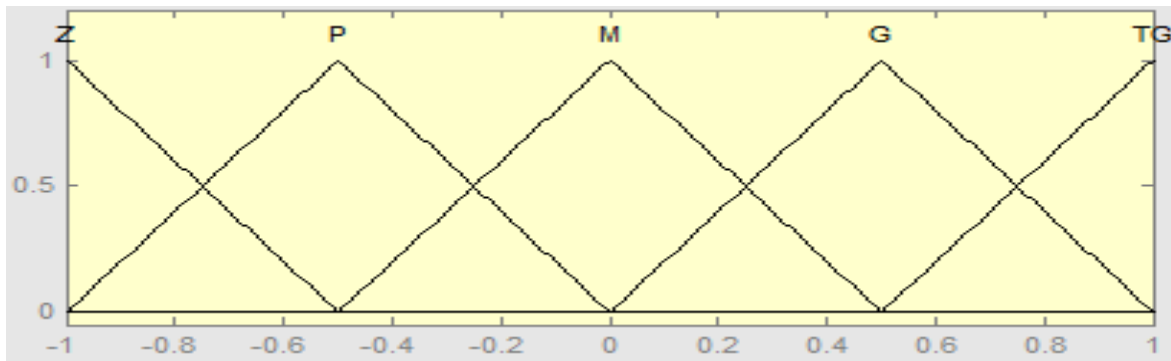


Figure III.2 : fonction d'appartenance de type triangulaire

**d-Base de règles floues :**

C'est une base de connaissances qui contient les règles floues décrivant le comportement du système. Représenté sur la fenêtre suivante :

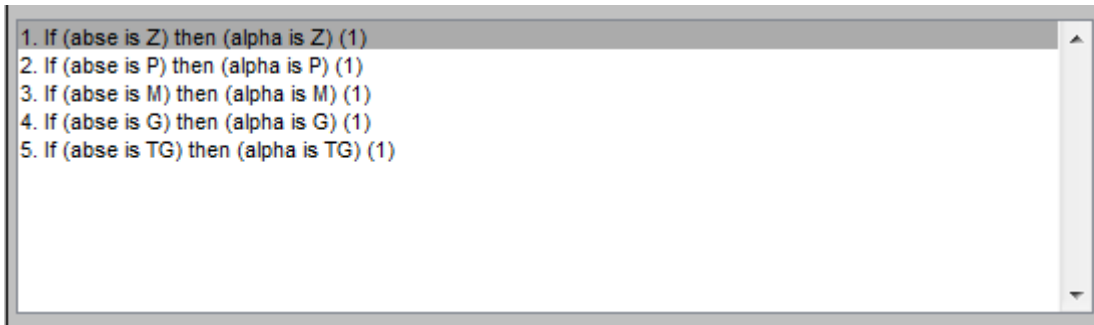


Figure III.3 : les différentes règles floues

Ces prédicats expliquent le rôle de l'expert qui essaye de trouver les bons résultats en jouant sur les gains et les fonctions d'appartenance

**e-Défuzzification :**

C'est une interface " Linguistique - Numérique" qui transforme la partie floue de l'inférence en valeurs numériques directement exploitables par le processus.

La méthode du centre de gravité simplifiée a été choisie pour sa rapidité de calcul sans compromettre la précision du résultat. La fenêtre *rule viewer* permet d'observer le résultat de la défuzzification et l'application de la méthode de centre de gravité.

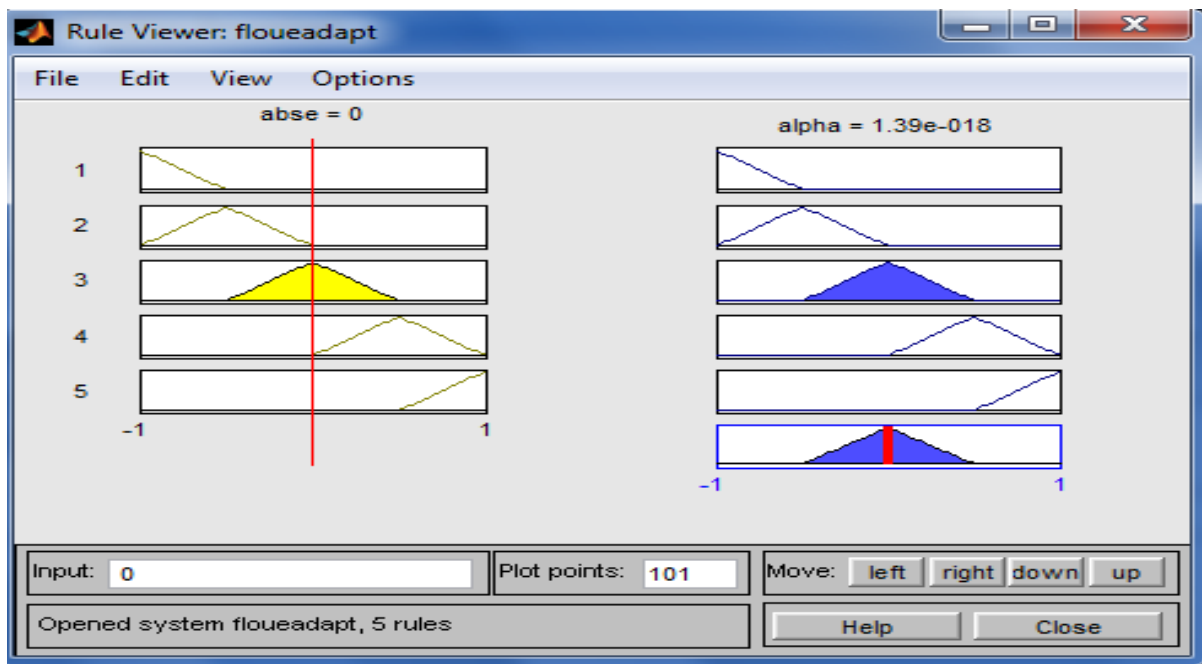


Figure III.4: la défuzzification et la méthode de centre de gravité

#### III.3 La Loi de commande proportionnelle dérivée avec compensation de l'effet de gravité (point à point) :

Cette loi de commande permet de positionner les différentes articulations du robot manipulateur autour d'une position désirée constante, de plus elle permet de lever la contrainte relative à l'utilisation de grand gain dans d'autres lois de commande, et ceci par la compensation de l'effet du vecteur de gravité.

Considérant Le modèle dynamique sans frottement et sans perturbation décrit par l'équation suivante:

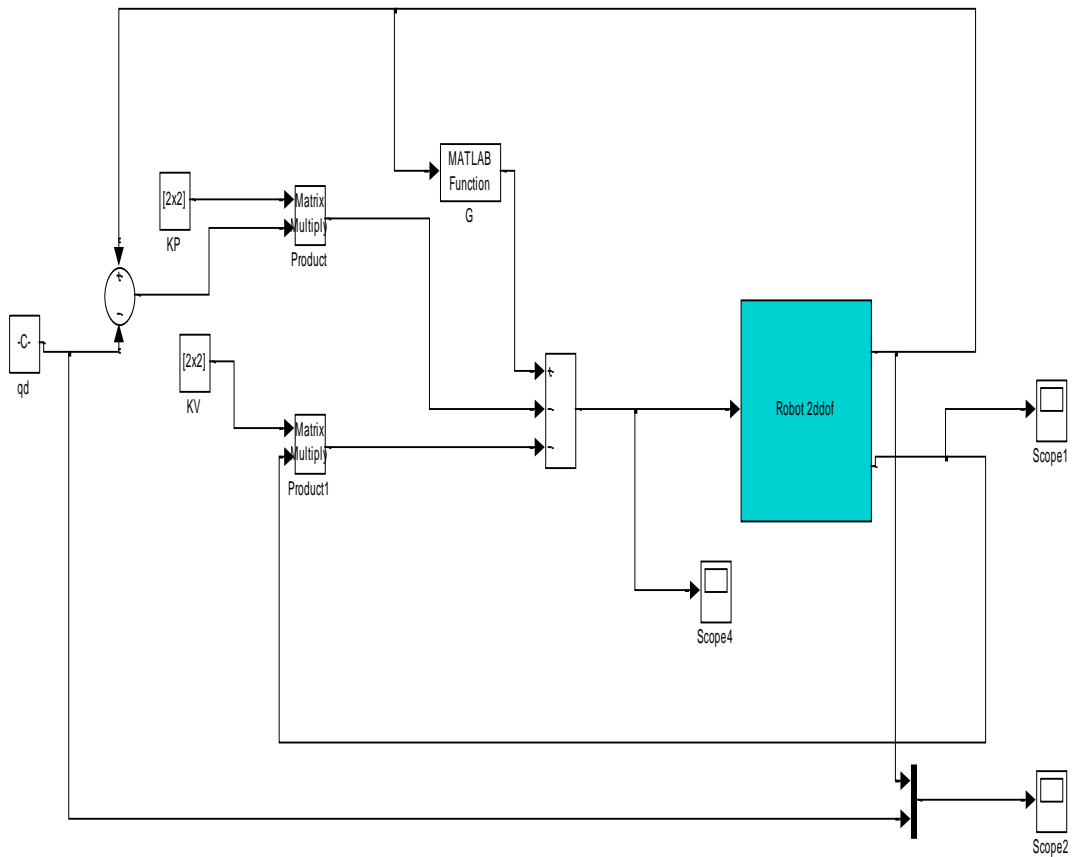
$$\Gamma = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (\text{III.1})$$

Ce modèle décrit un système à  $n$  équations différentielles du second ordre non linéaires et couplées.  $n$  étant le nombre d'articulations.

La loi de commande est définie par :

$$\Gamma = G(q) - k_p \tilde{q} - k_v \dot{q} \quad (\text{III.2})$$

Où  $k_p$  et  $k_v$  sont respectivement les matrices des gains proportionnels et dérivés de dimension  $(n \times n)$ , ces deux matrices sont diagonales et définies positives.  $\tilde{q} = q - q_d$  représente l'écart de position, avec  $q$  (mesurée) est la position angulaire, et  $q_d$  la position désirée.



**Figure III.5:** Schéma bloc d'une commande point à point

III.4 Résultats de simulation :

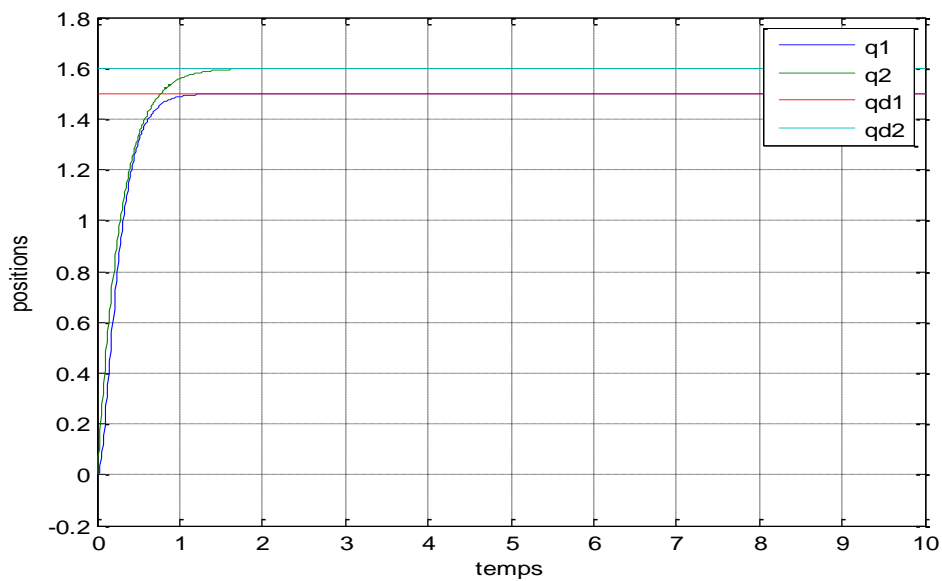


Figure III.6 : la réponse des deux articulations ( $q_1, q_2$ ) et les références ( $q_{d1}, q_{d2}$ )

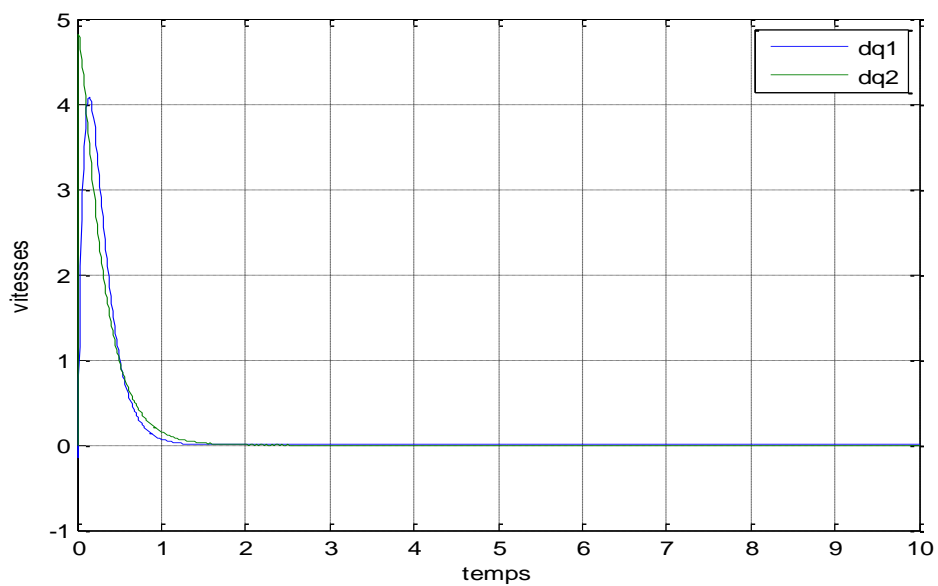


Figure III.7: la vitesse des deux articulations

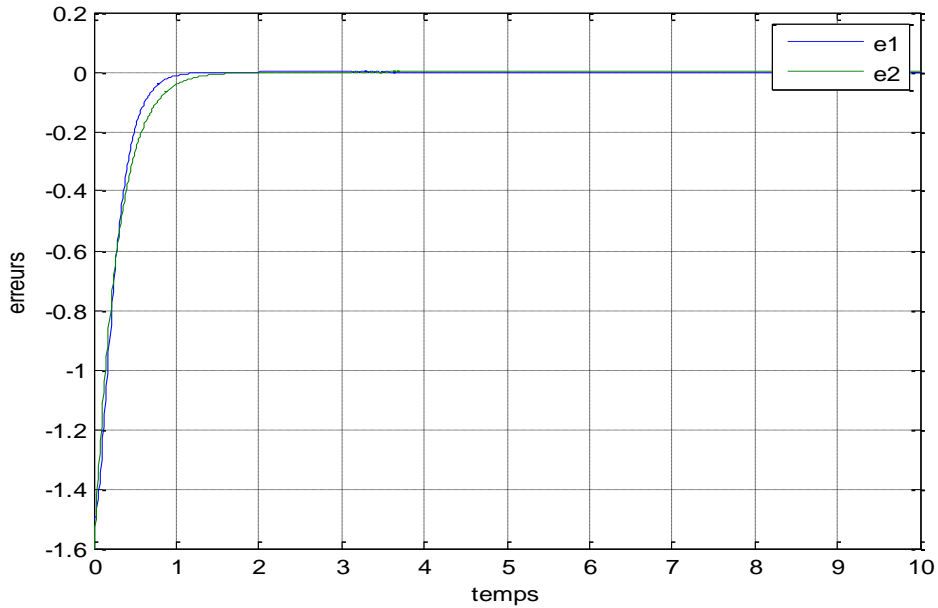


Figure III.8 : Les erreurs des articulations

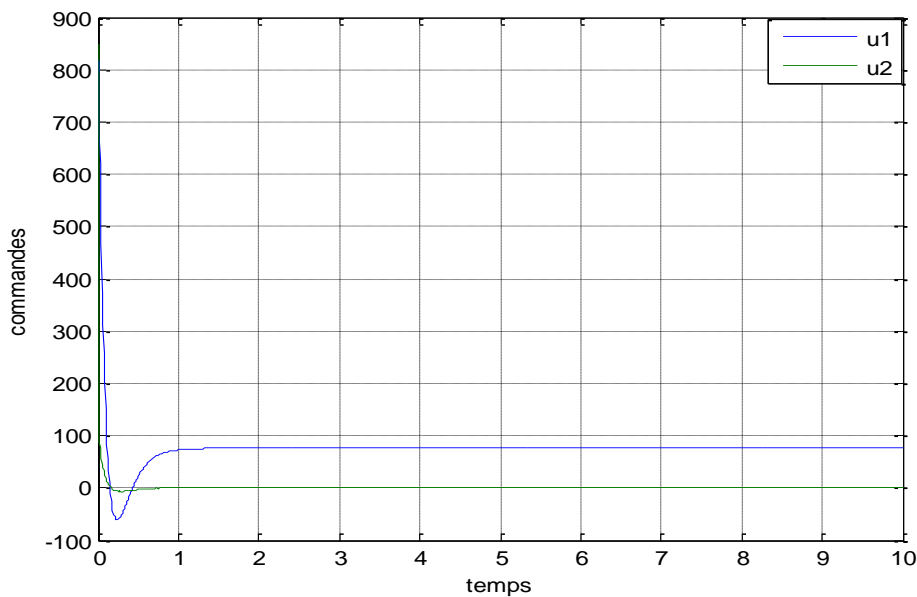


Figure III.9: les commandes (u1, u2) au niveau des deux articulations

### III.5 Interprétation des résultats :

Les résultats de simulations sont présentés comme suit : Dans la (figure III.7) on présente les réponses des articulations (1) et (2) du bras à des entrées échelon d'amplitudes 1.5 et 1.6 respectivement. Nous constatons que les positions (Figure III.7) convergent très bien vers les valeurs d'entrées, et évidemment les réponses en vitesses (Figure III.8)

convergent vers la valeur zéro. Les commandes correspondantes sont présentées dans la (Figure III.10) et les erreurs s'annulent(Figure III.9).

Sachant que les valeurs des gains après plusieurs essais sont :

$$K_p = [530 \ 0; 0 \ 530]$$

$$K_v = [150 \ 0; 0 \ 150]$$

#### **III.6 la commande floue adaptative :**

La loi d'adaptation est déduite des différents tests et mesures réalisés sur le système. Ainsi le Problème de convergence de l'erreur de poursuite et le choix des paramètres initiaux restent posés. Ont proposé une commande adaptative floue.

Les études effectuées sur la structure et le fonctionnement des systèmes biologiques et sur le mécanisme de la pensée humaine, ont donné naissance à de nouvelles approches, dont l'approche floue. Cette approche a conduit à la réalisation de systèmes de commande très performants, du fait de sa maîtrise de l'aspect approximatif et qualitatif, inspirés du mécanisme de la pensée humaine. Les récentes avancées des recherches dans le domaine du flou ont prouvé la capacité et la puissance des modèles flous dans l'identification floue des procédés non linéaires. Le principe de l'identification et de la commande floue repose sur la faculté d'approximation dont jouissent les systèmes flous. En effet, ceux-ci sont capables d'approximer, avec un degré de précision arbitraire fixé, n'importe quelle dynamique non linéaire sur un ensemble compact. L'objectif principal de notre travail est la conception de contrôleurs adaptatifs flous pour des systèmes non linéaires à paramètres incertains.

#### **III.6.1 Commande en poursuite de trajectoire :**

Afin d'étudier les lois de commandes il est nécessaire d'étudier les trajectoires de référence utilisées en robotique, ce qui nous permet d'analyser la validité d'une loi de commande.

D'une manière générale le problème de la génération de mouvement est de calculer pour chaque articulation les trajectoires de référence en position, qui sont en fonction du temps et qui assurent le passage du robot par une trajectoire désirée d'une configuration initiale à une configuration finale désirée. Voir la figure III.11.

Nous avons utilisé cinq fonctions d'appartenance de type triangulaire dans le régulateur flou.

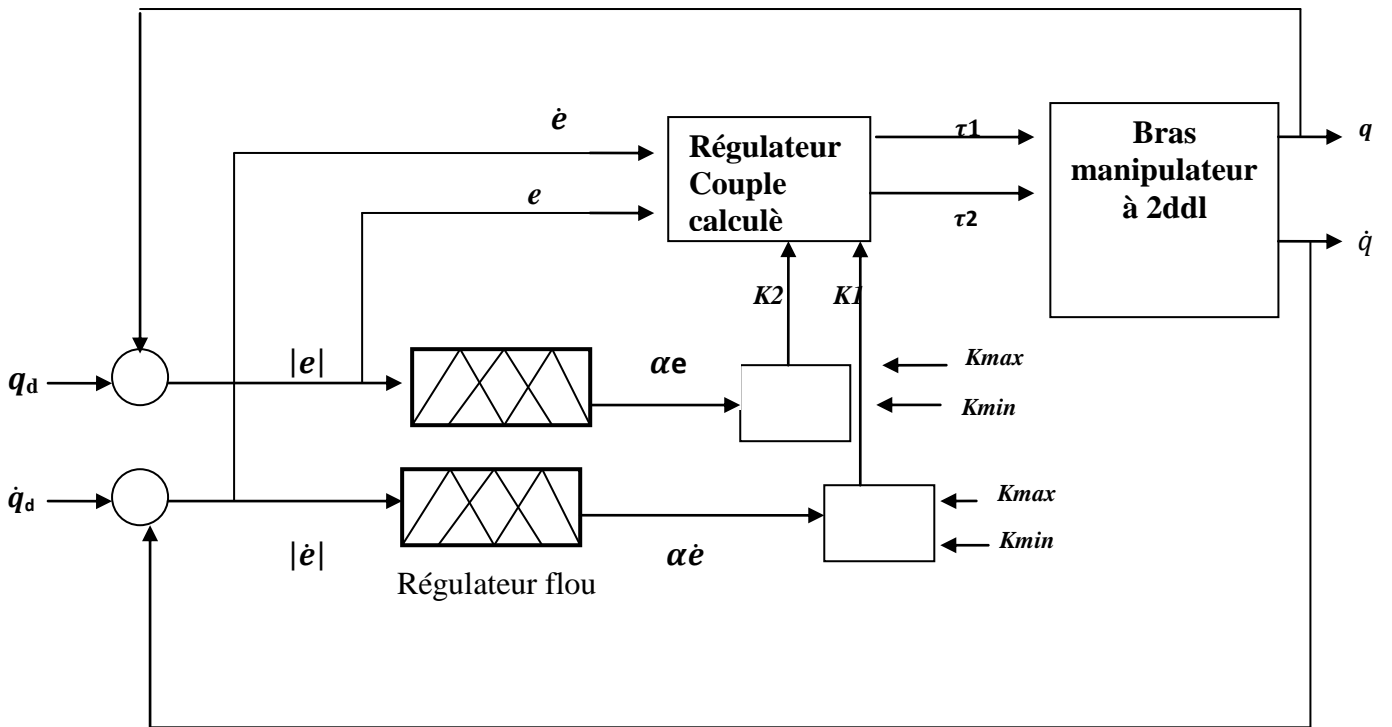


Figure III.10 : Schéma de la commande floue adaptative (pour la poursuite)

III.7 Résultats de simulation :

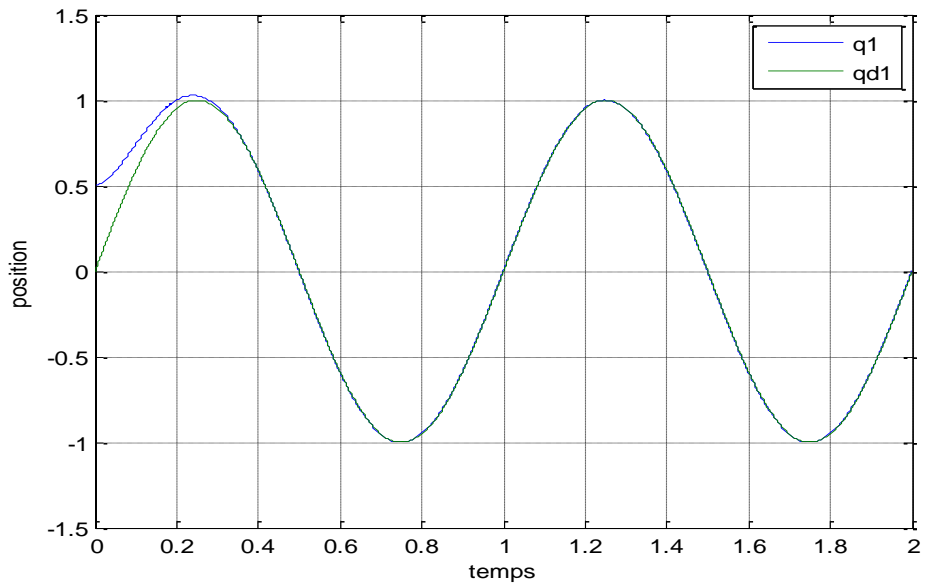


Figure III.11 : La réponse  $q_1(t)$  et la valeur désirée  $q_{d1}(t)$ .

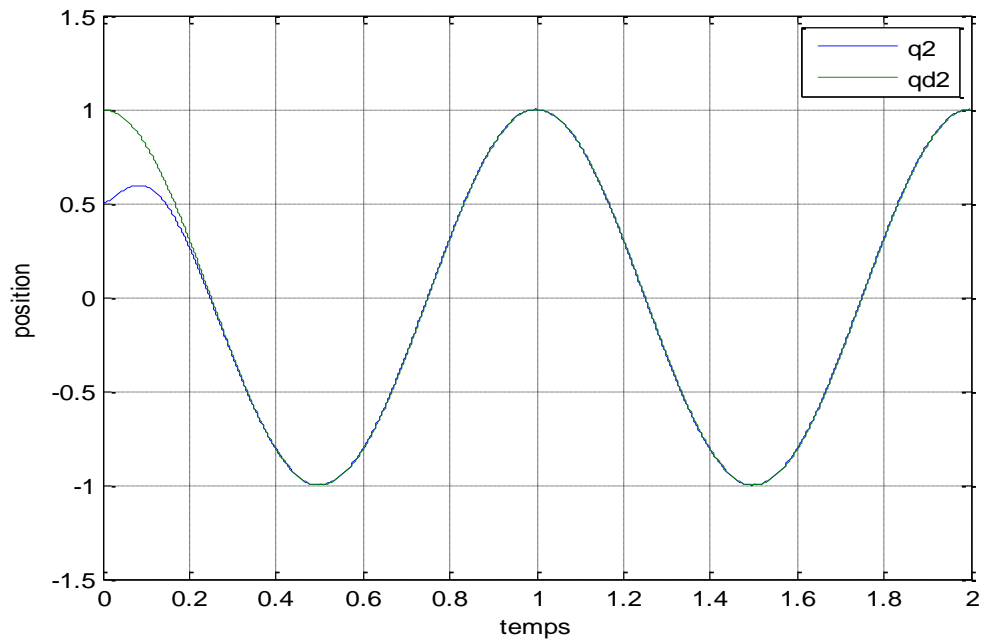


Figure III.12: La réponse  $q_2(t)$  et la valeur désirée  $q_{d2}(t)$ .

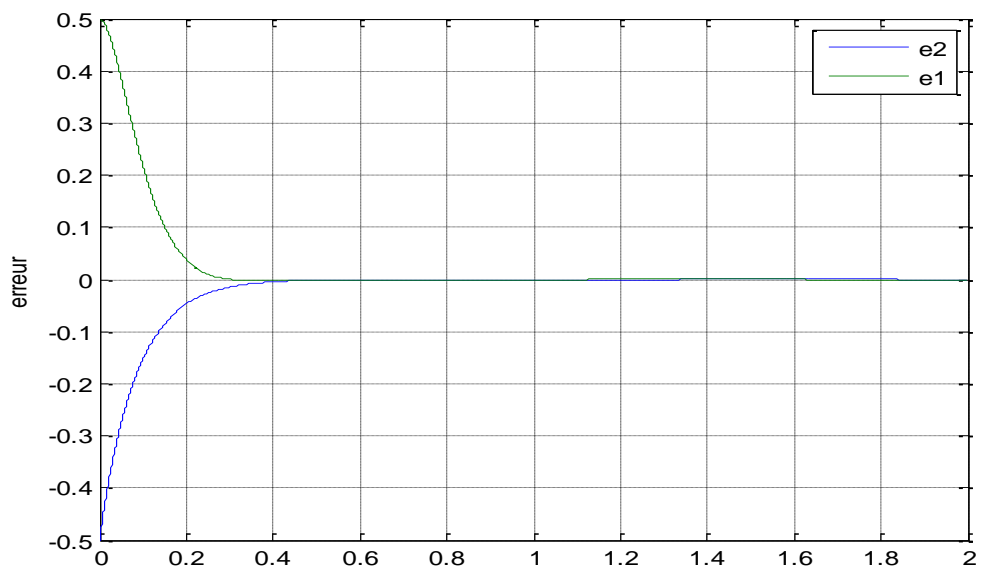
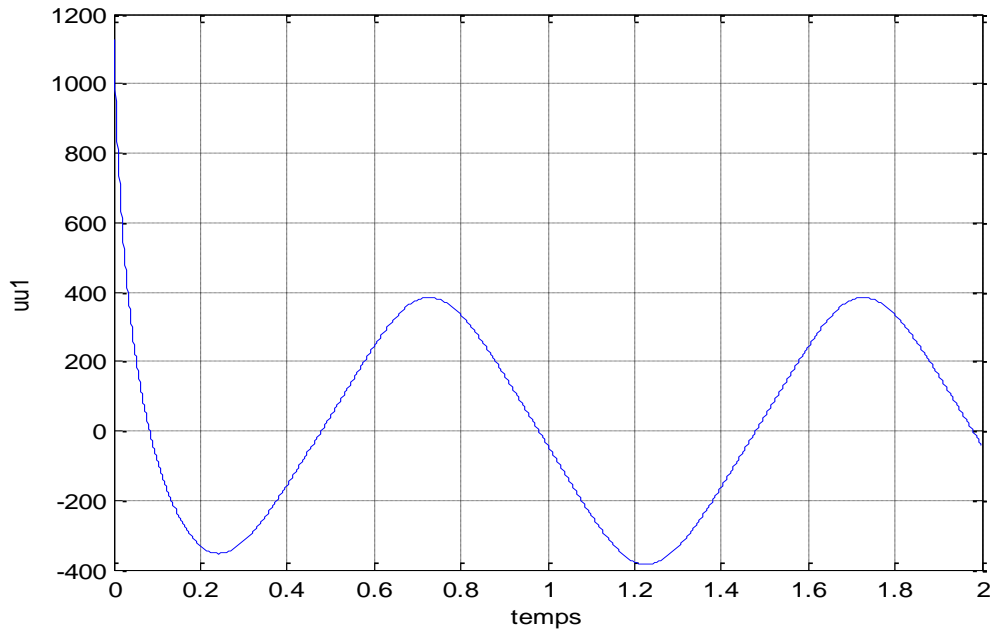
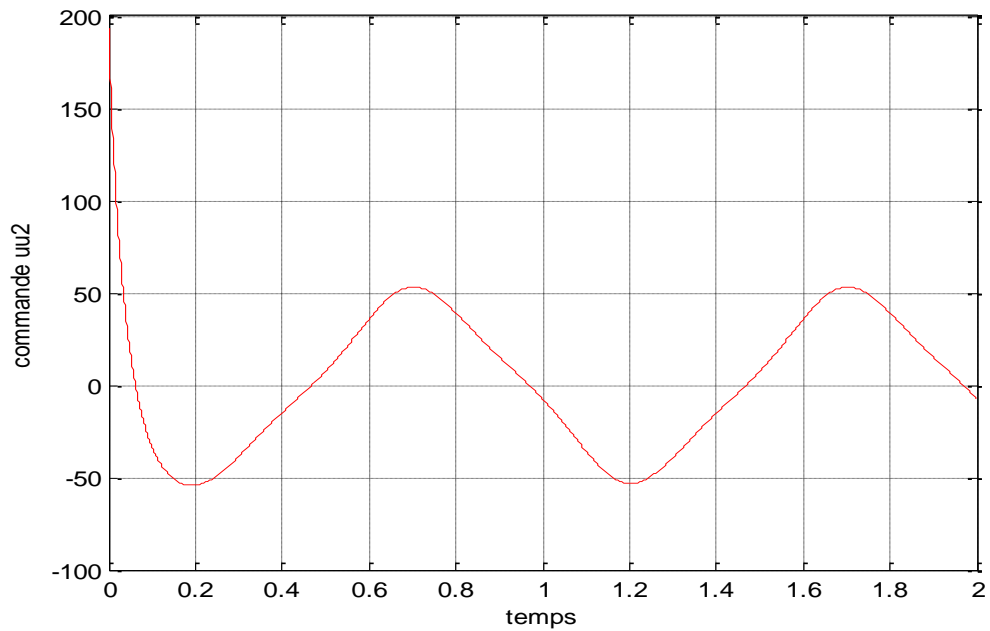


Figure III.13 : Les erreurs au niveau des deux articulations



**Figure III.14:** La tension U1 au niveau de la 1<sup>ère</sup> articulation



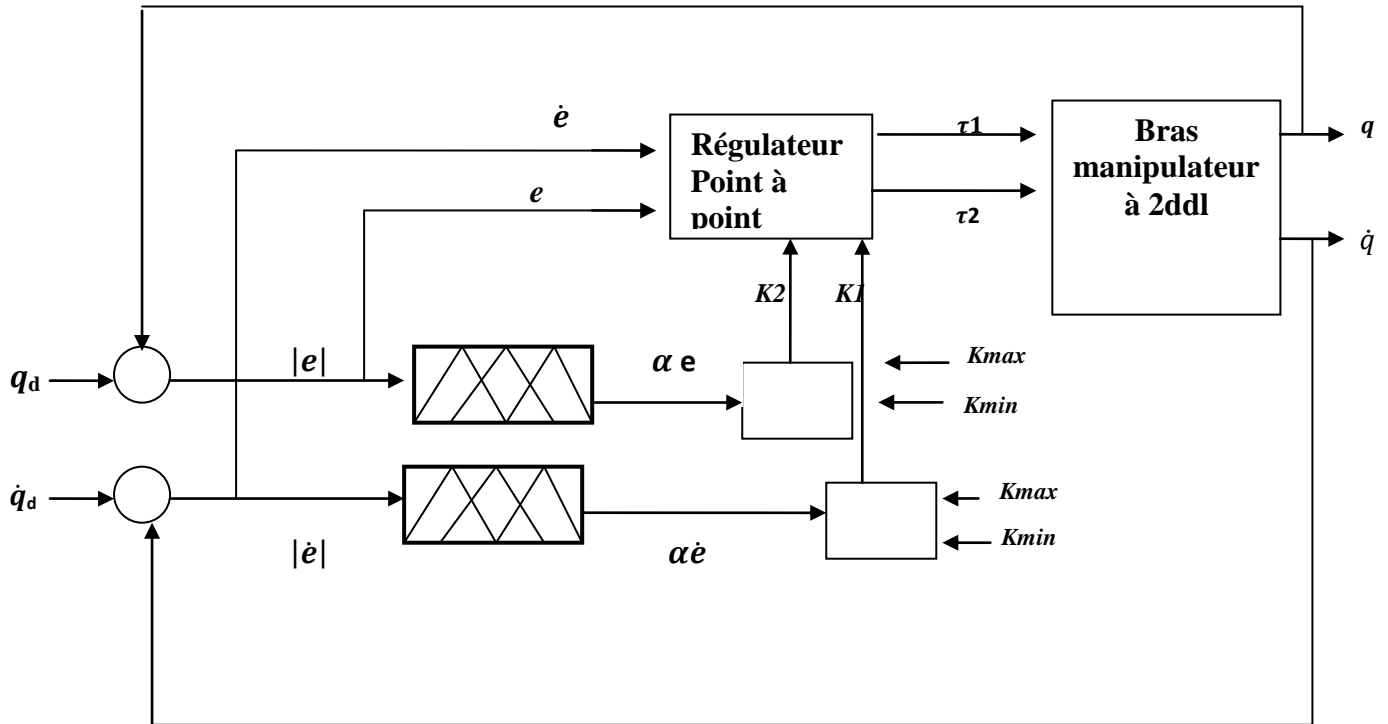
**Figure III.15:** La tension U2 au niveau de la 2<sup>ème</sup> articulation

### III.8 Interprétation des résultats :

D'après les résultats de simulation on remarque que chaque articulation suit sa référence désirée (Figure III.12, Figure III.13), et dans la (Figure III.14) les erreurs s'annulent ce qui nous donne des commandes réalisables et acceptables pratiquement ce qui montrent (Figure III.15 et Figure III.16).

Cette loi de commande ressemble à la classe des lois de commande par découplage non linéaire. Elle consiste à poursuivre une trajectoire prédéfinie par  $q_d(t)$  et permettant d'obtenir en boucle fermée un comportement linéaire et découplé sous certaines conditions à définir. Ce type de loi de commande sera proche de la loi de commande par découplage non linéaire mais avec un objectif différent.

**III.9 La régulation :**



**Figure III.16 :** Schéma de la commande floue adaptative (pour la régulation)

Les paramètres initiaux utilisés dans l'application de la commande adaptative floue sont :

- $k1_{max}=130; k1_{min}=125$
- $k2_{max}=40; k2_{min}=35$
- $k3_{max}=470; k3_{min}=450$
- $k4_{max}=470; k4_{min}=450$

Le but de cette application est de trouver les paramètres **K1** et **K2** :

$$\mathbf{k2} = \text{diag} ([k21 \ k22])$$

$$\mathbf{k1} = \text{diag} ([k11 \ k12])$$

III.10 Résultats de simulation :

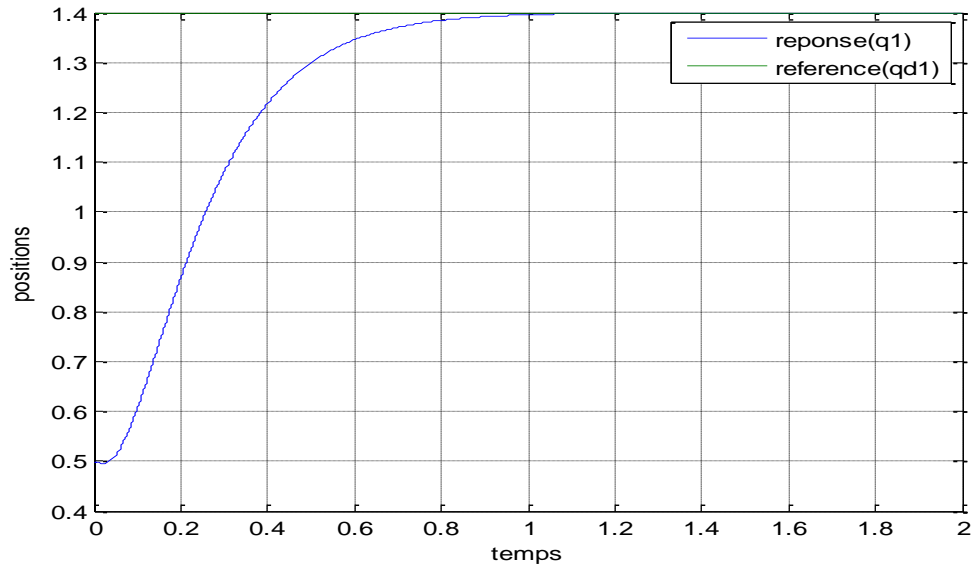


Figure III.17 : la réponse q1 et la référence désiré qd1

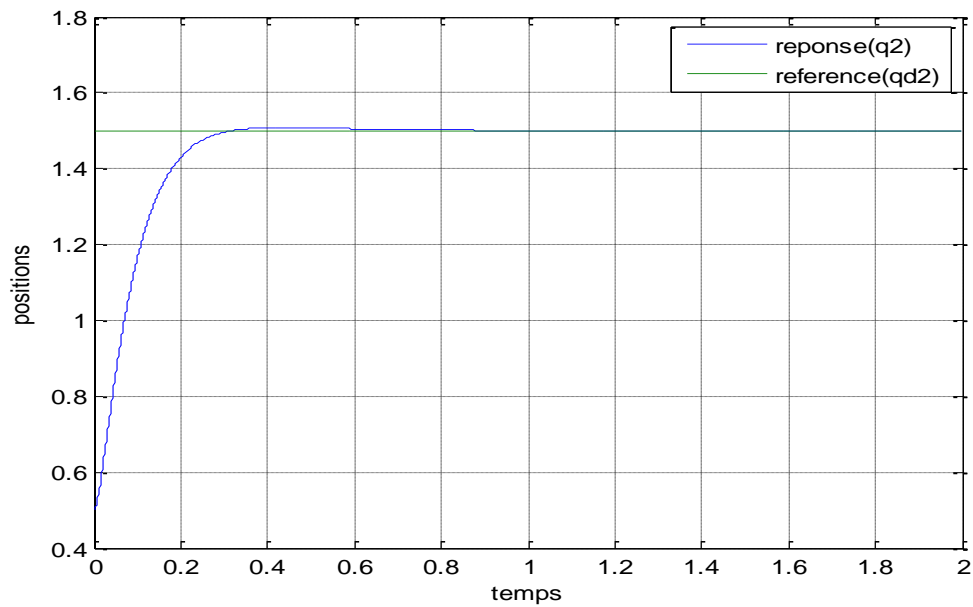


Figure III.18 : la réponse q2 et la référence désiré qd2

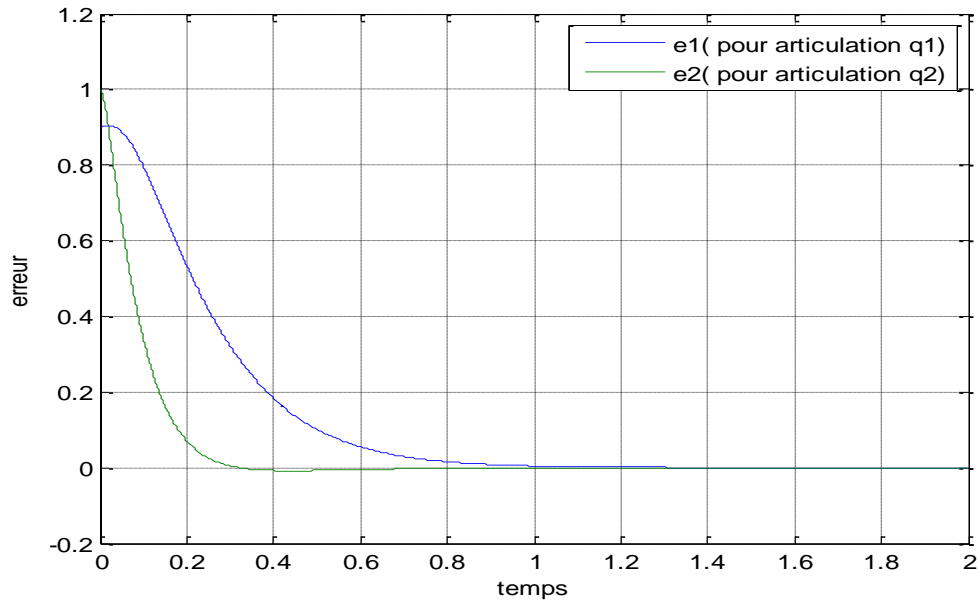


Figure III.19: Les erreurs au niveau des deux articulations

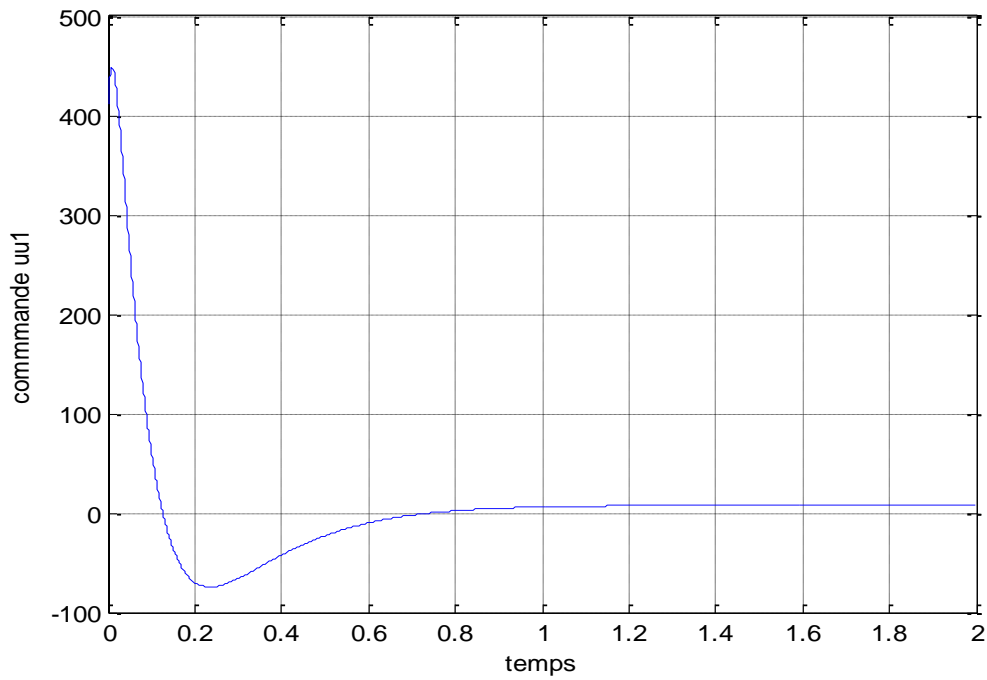


Figure III.20: La tension U1 au niveau de la 1ère articulation

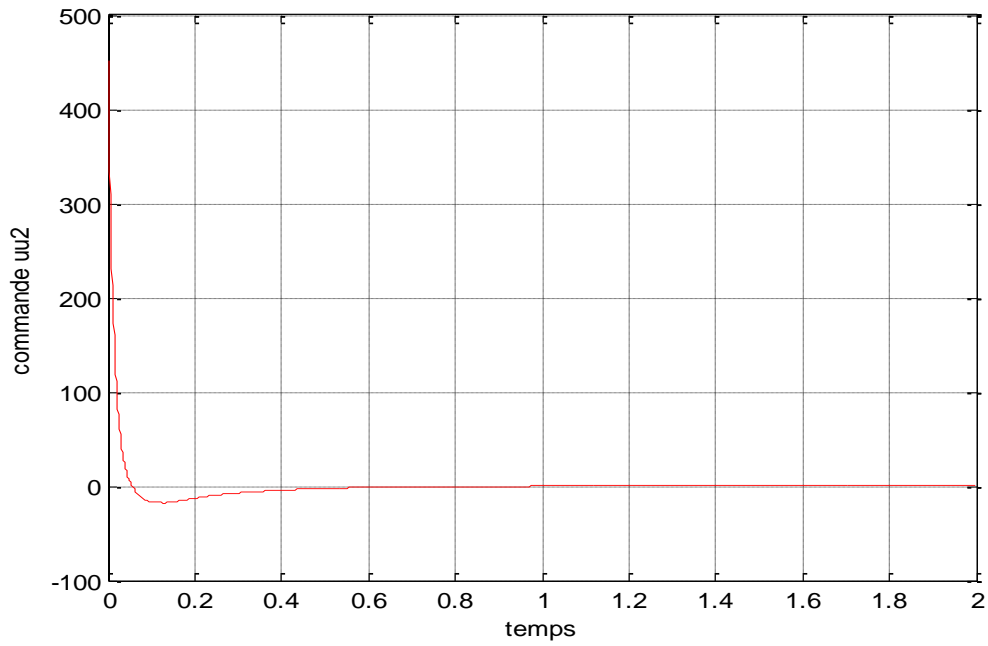


Figure III.21: La tension  $U_2$  au niveau de la 2<sup>ème</sup> articulation

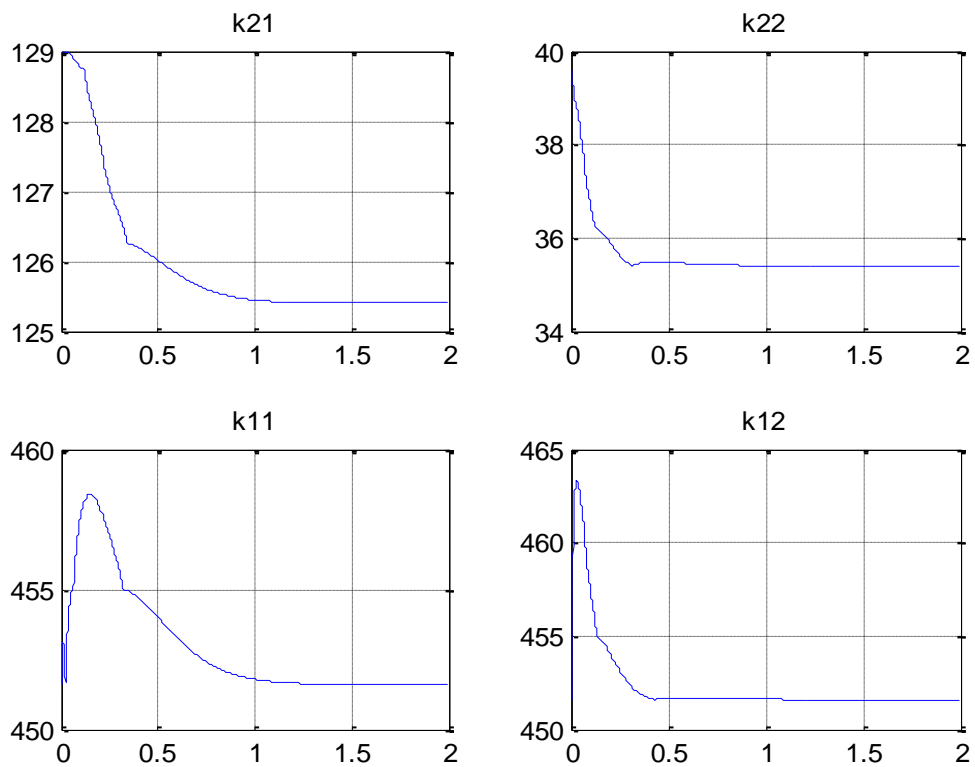


Figure III .22 : les différents paramètres

### **III.11 Interprétation :**

On constate à partir des résultats de la simulation présentés par la figures, que cette commande assure bien l'objectif de stabilisation, elle est considérablement rapide par rapport aux autres commandes, le temps de réponse est plus rapide.

On remarque que la réponse (articulations  $q_1, q_2$ ) atteint la consigne ([1.4 1.5]) (Figure III.18 et Figure III.19), et dans (Figure III .20) les erreurs s'annulent ( $e=q_d-q$ ) par ce que '  $q$ ' atteint ' $q_d$ ' et dans ce cas la commande  $u_1$  et  $u_2$  sont proportionnelles aux erreurs, sont illustrées par (Figure III.21 et Figure III.22).

la variation des paramètres ( $K_{21} K_{22} K_{11} K_{12}$ ) dans (Figure III.23).

### **III.12 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une structure de commande adaptative pour stabiliser le système une fois qu'il tend à être instable, cette structure de commande a été appliquée avec la logique floue.

Nous avons constaté que quel que soit les conditions initiales considérées, la poursuite s'effectue en minimisant l'erreur d'approximation d'une part et en assurant la stabilité du système global d'autre part. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité de l'approche proposée.

## Conclusion générale

---

### Conclusion Générale :

Le travail élaboré dans ce mémoire touche le domaine de la robotique ainsi que la théorie de commande des systèmes non linéaires.

Le domaine de la robotique est un axe très important pour le test de commande. Dans ce mémoire, nous avons donné des généralités sur les bras manipulateurs, où nous avons parlé un peu sur leurs modèles géométrique et cinématique. Une grande partie du mémoire a été consacrée à la dynamique de ces bras qui a été déduite par ce qu'on appelle le Lagrangien.

Du point de vue théorique, nous avons fait la synthèse de différentes commandes d'un bras manipulateur. La stabilité et la détermination des lois de commandes asymptotiquement stable, il s'agit de la commande à action proportionnelle dérivée et la commande adaptative.

Dans notre projet, nous avons présenté une commande adaptative floue robuste utilisant un système flou pour éliminer les incertitudes sur le système dynamique par rapport à son modèle et elle permet d'éliminer les erreurs de position existant dans la commande classique.

Les résultats montrent que les commandes utilisant la commande adaptative floue sont meilleures du point de vue robustesse et précision que les commandes classiques. Cela qui explique l'engouement des chercheurs à l'application des régulateurs flous adaptatifs à la commande des systèmes sachant que cette commande permet de réduire d'une manière significative le temps d'adaptation des paramètres que dans la commande classique.

Quant à la commande par un régulateur flou adaptatif, nous avons une bonne précision elle est très pratique que les autres commandes.

En simulation, nous avons fait des tests en poursuite de trajectoire et en régulation. Cette étude montre l'efficacité de cette commande adaptative pour les systèmes non linéaires.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] **Bernard BAYLE** .Modélisation et commande des robots Télécom Physique Strasbourg
- [2] **Bühler, H.** «Réglage par la logique floue », Collection électricité.
- [3] **BOUCHON-MEUNIER, B. MARSALA, C.** « Logique floue, principes, aide à la décision », Paris, Hermès Sciences Publication, 2003.
- [4] **ETIENNE DOMBRE, WISSAMA KHALIL** .Modification et commande des robots,1ere édition HERMS SCIENCE PUBLICATION PARIS ,1998.
- [5] **FAUCHER. J.** « les plans d'expériences pour le réglage et commande à base logique Floue ». Thèse de Doctorat, Institut national Polytechnique de Toulouse.  
Génie Electrique et Automatique
- [6] **FILIPov, AF.** Differentiel equations with discontinuous right-hand side.Amer.Math.Soc.Trans .62:199-231, (1960)
- [7] **GACÔGNE, LOUIS.** «Eléments de logique floue». Paris: Hermes 1997.
- [8] **GÉRALD H.** «processeurs flous», HE-ARC, BAPTISTE SAVOYE 26, CH-2610 ST-IMIER, Mai 2008.
- [9] **HASNAOUI.**”Etude des réseaux de neurones pour la commande adaptative d'un robot manipulateur», Mémoire d'ingénieur d'état en Electronique, Université de TIZI-OUZOU- Institut d'électronique,1997-1998
- [10] **Ignacio Herrera Aguilar**, « commande des bras manipulateurs et retour visuel pour des applications à la robotique de service », thèse doctorat, université Toulouse III, 2007.
- [11] **Jacques. J et E. Slotine**, « Applied Non linear Control » Prentice Hall, 1991.
- [12] **Jang.J. S.R** «Neuro Fuzzy Modeling Architectures Analyses and Applications». Department of Electrical Engineering and Computer Science University of California Berkeley July 1992
- [13] **JANTZEN, J.** "Tuning of Fuzzy PID Controllers", Technical University of Denmark: Dept. of Automation, Bldg326, DK-2800Lyngby, DANMARK. Tech. report no98-H871 (fpid), 30 Sep 1998.
- [14] **Jean-Louis Boimond**, « cours robotique », Université Angers.
- [15] **LAURANT F. SYLVIE G. ANDRE T.** « Commande floue 1, de la stabilisation à la supervision », Paris, Hermès Sciences Publication, 2003.
- [16] **MADAOUI M.** « Commande floue et neuro-floue d'un convertisseur direct AC/AC monophasé à structure minimale. Application à l'alimentation d'une machine asynchrone monophasé » Thèse de Magister, ENP Alger Février 2007.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [17] **MELLAH R.**, " Contribution la commande adaptative neuro floue. Application à la robotique" Thèse de Doctorat, Université des sciences et de la Technologie Houari Boumediene. Alger. Mai 2006.
- [18] **Mendel, J. M.** « Fuzzy logic systems for engineering: A tutorial », IEEE proceedings, Mar 1995.
- [19] **Merzouki. R.**, Cours et TP de Robotique de Manipulation, Master SMART, 09-10
- [20] **Nakoula, Y.** " Apprentissage des Modèles linguistiques flous, par Jeu des Règles Pondérées" Thèse de Doctorat, Université de Savoie, France, Juillet 1997.
- [21] **Wang, C. H. T. C. Lin, T. T. Lee, et H. L. Liu**, « Adaptive hybrid intelligent control for uncertain nonlinear dynamical systems », IEEE Trans. Syst. Man. Cybern., P. B: Cybern, Oct. 2002.
- [22] **Zadeh. L.A.** *A theory of approximate reasoning*. In J.E. Hayes, D. Michie and L.I. Mikulich, ed. Machine Intelligence, Vol. 9, pp. 149-194. Elsevier, Amsterdam, 1979.