

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERRI 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 :

**Lillia MESSAOUDENE.
Lynda SERIDJ.**

Mémoire dirigé par Mr Kh.SAIDI

Thème

**Etude comparative des techniques de
commandes d'un bras manipulateur.**

Mémoire soutenu publiquement le 14/07/2015 Devant les jurys composé de :

MAA, Moussa CHARIF

Grade, Dpt d'automatique, Président

MAA, Kheirredine SAIDI

Grade, Dpt d'automatique, promoteur

MCA, Rabah MELLAH

Grade, Dpt d'automatique, Examineur

MAA, Mourad ALLAD

Grade, Dpt d'automatique, Examineur

Remerciements

Je commence par dire louange à celui qui a fixé un terme à toute chose. je remercie le tout puissant pour m'avoir gratifié de santé et de moyens, sans l'usage desquels, il serait impossible de mener à terme notre travail.

Nos sincères remerciements en vers notre promoteur monsieur SAIDI.KH, pour ses conseils constructifs, sa disponibilité et son soutien tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Nos profondes gratitudes, d'avance aux membres du jury qui feront l'honneur d'évaluer ce travail de fin d'études.

Tous nos infinis remerciements vont à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation durant notre cursus (1997-2015), pour le riche savoir qu'ils nous ont transmis avec rigueur et dévouement.

Enfin, on exprime notre reconnaissance envers toute notre famille, tous nos amis, camarades et envers tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail ne serait ce par un modeste sourire d'encouragement à notre égard.

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents, qui ont consacré leur noble existence pour bâtir le mien.

Mon frère unique Arezki

Mes sœurs Assia, Dalila, Latifa et leurs familles

A Mh Ch

A Mon promoteur Mr. SAIDI

A bellabas bahia, Mr boudaa, Madame arhab, Mr lahouasi.

A la famille nait malek surtout lynda.

A mes amis: nassima, nadia, nawel, hayét, lamia Razika, celiouna, dihia, lynda, kahina, malha, Riadh, nounou, farhat, moh-k, djamel-M et djamel-S, azedineet a tous mes camarades et a toute la promotion Master 2 automatique(2015).

MESSAOUDENE IJLJA

Je dédie ce modeste travail a :

Mes chers parents qui ont consacrés leur noble existence pour bâtir le mien.

Mes frères yassine et m'hend

Ma sœur djamilla et son mari ouamar

Ma sœur kahina et son mari ramdane

Ma petite sœur sonia

A une personne exceptionnelle C.M

A mon promoteur Mr SAIDI

A la famille AISSANI.

A mes Amis

lyllia,dyhia,cylia,khalef,faredj,mokrane,yasmine,

lynda.....

Et à tous mes camarades et à la promotion Master 2 automatique (2015).

LYNDA.SERIDJ

Sommaire

Introduction général	01
Chapitre I : Généralités et modélisations des Robots.	
I.1-Introduction	03
I.2-Définition.....	03
I.3-Historique	04
I.4-constituants mécaniques d'un robot	04
I.4.1-Organe terminal	05
I.4.2-système mécanique articulé (S.M.A).....	05
I.4.3-les actionneurs	06
I.4.4-Capteurs	07
I.5-les espaces relatifs aux robots.....	07
I.5.1- l'espace articulaire	07
I.5.2- l'espace opérationnel	07
I.6-coordonnées homogènes.....	09
I.6.1-représentation d'un point	09
I.6.2-représentation d'une direction (vecteur libre)	09
I.6.3-Représentation d'un plan	09
I.7- Transformation homogène.....	10
I.7.1-Transformation des repères	10
I.7.2-transformation des vecteurs	11
I.7.3-transformation des plans	11

I.8-matrice de translation pure	11
I.9-matrice de rotation	12
I.10-Modélisation des bras manipulateurs	13
I.10.1-Modélisation géométrique	13
I.10.1.1- Modèle géométrique direct	13
I.10.1.1.1-Convention de Denavit Hartenberg (D-H).....	13
I.10.1.2- Modèle géométrique inverse	15
I.10.2- Modélisation cinématique.....	16
I.10.2.1-Modèle cinématique direct	16
I.10.2.2-Modèle cinématique inverse	17
I.10.3-Modélisation dynamique	17
I.10.3.1-Modèle dynamique inverse	17
I.10.3.2-Modèle dynamique directe	18
I.10.3.3- Les formalismes de Lagrange Euler	18
I.10.3.4- Modélisation dynamique d'un bras manipulateur à 2d.d.l	19
I.11- Quelques lois de commande classique des robots manipulateurs	22
I.11.1-Loi de commande proportionnelle dérivée avec compensation de l'effet de gravité (point à point)	22
I.11.2-Commande en poursuite de trajectoire	23
I.11.2.1.1-Interpolation polynomiale.....	24
I.11.2.1.2-Interpolation Bang-Bang	24
I.11.3-Loi de commande du couple calculé (computed torque control)	29
I.12-Conclusion	30

Chapitre II : La commande par mode glissant

II.1-Introduction	31
-------------------------	----

II.2-Les systèmes à structure variable	31
II.2.1-Configuration de base des SSV	31
II.2.1.1 : structure par commutation d'une contre-réaction d'état variable.....	31
II.2.1.2 : structure par commutation au niveau de l'organe de commande	32
II.2.1.3 : Structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la commande équivalente	33
II.3 Principe de commande par modes glissants	34
II.4-Mode glissant	35
II.4.1 Synthèse de la commande par mode glissant	36
II.4.1.1 Choix de la surface de glissement	36
II.4.1.2 L'existence de la condition de convergence	36
II.4.1.3 Synthèse de la loi de commande.....	37
II.4.1.3.1 La commande équivalente	38
II.4.1.3.2 La commande discontinue	39
II.5 Le phénomène du chattering.....	40
II.6 Solutions pour atténuer le phénomène de réticence	41
II.7 Conclusion	44
 Chapitre III : La logique floue	
III.1-Introduction	45
III.2 Définitions	45
III.3-Bref historique	47
III.4- la logique classique et la logique floue	48
III.5-Principe de la logique floue	48
III.5.1- Les variables floues (linguistique)	48
III.5.2- Les règle d'inférences	49

III.5.3- Les Opérateurs flous	50
III.6-Structure interne d'un système d'inférence flou (SIF)	50
III.6.1-la fuzzification	51
III.6.2-la base de règle	51
III.6.3-Méthode d'inférence floue	51
III.6.4-déffuzication	54
III.6.4.1- Défuzzification par calcul du centre de gravité.....	55
III.6.4.2-Défuzzification par calcul du maximum	55
III.7-types de régulateurs flous.....	56
III.7.1-Régulateur de type Mamdani	56
III.7.2- Régulateur flou de type Sugeno	57
III.8-la déférence entre type 1 et type-2	58
III.9-le concept des ensembles flous type-2	58
III.10-les ensembles flous type-2	59
III.11-la structure du système flou type2	61
III.10-conclusion	63

Chapitre VI : Simulation et application des commandes.

IV 1 Introduction.....	64
IV 2 Modèle dynamique de robot.....	64
IV 3Application des commandes classiques	65
IV.3.1. Application de la loi de commande point à point	65
IV.3.2 Application de la loi de commande du couple calculé.....	68
IV.4. Application des commandes développées.....	69
IV.4.1 Commande par modes glissants (MG).....	69
IV.4.1.1 la simulation en mode régulation.....	68

IV.4.1.2- Simulation en mode poursuite de trajectoire	74
IV.4.2-Test de régulation	77
IV.4.2 commande floue glissant	80
IV.4.2.1 conception du régulateur flou	80
IV.4.2.2 simulation de la commande floue glissant en mode régulation	81
IV.4.2.3 Simulation en mode Poursuite de trajectoire	83
IV.4.2.4 Test de régulation.....	86
IV.4.2.5 tes de robustesse.....	88
IV.5 Conclusion	89
Conclusion général et perspectives	90

Introduction générale

Introduction générale

La robotique est une science pluridisciplinaire qui comprend la mécanique, l'automatique, l'électrotechnique, le traitement de signal, l'informatique, communication.....

Jusqu'aux années 60, la robotique était plus un thème de science-fiction qu'une réalité. Puis, après avoir été essentiellement un domaine de recherche scientifique, la robotique a fait ensuite son apparition dans l'industrie. Aujourd'hui, elle commence à intégrer notre quotidien. Actuellement, de plus en plus de robots sont créés dont la technicité et les compétences s'améliorent régulièrement.

Un robot manipulateur est un système dynamique non-linéaire et fortement couplé qui souffre des incertitudes structurées et non structurées telles que la variation de charge utile, le frottement, les perturbations externes...etc. Dans les dernières décennies, beaucoup de travaux d'hybridation entre les commandes classiques et l'intelligence artificielle ont été développés pour le control de ce type de système, parmi ces techniques on trouve la commande par mode glissant et la logique floue.

Pour qu'un robot manipulateur accomplisse la tâche qui lui est assigné, il faut concevoir une commande bien adapté. La commande par modes glissants est une commande à structure variable. Elle est par nature une commande non linéaire. La caractéristique principale des systèmes à structure variable est que la loi de commande se modifie d'une manière discontinue.

La commande par mode glissant a largement prouvé son efficacité à travers les études théoriques rapportées, ces principaux domaines d'application sont la robotique et les moteurs électriques. L'avantage que procure une telle commande et qui la rend aussi importante est sa robustesse vis-à-vis des perturbations et des incertitudes du modèle. Cependant, ces performances sont obtenues au prix de certains inconvénients, comme le phénomène de chattering ou réticence provoqué par la partie discontinue de cette commande et qui peut avoir un effet néfaste sur les actionneurs. Ensuite nous allons concevoir un contrôleur flou et l'implanté a la place de la commande équivalente.

La logique floue est une extension de la logique classique qui permet la modélisation des imperfections des données et se rapproche dans une certaine mesure de la flexibilité du raisonnement humain.

Introduction générale

Les applications de la logique floue qui ont été réalisées dans la littérature montrent les avantages de cette technique quand le modèle des systèmes est difficile à implémenter, ce qui en fait un outil robuste, simple et adéquat pour traiter ces problèmes [02]. La puissance de la logique floue vient de sa capacité à décrire un phénomène de façon linguistique, puis de représenter ce phénomène par un faible nombre de règles.

L'intérêt de l'utilisation de la commande par mode glissant réside dans sa robustesse vis-à-vis des perturbations et des incertitudes du modèle, la précision, la réponse dynamique rapide, la stabilité, la simplicité de conception et de l'implantation.

Le travail que nous allons effectuer dans ce mémoire, consiste à la modélisation dynamique d'un bras manipulateur à deux degrés de liberté (2ddl), et simulations des lois de commande classique et en mode flou glissant

Ce manuscrit est divisé en quatre chapitres:

Le premier chapitre, sera axé sur la présentation des Généralités et la modélisation des Robots manipulateurs.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons une technique de commande robuste à savoir la commande par mode glissant.

Une présentation sur les aspects théoriques de la logique floue est donnée dans le troisième chapitre.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats de simulation des différentes commandes appliquées au bras manipulateur.

Chapitre I

GENERALITES ET MODELISATIONS DES ROBOTS.

I.1 Introduction

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

Ce chapitre présente quelques méthodes pour établir ces modèles, et l'identification des paramètres.

I.2 Définition

La définition générique stipule qu'un Robot est une machine physique qui modifie matériellement son environnement pour atteindre le but qui lui est fixé : la tâche désirée. Cette définition s'attache de trop près aux systèmes articulés. Il existe une autre définition plus générale qui considère un robot comme un «agent» artificiel, actif et autonome, ayant comme environnement l'espace physique.

Un agent est une entité équipée de la capacité de perception, saisissant son entourage grâce à des capteurs, prenant des décisions à l'aide du contrôleur, et enfin agissant en conséquence en usant des effecteurs ; il peut donc s'adapter seul aux variations de son environnement, de telle sorte que la tâche soit correctement exécutée en dépit de ces variations ; il doit comprendre un «corps» et un «cerveau».

- le Petit Larousse définit un robot comme étant un appareil automatique capable de manipuler des objets, ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe ou modifiable.
- 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. Son unité de commande utilise, notamment, un dispositif de mémoire et éventuellement de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances. Ces machines

polyvalentes sont généralement étudiées pour effectuer la même fonction de façon cyclique et peuvent être adaptées à d'autres fonctions sans modification permanente du matériel.[1]

Pour appelé un système un « Robot » il faut qu'il satisfait les propriétés suivantes :

- **La versatilité** un robot doit avoir la capacité d'exécuter une variété de tâches ou la même tâche de différentes manières.
- **Auto-adaptative** un robot il doit s'adapter à un environnement changeant pendant l'exécution de ses tâches

I.3 Historique

1947 : Premier manipulateur électrique télé-opéré.

1954 : Premier robot programmable.

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

1961 : Premier robot avec contrôle en effort.

1963 : Utilisation de la vision pour commander un robot.

1973 : premier robot mobile a roues

I.4 constituants mécaniques d'un robot

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

Actionneur=moteur

Axe =articulation

Corps=segment

Organe terminal

Effecteur=outil

Base

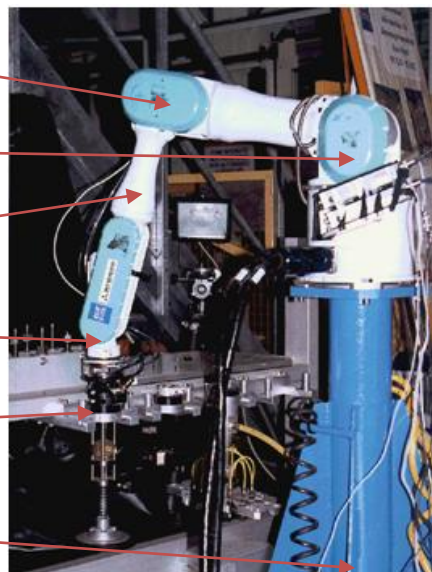


Figure [I.1] : un bras manipulateur

I.4.1 Organe terminal

Un robot, 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.

Un organe terminal, est une interface permettant au robot d'interagir avec son environnement. et /ou est un dispositif destiné à manipuler des objets (dispositifs de serrage, dispositifs magnétiques, à dépression, ...), ou à les transformer (outils, torche de soudage, pistolet de peinture, ...). Et il peut être multi-fonctionnel, au sens où il peut être équipé de plusieurs dispositifs ayant des fonctionnalités différentes, ou monofonctionnel, mais interchangeable.

I.4.2 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. 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.

✓ Articulation

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 d'une articulation est telle que $0 \leq m \leq 6$

Lorsque $m = 1$; ce qui est fréquemment le cas en robotique, l'articulation est dite simple soit :

a- Articulation rotoïde

C'est 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 comme le montre la figure [1 2] suivante :



Figure [I.2] : Symbole de l'articulation *rotoïde*.

b-Articulation prismatique

C'est 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 comme le montre la figure suivante.



Figure [I.3]: Symbole de l'articulation prismatique.

I.4.3 Les Actionneurs

Les actionneurs constituent l'outil indispensable pour convertir l'énergie hydraulique, électrique ou pneumatique en énergie mécanique. Cette conversion se fait par des mouvements rotatifs (moteurs) ou par des mouvements de translation linéaire (vérins à simple ou à double effet).

a-Actionneurs électriques (moteurs)

Le type de moteur se diffère selon le domaine d'utilisation, on trouve les moteurs à courant continu, moteurs pas à pas, synchrones et asynchrone...

b-actionneurs pneumatiques et hydrauliques (vérins)

C'est un actionneur de conception robuste et de simplicité de mise en œuvre, il est utilisé dans toutes les industries manufacturières. Il permet de reproduire les Actions manuelles d'un opérateur telles que : soulever, pousser, tirer, plier, serrer...et on a plusieurs sorte de vérins : simple effet, double effet, angulaire...

I.4.4 Capteurs

Ce sont des outils de perception qui permettent de gérer les relations entre le robot et son environnement, ils ont comme fonction de lire les variables relativement au mouvement du robot pour permettre un contrôle convenable. Il existe deux types de capteurs tels que :

a-Les capteurs proprioceptifs

Ils mesurent l'état mécanique interne du robot (comme les capteurs de position, de vitesse ou d'accélération).

b-Les capteurs extéroceptifs

Ils recueillent des informations sur l'environnement (comme la détection de présence, mesure de distance... etc.).

I.5 les espaces relatifs aux robots

I.5.1 l'espace articulaire

C'est celui dans le quel est représentée la situation de tous ses corps ; on utilise les variables articulaire.

I.5.2 l'espace opérationnel

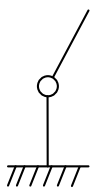
C'est celui dans le quel est représentée la situation de l'organe terminal, on utilise des coordonnées cartésiennes, sphérique et cylindrique.

Autre particularité des robots :

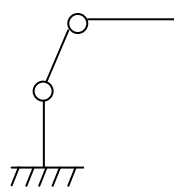
- **La redondance** Lorsque le nombre de degré de liberté de l'organe terminal est inférieur au nombre de degré de liberté de l'espace articulaire (nombre d'articulations motorisées).
- **Le degré de liberté (d.d.l.)** Le nombre de d.d.l. d'un mécanisme est le nombre de paramètres indépendants qui permettent de définir la position du mécanisme à un instant donné du mouvement.

Exemples

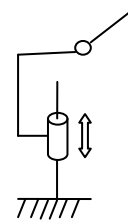
❖ **Chaînes simples ouvertes** comme le montre la Figure [I 4] suivante



1d.d.l



2d.d.l



2d.d.l

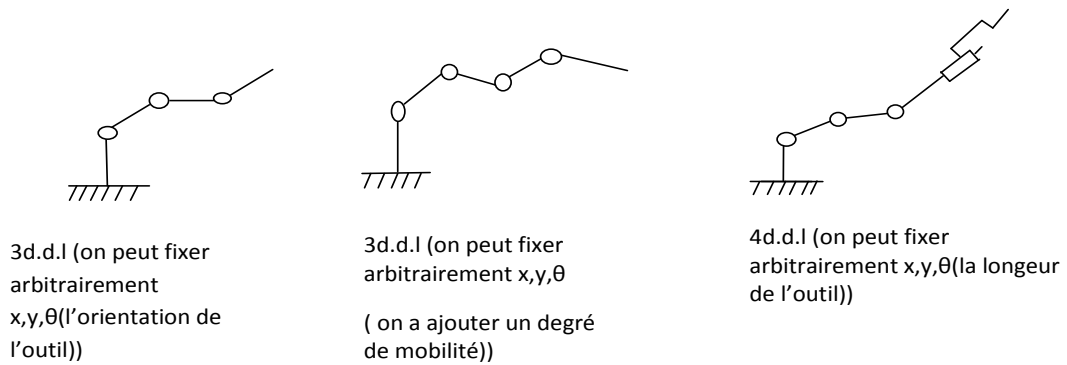


Figure [I.4] : chaines ouvertes simples

❖ Chaînes complexes

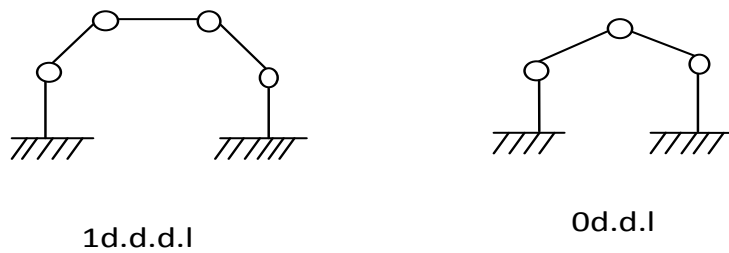


Figure [I.5] : chaines complexes

I.6 coordonnées homogènes

I.6.1 représentation d'un point

Un point P est représenté par ses coordonnées cartésiennes (P_x, P_y, P_z)

On appelle coordonnées homogènes du point P les termes : wP_x, wP_y, wP_z et w ou w est un facteur d'échelle (en robotique $w=1$).

Le vecteur de coordonnées homogènes est :

$$p = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} \tag{I.1}$$

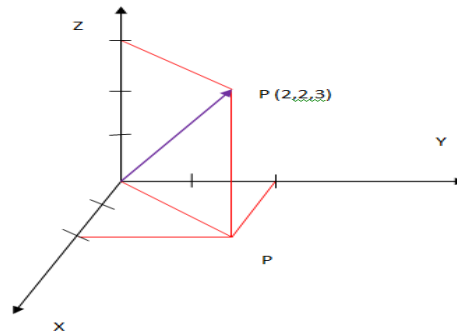


Figure [I.6] : représentation d'un point

I.6.2 représentation d'une direction (vecteur libre)

La représentation d'une direction se fait aussi par quatre composantes, mais la quatrième est nulle, indiquant un point à l'infini. Si l'on note U_x , U_y , U_z les coordonnées cartésiennes d'un vecteur unitaire u , en coordonnées homogènes on écrit :

$$U = \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{I.2})$$

I.6.3 Représentation d'un plan

Le plan $\alpha_x + \beta_y + \gamma_z + \delta = 0$ est représenté par un vecteur ligne Q :

$$Q = [\alpha \quad \beta \quad \gamma \quad \delta] \quad (\text{I.3})$$

Pour tout point P appartenant au plan Q , le produit matriciel Qp est nul.

$$Qp = [\alpha \quad \beta \quad \gamma \quad \delta] \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{I.4})$$

I.7 Transformation homogène

I.7.1 Transformation des repères

Faisons subir une transformation de translation et/ou de rotation, au repère R_i , cette transformation va l'amener au repère R_j , et elle est définie par la matrice ${}^i T_j$ appelée matrice de transformation homogène de dimension (4x4), telle que:

$${}^i T_j = [s_j \quad n_j \quad a_j \quad p_j] = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (I.5)$$

Où ${}^i s_j$, ${}^i n_j$ et ${}^i a_j$ désignent respectivement les vecteurs unitaires suivant les axes x_j , y_j et z_j du repère R_j exprimés dans le repère R_i et où ${}^i P_j$ est le vecteur exprimant l'origine du repère R_j dans le repère R_i .

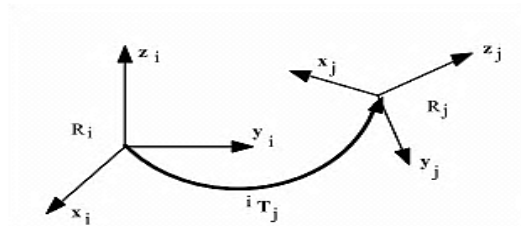


Figure [I.7] : Transformation des repères.

On peut écrire la matrice ${}^i T_j$ de transformation sous la forme :

$${}^i T_j = \begin{bmatrix} {}^i A_j & {}^i P_j \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^i s_j & {}^i n_j & {}^i a_j & {}^i P_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (I.6)$$

Avec :

- ${}^i A_j$ est la matrice de rotation.
- ${}^i P_j$ est le vecteur de translation.

I.7.2 transformation des vecteurs

Soit un vecteur ${}^i p_1$ définissant le point P_1 dans le repère R_j (Figure [I.8]), pour calculer les coordonnées du point P_1 dans le repère R_i on utilise l'équation suivante :

$${}^i p_1 = {}^i(O_i P_1) = {}^i s_j \cdot p_{1x} + {}^i n_j \cdot p_{1y} + {}^i a_j \cdot p_{1z} + {}^i P_j = {}^i T_j \cdot {}^j p_1 \quad (I.7)$$

La matrice ${}^i T_j$ permet donc d'exprimer dans le repère R_i les coordonnées d'un point données dans le repère R_j .

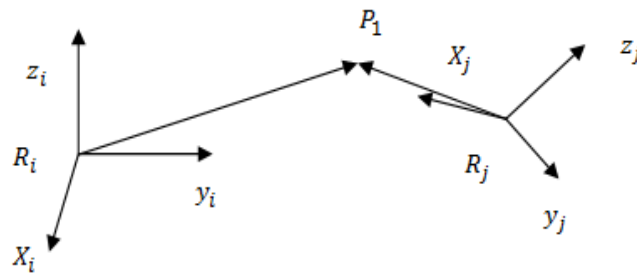


Figure [I.8] : transformation d'un vecteur

I.7.3 transformation des plans

La position relative d'un point par rapport a un plan est indépendante des transformations appliquées a l'ensemble {point, plan}.

$${}^jQ^j p = {}^iQ^i p = {}^iQ^i T_j^j p \tag{I.8}$$

Tel que : ${}^jQ = {}^iQ^i T_j$

I.8 matrice de translation pure

Soit **Trans** (a,b,c) cette transformation, ou a, b, c, désignent les composante de la translation le long des axes **x**, **y** et **z** respectivement. L'orientation étant conservée dans cette transformation.

$${}^i T_j = \mathbf{Trans} (a, b, c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{I.9}$$

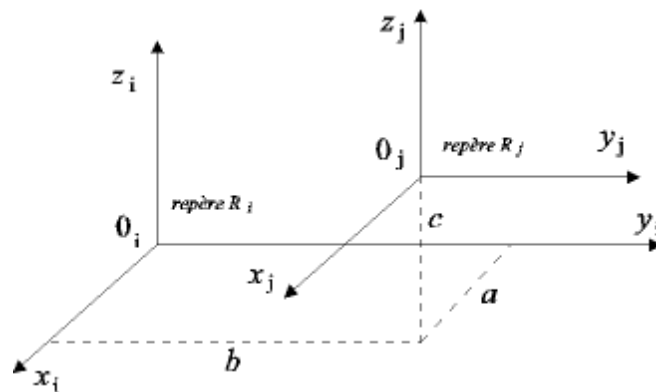


Figure [I.9] : transformation de translation pure

I.9 matrice de rotation

Les trois matrices de rotation sont définies comme suit :

- Matrice de rotation par rapport à l'axe x :

$$\text{ROT}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{I.10})$$

- Matrice de rotation par rapport à l'axe y :

$$\text{ROT}(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{I.11})$$

- Matrice de rotation par rapport à l'axe z :

$$\text{ROT}(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{I.12})$$

I.10 Modélisation des bras manipulateurs**I.10.1 Modélisation géométrique**

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

- Modèle géométrique direct.
- Model géométrique inverse.

I.10.1.1 Modèle géométrique direct

La Conception et la commande des robots nécessitent le calcul de certains modèles mathématiques tel que le modèle géométrique direct qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction des variables articulaires du mécanisme. Cette relation s'exprime à l'aide de l'équation suivante :

$$X = f(q) \quad (\text{I.13})$$

où X est le vecteur des coordonnées opérationnelles exprimées dans le repère de référence R_0 , et q les variables articulaires

La modélisation du robot de façon systématique et automatique exige une méthode adéquate pour

La description de leur morphologie. Plusieurs méthodes et notations ont été proposées, la plus répandue est celle de Denavit –Hartenberg

I.10.1.1.1 Convention de Denavit Hartenberg (D-H)

Méthode destinée à systématiser la modélisation de n'importe quel type de Robot série.

Ses principaux avantages sont :

- simplification maximale du modèle géométrique
- établissement d'une norme reconnue par tous.

❖ Principe

Fixer des repères à chaque corps du Robot.

Calculer les matrices homogènes entre chaque corps.

Calculer la matrice entre la base et l'organe terminal.

❖ Hypothèses

on suppose que le Robot est constitué d'un chainage de $n+1$ corps liés entre eux par n articulations rotoïdes ou prismatiques. à chaque corps on associe un repère R_i . les repères sont numérotés de 0 à n . la i^{me} articulation, dont la position est notée q_i , est le point qui relie les corps C_{j-1} et C_j .

Méthodologie à suivre pour décrire les robots à structure ouverte simples.

Une structure ouverte simple est composée de $n+1$ corps notés C_0, \dots, C_n et de n articulations

Le corps C_0 désigne la base du robot 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 10]).

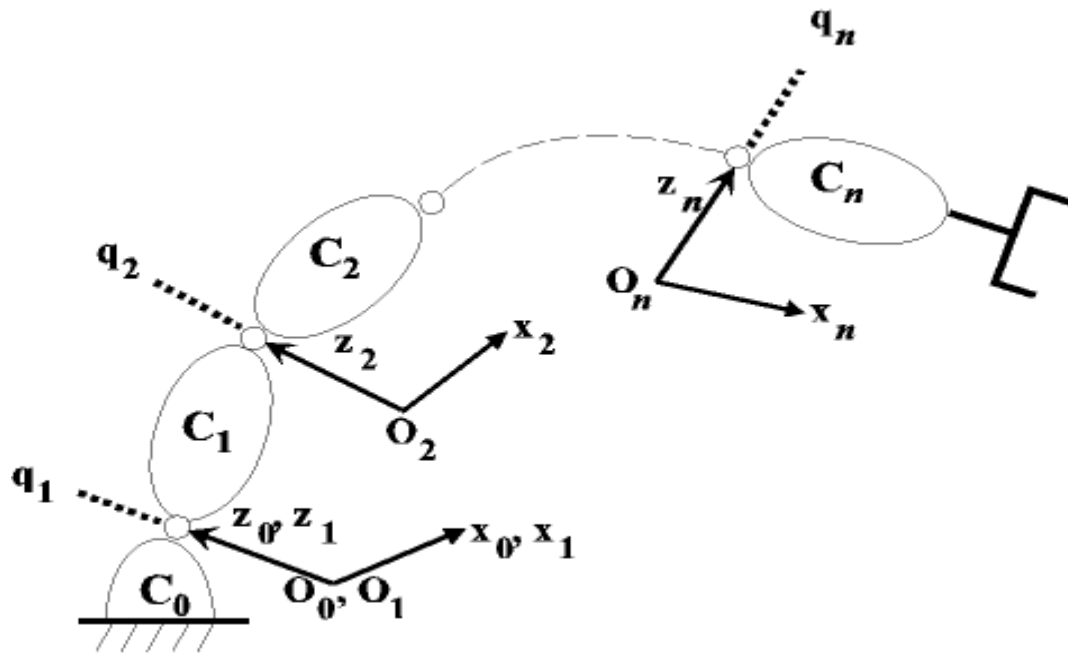


Figure [I.10] : Robot à structure ouverte simple

❖ Détermination du repère R_j (lié au corps C_j)

- 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 colinéaire, le choix de x_j n'est pas unique.

❖ paramètres de Denavit-Hartenberg

Le passage du repère R_{j-1} au repère R_j s'exprime en fonction des quatre paramètres suivants :

1. α_j : angle entre les axes z_{j-1} et z_j correspondant à une rotation autour de x_{j-1}
2. d_j : distance entre z_{j-1} et z_j le long de x_{j-1}
3. θ_j : angle entre les axes x_{j-1} et x_j correspondant à une rotation autour de z_j
4. r_j : distance entre x_{j-1} et x_j le long de z_j

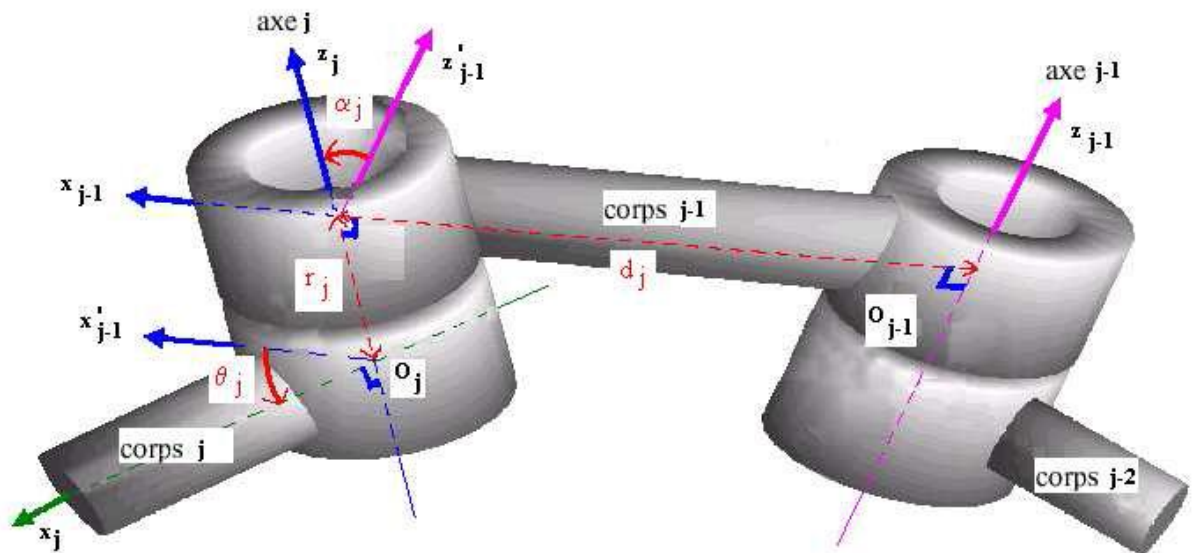


Figure [I.11] : paramètres géométriques dans le cas d'une structure ouverte simple

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

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

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_j) & -\sin(\theta_j) & 0 & d_j \\ \cos(\alpha_j)\sin(\theta_j) & \cos(\alpha_j)\cos(\theta_j) & -\sin(\alpha_j) & -r_j\sin(\alpha_j) \\ \sin(\alpha_j)\sin(\theta_j) & \sin(\alpha_j)\cos(\theta_j) & \cos(\alpha_j) & r_j\cos(\alpha_j) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{I.14})$$

I.10.1.2 Modèle géométrique inverse

Le modèle géométrique direct d'un robot permettrait de calculer les coordonnées opérationnelles donnant la situation de l'organe terminal en fonction des coordonnées articulaires.

Le problème inverse consiste à calculer les coordonnées articulaires correspondant à une situation donnée de l'organe terminal. Lorsqu'elle existe, la forme explicite qui donne toutes les solutions possibles (il y a rarement unicité de solution) constitue ce que l'on appelle le modèle géométrique inverse (MGI).

$$\begin{aligned} f^1 : M &\longrightarrow N \\ x &\longmapsto q = f^1(x). \end{aligned} \quad (\text{I.15})$$

Supposons que la situation x d'un bras manipulateur à n liaisons soit exprimée par un nombre m minimal de paramètres. Supposons par ailleurs que x soit une situation accessible par le

bras manipulateur, c'est-à-dire que la situation appartient à l'espace de travail. Alors (dans la majorité des cas) :

- si $n < m$, il n'existe pas de solution au MGI ;
- si $n = m$, il existe un nombre fini de solutions en dehors de certaines configurations, appelées configurations singulières ;
- si $n > m$, il existe une infinité de solutions.

On sait que dans les cas où $n < 6$ les bras manipulateurs sont tous solubles, c'est-à-dire qu'il existe une solution connue au MGI. [6]

I.10.2 Modélisation cinématique

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

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

I.10.2.1 Modèle cinématique direct

Le modèle cinématique direct d'un robot m -manipulateur décrit les vitesses des coordonnées Opérationnelles en fonction des vitesses articulaires. Il est obtenu comme suit :

$$\dot{X} = J(q) \dot{q} \quad (\text{I.16})$$

Où $J(q) = \frac{\partial x}{\partial q}$ désigne la matrice jacobienne ($m \times n$) du mécanisme. Et q est la configuration articulaire.

On peut aussi calculer la matrice jacobienne par dérivation de MGD, $X = f(q)$ à partir de la relation suivante :

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i(q)}{\partial q_j} \quad i = 1, \dots, m ; j = 1, \dots, n \quad (\text{I.17})$$

I.10.2.2 Modèle cinématique inverse

L'objectif du modèle cinématique inverse est de calculer, à partir d'une configuration q donnée, les vitesses articulaires \dot{q} qui assurent au repère terminal une vitesse optimale X imposée.

$$\dot{q} = J^{-1}(q) \dot{X} \quad (\text{I.18})$$

I.10.3 Modélisation dynamique

Le modèle dynamique est l'ensemble des équations mathématique qui relie entre les couples (et/ou forces) appliqués aux actionneurs et les positions, vitesses et accélérations articulaires de ces Robots.

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.10.3.1 Modèle dynamique inverse

Le modèle dynamique inverse est représenté sous la forme :

$$\Gamma = f(q, \dot{q}, \ddot{q}, f_e) \quad (\text{I.19})$$

Ou

- Γ : vecteur des couples/forces des actionneurs
- q : vecteur des positions articulaires ;
- \dot{q} : vecteur des vitesses articulaires ;
- \ddot{q} : vecteur des accélérations articulaires ;
- f_e : vecteur représentant l'effort extérieur (forces et moments) qu'exerce le robot sur l'environnement.

I.10.3.2 Modèle dynamique directe

Le modèle dynamique directe est celui qui exprime les accélérations articulaires en fonction des positions, vitesse et couple des articulations. Il est donc représenté comme suit :

$$\ddot{q} = g(q, \dot{q}, \Gamma, f_e) \quad (\text{I.20})$$

La méthode la plus utilisée pour calculer le modèle dynamique est la méthode d'Euler-Lagrange.

I.10.3.3 Les formalismes de Lagrange Euler

Le formalisme d'Euler-Lagrange 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 du robot à travers les équations du mouvement. L'approche d'Euler-Lagrange est donnée par l'équation.

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{q}_i} = \tau_i \quad (\text{I.21})$$

Avec E_D est l'énergie de dissipation en cas de présence de frottement visqueux, τ_i est la force ou 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 :

$$L = E_c - E_p \quad (\text{I.22})$$

Avec :

E_c : L'énergie cinétique.

E_p : L'énergie potentielle

I.10.3.4- Modélisation dynamique d'un bras manipulateur à 2d.d.l.

Le robot manipulateur à 2 dll utilisé dans ce travail est schématisé dans la figure suivante :

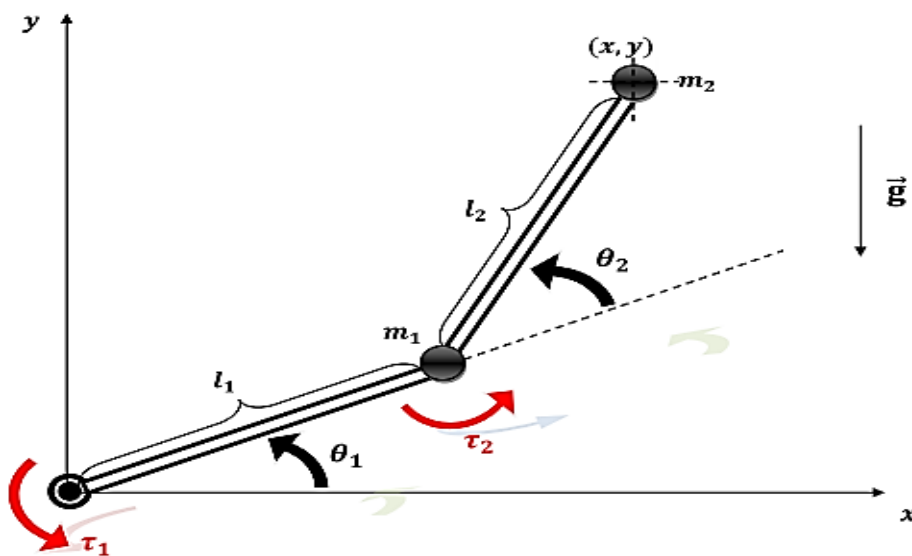


Figure [I.12] : Robot manipulateur à 2 d.d.l.

- θ_i L'angle adjoint à chaque bras avec l'axe des abscisses
- m_i La masse située au niveau de l'extrémité de chaque axe.
- l_i Longueur du chaque axe.
- τ_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 τ_1 et τ_2 fournis par les actionneurs dont on négligera la dynamique.

Les coordonnées cartésiennes sont :

$$\text{A la 1}^{\text{ère}} \text{ extrémité : } \begin{cases} x_1 = l_1 \cos \theta_1 \\ y_1 = l_1 \sin \theta_1 \end{cases} \quad (\text{I.23})$$

$$\text{A la 2}^{\text{ème}} \text{ extrémité : } \begin{cases} x_2 = x_1 + l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) \\ y_2 = y_1 + l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (\text{I.24})$$

La forme standard de l'équation du mouvement d'un robot manipulateur qui se présente sous la forme suivante :

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (\text{I.25})$$

Avec

❖ **Matrice d'inertie $M(q)$**

$M(q)$ est symétrique définie positive.

❖ **Vecteur de forces centripètes / Coriolis $C(q, \dot{q})$**

$C(q, \dot{q})$ est quadratique en \dot{q} .

$$C(q, \dot{q}) = C_m(q, \dot{q})\dot{q}$$

Dans $C_m(q, \dot{q})$, 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.

❖ **Energie cinétique**

L'énergie cinétique du bras manipulateur à 2ddl (figure [I.12]) est donnée comme suit :

$$E_c = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 \quad (\text{I.26})$$

❖ **Energie potentielle**

La seule source d'énergie potentielle est la gravitation. L'énergie potentielle du bras manipulateur à 2ddl (figure [I.12]) est donnée comme suit :

$$E_p = (m_1 + m_2)g l_1 \sin \theta_1 + m_2 g l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (\text{I.27})$$

❖ **Lagrangien du système**

$$L = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}m_2 l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 - [(m_1 + m_2)g l_1 \sin \theta_1 + m_2 g l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] \quad (\text{I.28})$$

Le modèle dynamique du robot manipulateur est donné sous la forme d'équations différentielles non linéaires suivantes :

$$\begin{aligned} \bullet \quad \tau_1 = & [(m_1 + m_2)l_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2] \ddot{\theta}_1 + [m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2] \ddot{\theta}_2 - \\ & m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_2 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 + (m_1 + m_2)g l_1 \cos \theta_1 + m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (\text{I.29})$$

$$\bullet \quad \tau_2 = [m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2] \ddot{\theta}_1 + [m_2 l_2^2] \ddot{\theta}_2 + m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 + m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (\text{I.30})$$

En réécrivant les équations du système sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 & m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 \\ m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 & m_2 l_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_2 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 \\ m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)g l_1 \cos \theta_1 + m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{I.31})$$

L'application de formalisme de Lagrange (I.28) sur le système (I.31) amène à l'équation suivante :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_1} = \tau_1 \\ \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_2} = \tau_2 \end{cases} \quad (\text{I.32})$$

On identifie les différents termes de l'équation (I.25) comme suit:

$$M(q) = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2 \cos \theta_2 & m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos \theta_2 \\ m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos \theta_2 & m_2l_2^2 \end{bmatrix} \quad (I.33)$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_2l_1l_2\dot{\theta}_2(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 \\ m_2l_1l_2\dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} \quad (I.34)$$

$$C_m(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -2m_2l_1l_2\dot{\theta}_1 \sin \theta_2 & -m_2l_1l_2\dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\ m_2l_1l_2\dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (I.35)$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)gl_1 \cos \theta_1 + m_2gl_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) \\ m_2gl_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (I.36)$$

I.11 Quelques lois de commande classique des robots manipulateurs

I.11.1 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.

Considérons Le modèle dynamique sans frottement et sans perturbation décrit par l'équation

$$(I.25) \text{ suivante} \quad M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau$$

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 :

$$\tau = G(q) - k_p \tilde{q} - k_v \dot{\tilde{q}} \quad (I.37)$$

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.

$\dot{\tilde{q}} = \dot{q} - \dot{q}_d = \dot{\tilde{q}}$ est l'écart en vitesse.

Le calcul de la dynamique en boucle fermée nous donne la relation suivante

$$\ddot{\tilde{q}} = -M(q) \left[(C(q, \dot{q}) + k_v) \dot{\tilde{q}} + k_p \tilde{q} \right] \tag{I.38}$$

Avec $\ddot{\tilde{q}} = \ddot{q} - \ddot{q}_d = \ddot{\tilde{q}}$ l'écart en accélération.

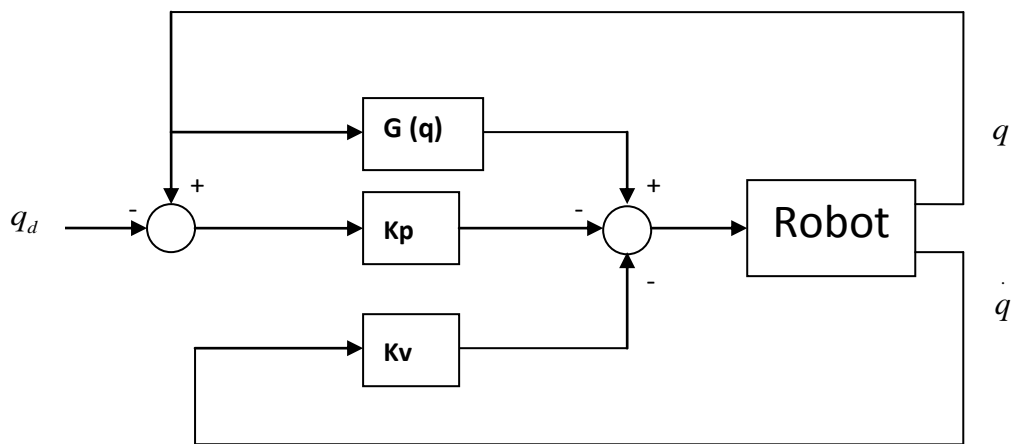


Figure [I.13] : Schéma bloc d'une commande point à point

I.11.2 Commande en poursuite de trajectoire

I.11.2.1 Générateur 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, vitesse et accélération qui sont fonction du temps et qui assurent le passage du robot par une trajectoire désirée d'une configuration initiale à une configuration finale désirée.

On peut distinguer les classes de mouvement suivantes:

- le mouvement entre deux points avec trajectoire libre.
- Le mouvement entre deux points via des points intermédiaires, spécifiés notamment pour éviter les obstacles, avec trajectoire libre.
- Le mouvement entre deux points avec trajectoire.
- Le mouvement entre deux points via des points intermédiaires avec trajectoire spécifiée.

Considérons un robot à n degré de liberté où:

$q^i = [q_1^i \dots q_n^i]^T$ Représente le vecteur des positions initiales, et $q^f = [q_1^f \dots q_n^f]^T$ le vecteur des positions finales.

Le mouvement pour passer de q^i à q^f s'écrit :

$$q_d(t) = q^i + r(t)D \quad (\text{I.49})$$

Avec : $D = q^f - q^i$

$r(t)$ est le polynôme d'interpolation.

Plusieurs fonctions permettent de satisfaire le passage de q^i à $t = 0$ vers q^f à $t = t_f$, tel que l'interpolation polynomiale et l'interpolation bang-bang.

I.11.2.1.1 Interpolation polynomiale

Il existe plusieurs modes d'interpolation polynomiale parmi lesquels l'interpolation linéaire, l'interpolation par des polynômes de degrés trois et de degré cinq.

a- Interpolation linéaire

Il s'agit de l'interpolation la plus simple, où le mouvement de chaque articulation est décrit par une équation linéaire en temps. L'équation du mouvement s'écrit :

$$q_d(t) = q^i + r(t)D \quad \text{Avec } r(t) = \frac{t}{t_f} \quad (\text{I.40})$$

$$\text{Ainsi } \dot{q}_d(t) = \dot{r}(t)D \quad \text{avec } \dot{r}(t) = \frac{1}{t_f} \quad (\text{I.41})$$

Et $\ddot{q}_d(t) = \ddot{r}(t)D$ avec $\ddot{r}(t) = \dot{\theta}$ (I.42)

Les trajectoires pour ce type d'interpolation sont continues en position mais discontinues en vitesse tel qu'il est montré sur la figure I.8 pour une articulation quelconque j. C'est la raison pour laquelle ce type de mouvement est inacceptable sur les robots réels.

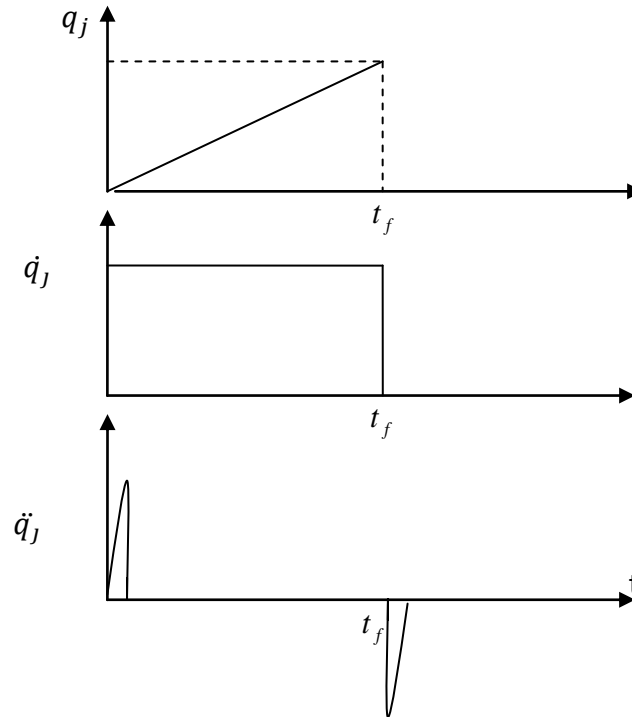


Figure [I.14] : Polynôme d'interpolation linéaire.

b- Interpolation polynomiale de degré 3

Si l'on impose une vitesse nulle aux points de départ et d'arrivée, on ajoute deux contraintes aux deux contraintes de position. Le degré minimal du polynôme qui satisfait ces quatre contraintes est de degré trois et a pour forme générale :

$$q_d(t) = q^i + [3(\frac{t}{t_f})^2 - 2(\frac{t}{t_f})^3]D \tag{I.43}$$

Ainsi $\dot{q}_d(t) = [6(\frac{t}{t_f}) - 6(\frac{t^2}{t_f^2})]D$ (I.44)

Et $\ddot{q}_d(t) = [(\frac{6}{t_f}) - 12(\frac{t}{t_f^2})]D$ (I.45)

La figure [I.15] montre l'évolution des positions vitesses et accélérations pour n'importe quelle articulation j . Ce type d'interpolation assure la continuité des trajectoires en positions et vitesses, mais pas celle des accélérations.

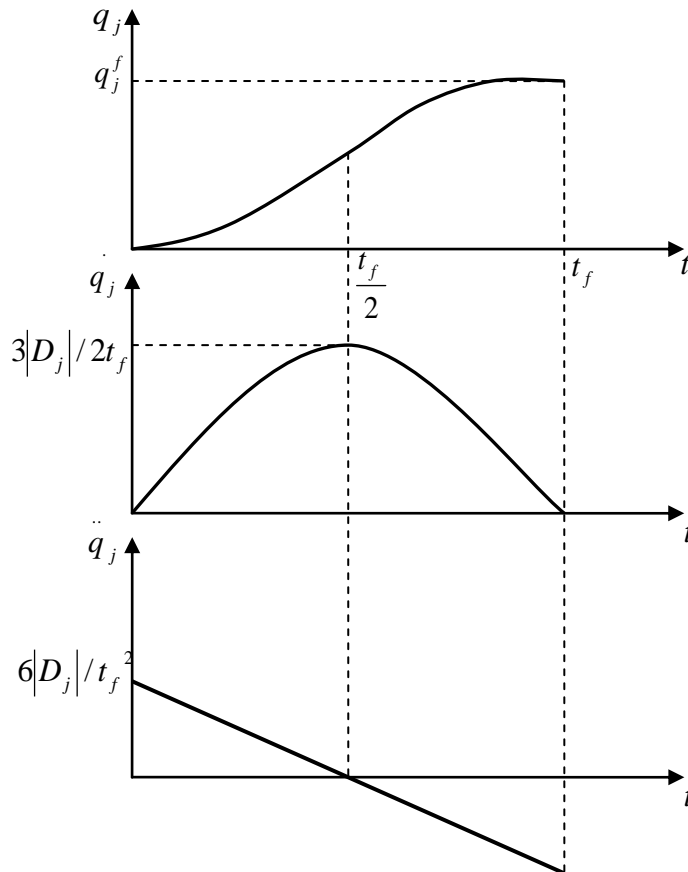


Figure [I.15] : Polynôme d'interpolation de degré 3

La vitesse est maximale lorsque $t = t_f / 2$, Elle vaut donc

$$\left| \dot{q}_{f \max} \right| = \frac{3|D_j|}{2t_f} \quad \text{Avec } |D_j| = |q_j^f - q_j^i| \quad (\text{I.46})$$

L'accélération est maximale à $t = 0$ et $t = t_f$, elle a pour valeur :

$$\left| \ddot{q}_{f \max} \right| = \frac{6|D_j|}{t_f^2} \quad (\text{I.47})$$

c Interpolation polynomiale de degré 5

L'interpolation polynomiale de degré cinq assure des trajectoires continues en positions, vitesses et accélérations. Le polynôme est obtenu en employant les conditions aux limites

$$\text{suivantes } q(0) = q_i, q(t_f) = q_f, \dot{q}(0) = 0, \dot{q}(t_f) = 0, \ddot{q}(0) = 0, \ddot{q}(t_f) = 0$$

Pour satisfaire les six contraintes, le polynôme d'interpolation doit être de degré cinq :

$$r(t) = 10\left(\frac{t}{t_f}\right)^3 - 15\left(\frac{t}{t_f}\right)^4 + 6\left(\frac{t}{t_f}\right)^5 \tag{I.48}$$

Les trajectoires des positions, vitesses et accélérations pour l'articulation j sont présentées à la figure [I.16]. Les vitesses et accélérations maximales ont pour expressions :

$$\left| \dot{q}_{f \max} \right| = \frac{15|D_j|}{8t_f} \tag{I.49}$$

$$\left| \ddot{q}_{f \max} \right| = \frac{10|D_j|}{\sqrt{3}t_f^2} \tag{I.50}$$

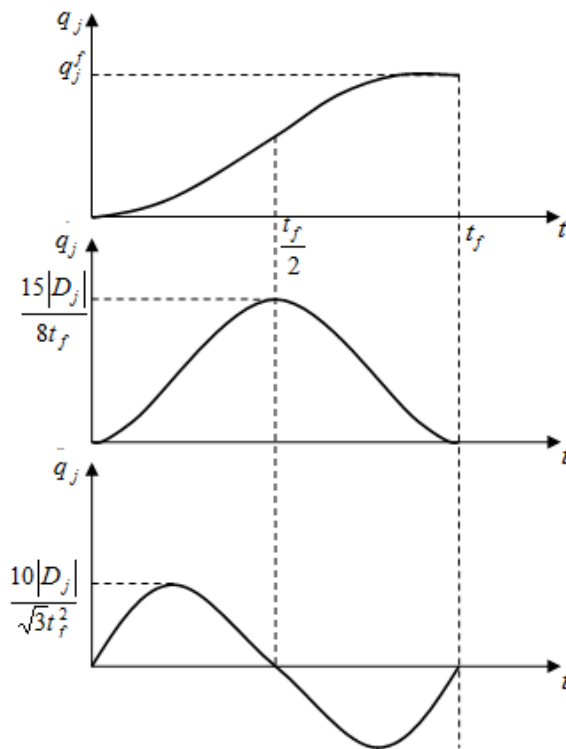


Figure [I.16] : Polynôme d'interpolation de degré 5

I.11.2.1.2 Interpolation Bang-Bang

Le mouvement est matérialisé par une phase d'accélération jusqu'à $t_f/2$ et de décélération de $t_f/2$ à t_f

$$\begin{cases} q_d(t) = q^i + 2\left(\frac{t}{t_f}\right)^2 D & 0 \leq t \leq t_f/2 \\ q_d(t) = q^i + [-1 + 4\left(\frac{t}{t_f}\right) - 2\left(\frac{t}{t_f}\right)^2] D & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (I.51)$$

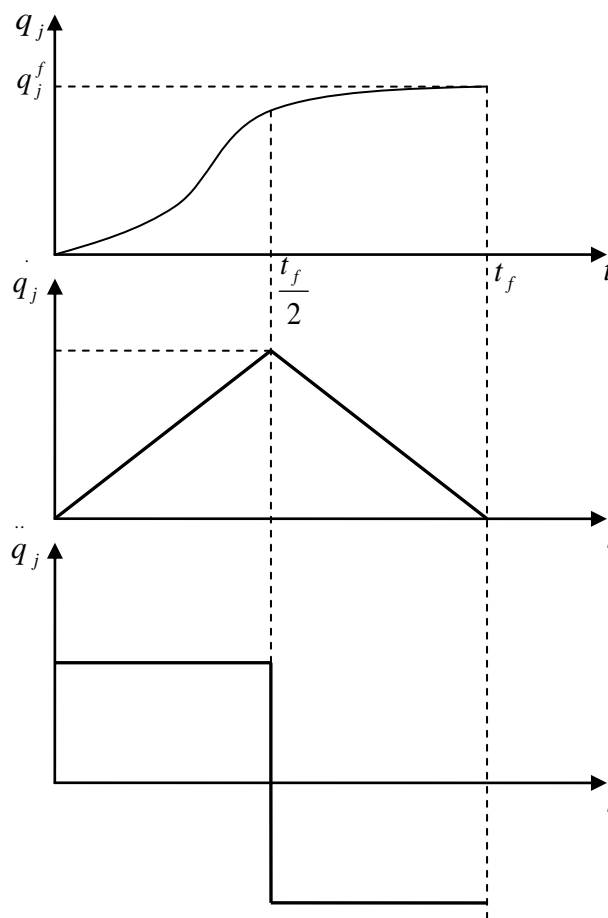


Figure [I.17] : l'allure des positions, vitesses et accélérations.

I.11.3 Loi de commande du couple calculé (computed torque control)

Cette loi de commande ressemble à la classe des lois de commande par découplage non linéaire. Elle consiste à poursuivre une trajectoire prédéfinie par $q_d(t)$, $\dot{q}_d(t)$ et $\ddot{q}_d(t)$ 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.

Partant du même modèle dynamique du robot, la loi de commande est donnée par la relation suivante :

$$\tau = M(q)[\ddot{q}_d + k_p \tilde{q} + k_v \dot{\tilde{q}}] + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \tag{I.52}$$

Où k_p et k_v sont des matrices symétriques et définies positives; et $\tilde{q} = q_d - q$ désignant l'erreur de poursuite en position. Ainsi la dynamique en boucle fermée du robot est obtenue en remplaçant le couple du modèle dynamique par la loi de commande :

$$\ddot{\tilde{q}} + k_p \tilde{q} + k_v \dot{\tilde{q}} = 0 \tag{I.53}$$

Le choix d'une matrice diagonale pour k_p et k_v nous assure un découplage et ainsi le système est linéaire découplé par feedback. Le schéma bloc de la loi de commande du couple calculé est donné par la figure [I.18].

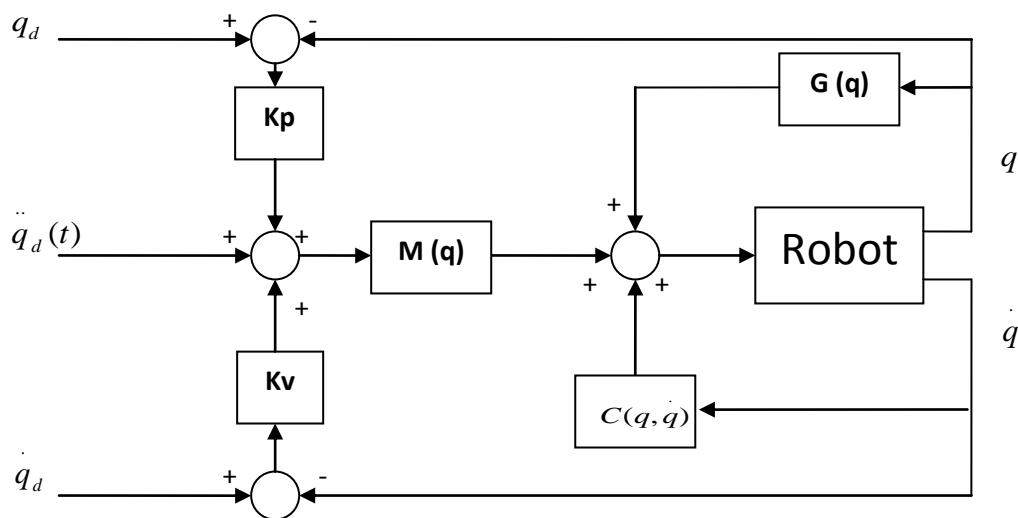


Figure [I.18] : Schéma bloc de la commande du couple calculé.

I.12 Conclusion

Dans ce chapitre on a essayé de donner un aperçu sur les Robot manipulateur et ces différents composants ainsi que les différents espaces relatifs au robot et ces particularités, nous avons aussi présenté les outils mathématiques utilisés dans la robotique.

Plusieurs niveaux de modélisation sont possibles selon les objectifs, les contraintes de la tâche et les performances recherchées, il ya la modélisation géométrique, cinématique, et dynamique. on a vue que La robotique est une science pluridisciplinaire qui comprend la mécanique, l'automatique l'électrotechnique, le traitement de signal, l'informatique, la communication, ainsi que d'autres disciplines.

Ce chapitre est une base pour le développement ultérieur du modèle dynamique du robot que nous allons utiliser pour la commande.

Dans le chapitre suivant, nous allons parler des notions de la théorie de la commande par mode glissant, le principe du contrôleur à mode glissant et la conception de la commande par mode glissant.

Chapitre II

LA COMMANDE PAR MODE GLISSANT

II.1 Introduction

Pour qu'un robot manipulateur accomplisse la tâche qui lui est assigné, il faut concevoir une commande bien adapté. La commande par modes glissants est une commande à structure variable. Elle est par nature une commande non linéaire. La caractéristique principale des systèmes à structure variable est que la loi de commande se modifie d'une manière discontinue.

La commande par mode glissant a largement prouvé son efficacité à travers les études théoriques rapportées, ces principaux domaines d'application sont la robotique et les moteurs électriques. L'avantage que procure une telle commande et qui la rend aussi importante est sa robustesse vis-à-vis des perturbations et des incertitudes du modèle. Cependant, ces performances sont obtenues au prix de certains inconvénients, comme le phénomène de chattering ou réticence provoqué par la partie discontinue de cette commande et qui peut avoir un effet néfaste sur les actionneurs, [9],[10]

II.2 Les systèmes à structure variable

Les Systèmes à Structures Variables (VSS) sont connus pour leur robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et les perturbations externes. La commande par SSV a été appliquée sur de nombreux systèmes à savoir ; les robots, les moteurs (DC et AC), [11].

II.2.1 Configuration de base des SSV

Dans les systèmes de réglage à structure variable, on distingue trois configurations de base:

II.2.1.1 structure par commutation d'une contre-réaction d'état variable

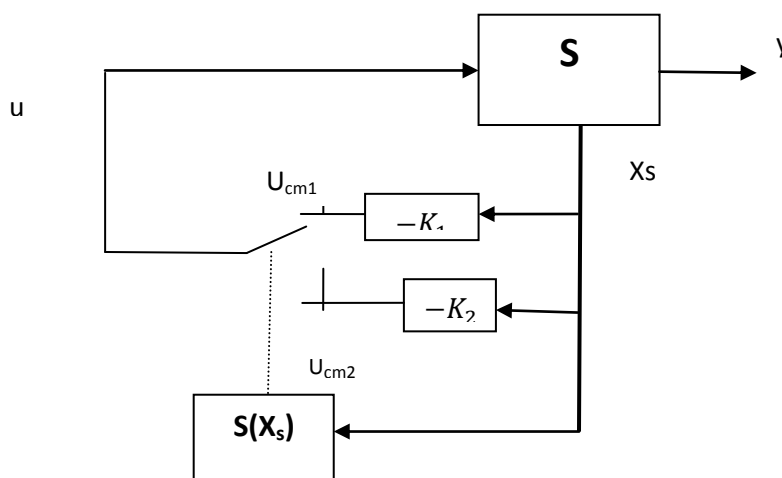


Figure [II.1] : structure par commutation de contre- réaction d'état variable.

- Le système à régler S possède une grandeur de commande u , et une sortie y
- X_s : c'est le vecteur d'état qui présente le comportement dynamique de système.
- $-K_1, -K_2$: *vecteurs lignes du retour d'état*
- $S(X_s)$: loi de commutation

Le choix de la contre-réaction d'état se fait par la loi de commutation $S(X_s)$, et on aura :

$$u = u_{cm1} = -K_1 X_s \text{ si } S(X_s) > 0 \quad (\text{II.1})$$

$$u = u_{cm2} = -K_2 X_s \text{ si } S(X_s) < 0$$

En utilisant la loi de commutation on peut obtenir un phénomène transitoire stable et bien amorti même si les deux réactions d'état donnent un comportement instable ou à la limite de stabilité.

Sous certaines conditions la commutation se fait à une fréquence très élevée (théoriquement infinie). le système travaille alors en mode de glissement. le comportement du système est alors déterminé par la condition suivante :

$$S(X_s)=0 \quad (\text{II.2})$$

II.2.1.2 structure par commutation au niveau de l'organe de commande

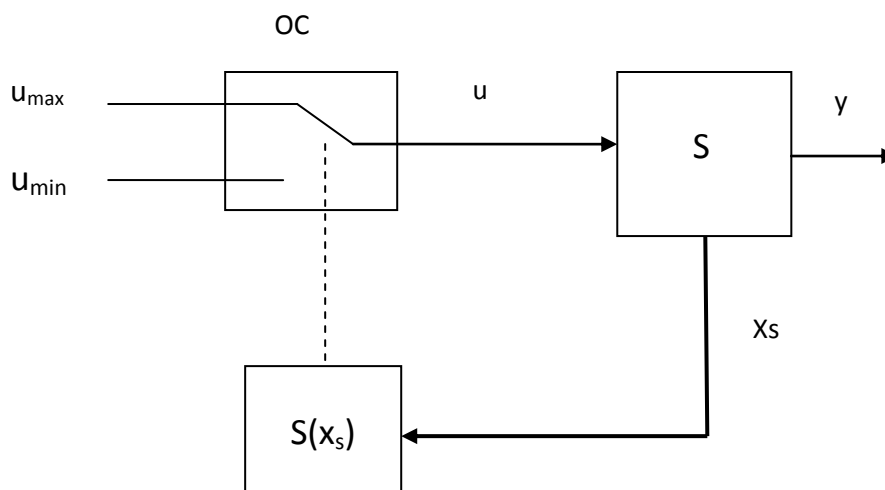


Figure [II 2] : structure par commutation au niveau de l'organe de commande

Dans cette structure l'organe de commande doit être conçu de sorte que la grandeur de commande u ne prenne que les valeurs constants u_{max} et u_{min} .

La commutation entre ces deux valeurs est donnée par la loi de commutation suivante :

$$\begin{cases} u = u_{max} & \text{si } s(Xs) > 0 \\ u = u_{min} & \text{si } s(Xs) < 0 \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

La même chose avec la 1^{er} structure la commutation à une fréquence très élevée (théoriquement infiniment élevée) de sorte que le système travaille en mode de glissement ; Pour le comportement dynamique du système on aura :

$$S(Xs)=0 \quad (\text{II.4})$$

II.2.1.3 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la commande équivalente

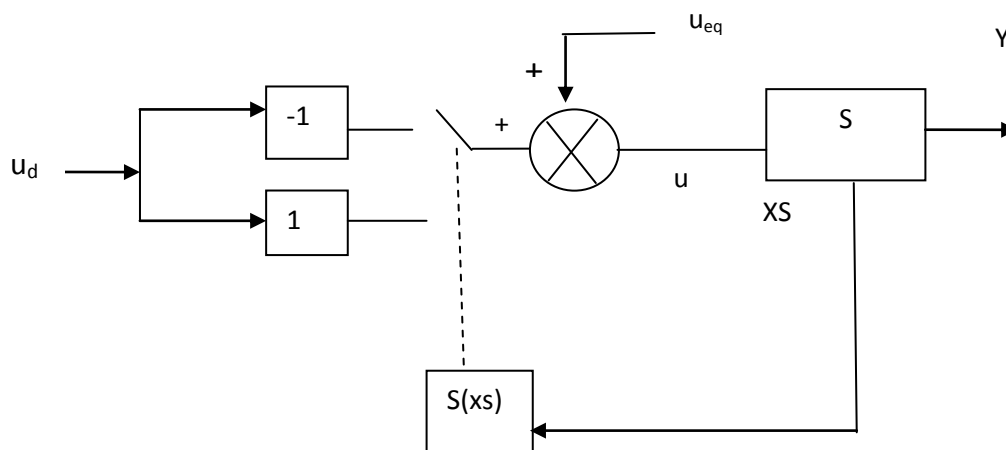


Figure [II.3] : Structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande équivalente

La loi de commande est donnée par :

$$u = \begin{cases} u_{eq} + u_d & \text{si } S(xs) > 0 \\ u_{eq} - u_d & \text{si } S(xs) < 0 \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

II.3 Principe de commande par modes glissants

Le principe de la commande par modes glissants est de contraindre l'état du système à atteindre en un temps fini une surface donnée pour ensuite y rester. Cette surface étant une relation entre les variables d'état du système, elle définit une équation différentielle, et donc détermine totalement la dynamique du système, pourvu que le système reste sur cette surface.

L'évolution d'un système soumis à une loi de commande qui le fait rester sur une surface donnée ne dépend donc plus du système lui-même ou des perturbations auxquelles il peut être soumis, mais uniquement des propriétés de cette surface.

Le système bouclé n'est donc pas seulement robuste vis-à-vis des incertitudes (propres au système) et des perturbations (extérieurs au système), mais totalement insensible à ces incertitudes et perturbations.

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

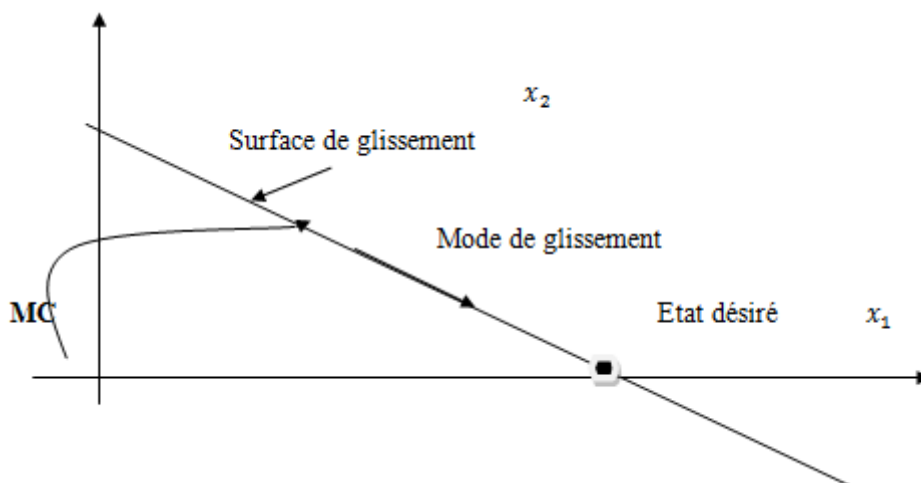


Figure [II.4] : Différents modes des trajectoires d'état

- **Le mode de convergence (MC)** c'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase et tend vers la surface de commutation $s(x) = 0$. ce mode est caractérisé par une loi de commande et un critère de convergence.

- **Le mode de glissement (MG)** c'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. la dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $s(x) = 0$.
- **Le mode du régime permanent (MRP)** ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (l'origine du plan de phase), il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande.

II.4 Mode glissant

La commande par mode glissant est une technique de commande non linéaire, caractérisée par la discontinuité de la commande aux passages par une surface de commutation appelée surface de glissement. La loi de commande discontinue est utilisée pour forcer le système à rester sur cette surface. D'où le phénomène de glissement est représenté comme suit [12] [13].

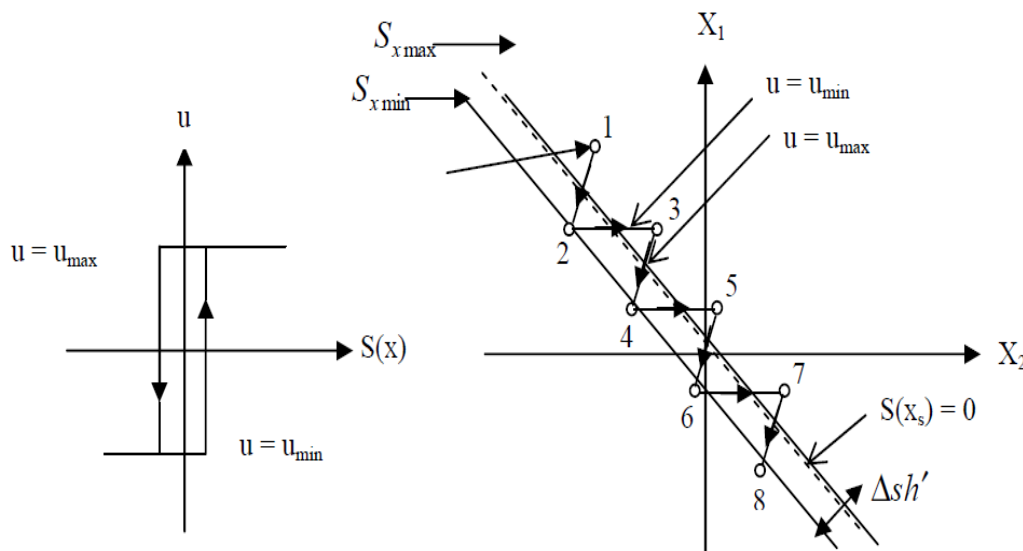


Figure [II.5] : mode de glissement

On admet d'abord une hystérèse sur la loi de commutation $S(x)= 0$ (trait mixte). Par conséquent, les commutations ont lieu sur les deux droites décalées parallèlement de $\pm \Delta Sh'$.

Une trajectoire avec $u=u_{max}$ touche au point 1 le seuil de basculement inférieur .si avec $u=u_{min}$, la trajectoire est orientée de la zone de l'hystérèse, elle touche le point 2 le seuil de

basculement supérieur où a lieu une commutation sur $u=u_{\max}$. si la trajectoire est de nouveau orienté vers l'intérieur, elle touchera au point 3 le seuil de basculement inférieur et ainsi de suite, [14].

II.4.1 Synthèse de la commande par mode glissant

La mise en œuvre d'une commande en mode glissant peut être effectuée en trois étapes principales [16] :

- ☞ choix de la surface de glissement.
- ☞ Etablir la condition de convergence.
- ☞ Détermination de la loi de commande.

II.4.1.1-Choix de la surface de glissement

La surface de glissement est choisie en fonction d'erreur de poursuite et le degré relatif du système à commander. Le degré relatif d'un système est le nombre de dérivée de la sortie jusqu'à l'apparition de la commande.

La forme générale consiste à définir une fonction scalaire des surfaces de glissement dans le plan de phase en vue d'assurer la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de consigne.

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{II.6})$$

Où

- λ est un scalaire positif qui représente la pente de la surface de glissement.
- r : Degré relatif, égale au nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître la commande, c'est à dire le plus petit entier positif tel que : $\frac{\partial s(x)}{\partial u(x)} \neq 0$.
- Et $e(x) = y(x) - y_d(x)$

II.4.1.2-L'existence de la condition de convergence

Pour que la surface de glissement existe il faut assurer le mode de convergence, il existe deux conditions :

➤ Fonction discrète de la commutation

C'est la première condition de convergence, proposée par EMIYANOVE et UTKIN.

- $\dot{S}(x) > 0$ si $S(x) < 0$
- $\dot{S}(x) < 0$ si $S(x) > 0$ (II.7)

Cette condition peut être formulée comme suit :

- $\dot{S}(x) \cdot S(x) < 0$ (II.8)

➤ **Analyse de stabilité par la fonction de Lyapunov**

La fonction candidate de Lyapunov est une fonction positive ($V(x) > 0$) $\forall x \neq 0$ et $V=0$ pour $x = 0$.

La loi de commande doit faire décroître cette fonction ($\dot{V}(x) < 0$), afin de garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur référence.

Dans le cas de la commande par mode glissant classique, la fonction du Lyapunov candidate est donnée généralement par l'équation suivante [15] [17]:

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (\text{II.9})$$

La dérivée de cette fonction est :

$$\dot{V}(x) = \dot{S}(x) \cdot S(x) \quad (\text{II.10})$$

Pour que le système commandé soit stable, $\dot{V}(x)$ doit être négative ($\dot{V}(x) < 0$).

II.4.1.3 Synthèse de la loi de commande

La structure d'un contrôleur par mode glissant est constituée de deux parties:

- la commande équivalente (U_{eq}).
- la commande discontinue (U_d).

La loi de commande globale est donnée par la relation suivante :

$$u = u_{eq} + u_d \quad (\text{II.11})$$

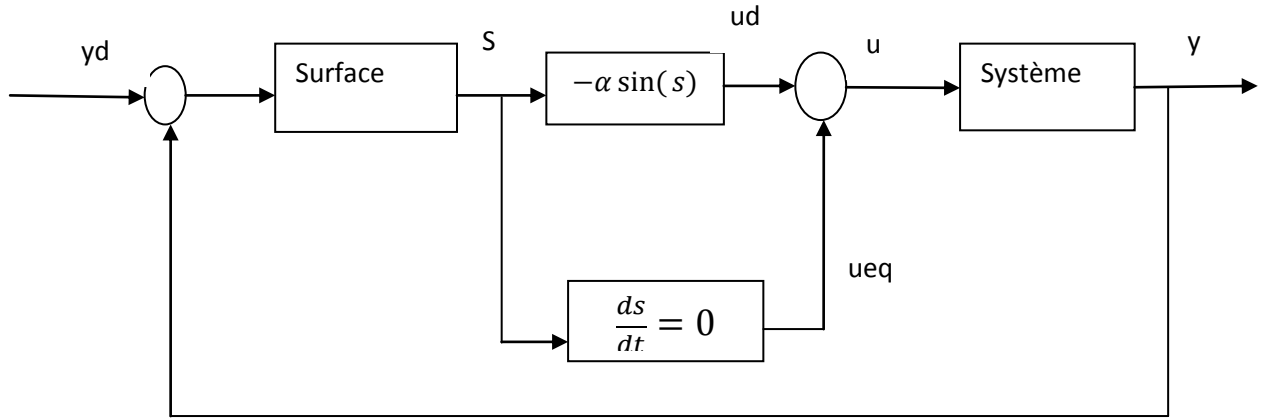


Figure [II.6] : La structure d'un contrôleur par mode glissant

II.4.1.3.1 La commande équivalente

La méthode proposée par Utkin [18], consiste à admettre qu'en mode de glissement, tout se passe comme si le système était piloté par une commande, dite commande équivalente u_{eq} qui permet de maintenir l'état du système sur la surface de discontinuité $s(x) = 0$. Physiquement la commande équivalente présente la valeur moyenne de la commande u , comme cette figure le montre :

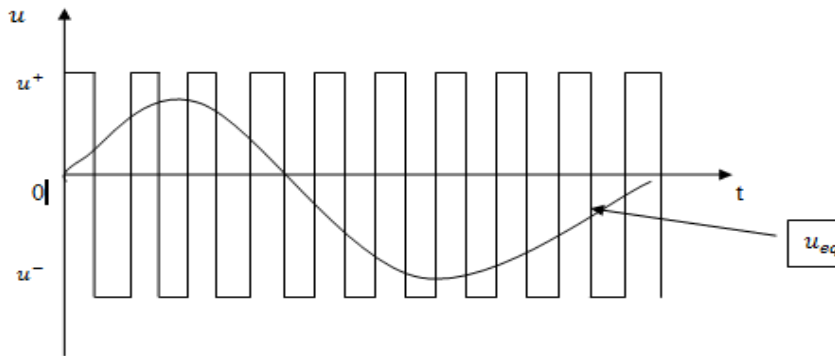


Figure [II.7] : La commande équivalente.

Elle est synthétisée en considérant que la dérivée de la surface de glissement soit nulle $\dot{s}(x) = 0$ (II.12)

$$\dot{s} = \frac{\partial s}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = 0 \tag{II.13}$$

Donc $\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} (f(x) + g(x)u_{eq}) = 0$ (II.14)

$$\text{D'où } u_{\text{eq}} = - \left(\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right)^{-1} \frac{\partial s}{\partial x} f(x) \quad (\text{II.15})$$

$$\text{Avec } \left(\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right) \neq 0$$

On remplaçant [II 15] dans [II 14], on obtient L'équation du régime glissant idéal

$$\dot{x} = f(x) - g(x) \left(\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right)^{-1} \frac{\partial s}{\partial x} f(x) \quad (\text{II.16})$$

II.4.1.3.2 La commande discontinue

Elle est déterminée pour satisfaire les conditions de convergence. Cette commande force les dynamiques à converger vers la surface de glissement et assure l'insensibilité du système vis-à-vis des incertitudes et perturbations.

On remplaçant (II.15) dans (II.11) on aura :

$$u = - \left(\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right)^{-1} \frac{\partial s}{\partial x} f(x) + u_d \quad (\text{II.17})$$

Et on remplace [II 17] dans [II 14], on obtient :

$$\begin{aligned} \dot{s}(x) &= \frac{\partial s}{\partial x} (f(x) - g(x) \left(\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right)^{-1} \frac{\partial s}{\partial x} f(x) + g(x)u_d) \\ &= \frac{\partial s}{\partial x} g(x) + u_d \end{aligned} \quad (\text{II.18})$$

Pour assurer la condition de l'attractivité :

$$\dot{s}(x)s(x) < 0 \Rightarrow s(x) \left(\frac{\partial s}{\partial x} g(x) + u_d \right) < 0 \quad (\text{II.19})$$

Il suffit que u_d soit de signe opposé à : $s(x) \frac{\partial s}{\partial x} g(x)$, Différentes formes ont été proposées dans la littérature Pour le terme u_d , la plus utilisé c'est [8]:

$$u_d = -k \text{sign}(s) \quad (\text{II.20})$$

Telle que :

- sign est la fonction signe classique avec :

$$\text{sign}(s) = \begin{cases} +1 & \text{si } s(x) > 0 \\ 0 & \text{si } s(x) = 0 \\ -1 & \text{si } s(x) < 0 \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

- k est une constante positive.

$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } k \text{ est très petite alors le temps de réponse est trop long.} \\ \text{si } k \text{ est trop grande alors le « Chattering » apparaît.} \end{array} \right.$

II.5 Le phénomène du chattering

Durant le régime glissant, les discontinuités issues de la commande peuvent entraîner des oscillations haute fréquence de la trajectoire du système autour de la surface de glissement, ce phénomène est appelé phénomène de broutement ou chattering en Anglais [19].

Les principales raisons à l'origine de ce phénomène sont les limitations des actionneurs ou les retards de commutation au niveau de la commande. Ces commutations détériorent la précision de la commande et peuvent s'avérer néfastes pour l'organe de commande en provoquant une détérioration prématurée des systèmes mécaniques et une élévation de température dans les systèmes électriques (perte d'énergie non négligeable).

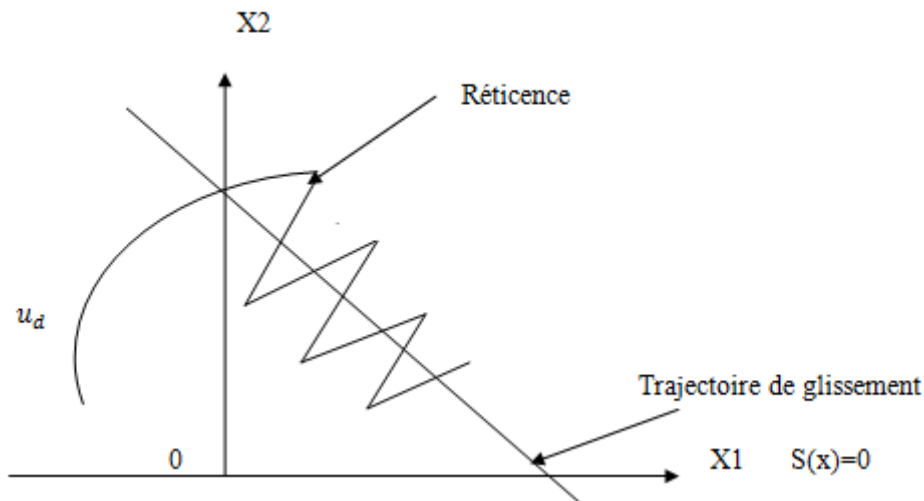


Figure [II.8] : phénomène de réticence

II.6 Solutions pour atténuer le phénomène de réticence

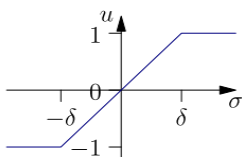
Le phénomène de réticence constitue un inconvénient majeur non négligeable, car même s'il est possible de le filtrer à la sortie du processus, il est susceptible d'exciter des modes de hautes fréquences qui n'ont pas été pris en compte lors de la modélisation du système. Ceci peut dégrader les performances et même conduire au problème d'instabilité [18].

De nombreuses solutions ont été proposées dans le but de réduire ou d'éliminer ce phénomène, comme la solution de couche limite, fuzzy sliding mode, mode glissant d'ordre Supérieur, approach Law, etc....

➤ la méthode de la couche limite (boundary layer)

Elle consiste à remplacer la fonction « sign » de la loi de commande par une approximation continue à gain élevé dans un proche voisinage de S [20],[18], et saturée en dehors de ce voisinage. Le régime glissant qui en résulte n'est plus confiné dans S, mais dans un proche voisinage de celui-ci. Parmi les fonctions utilisées nous citerons :

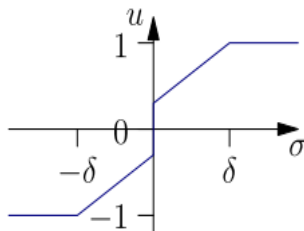
❖ La fonction saturation



$$\text{sat}(S, \delta) = \begin{cases} \text{sign}(S) & \text{si } |S| > \delta \\ \frac{\sigma}{\delta} & \text{si } |S| \leq \delta \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

❖ La fonction sign + saturation

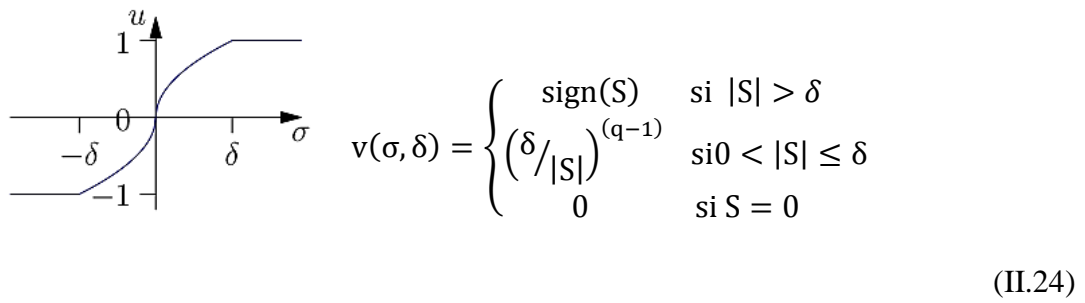
On peut combiner la fonction saturation précédente avec la fonction sign comme suit :



$$\text{sat}(\sigma, \delta) = \begin{cases} (a + b)\text{sign}(S) & \text{si } |S| > \delta \\ (a\frac{S}{\delta} + b)\text{sign}(S) & \text{si } |S| \leq \delta \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Il existe d'autres approximations moins utilisées, car elles sont plus coûteuses en temps de calcul [19]:

❖ La loi d'interpolation de puissance



❖ La fonction pseudo-signe



❖ La fonction arc tangente



❖ La fonction tangente hyperbolique



Ces méthodes réduisent la robustesse de la commande. Elles sont paramétrées par une constante positive δ réglée pour avoir un bon compromis entre réduction du chattering et conservation de la robustesse. Dans les méthodes présentées ici, plus δ est petit, plus l'approximation tend vers la fonction sign, et donc meilleure est la robustesse, au détriment de la réduction du chattering.

➤ **Solution par des lois d'approche**

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

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

$$\dot{x} = -k \text{sign}(s) - Q s \quad (\text{II.28})$$

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

$$\dot{x} = -k |s|^\rho \text{sign}(s) \quad (\text{II.29})$$

Où $\rho \in [0 \ 1]$

➤ **Solution par des modes glissants d'ordre supérieur [17], [14], [21]**

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

➤ La solution par fuzzy sliding mode

En utilisant le même principe que celui de la couche limite, Lin et Chen ont introduit une bande de transition floue. Le système flou considéré est de type Mamdani, il a la surface de glissement comme entrée et la commande globale comme sortie. La bande de transition ainsi construite est non linéaire. Les trois règles floues utilisées correspondent à la valeur de la fonction signe. Le phénomène de chattering est certes éliminé, néanmoins la commande permettant la phase d'approche reste difficile à calculer, car les bornes des incertitudes et des perturbations sont généralement inconnues.

Il y a ceux qui ont proposé de faire varier le gain de glissement à l'aide d'un système flou. Ainsi, sa valeur diminue au fur et à mesure que le système s'approche de la surface de glissement.

Et d'autre, de substitué la partie discontinue de la commande avec saturation par un système flou adaptatif. Le contrôleur a pour entrée la surface de glissement et délivre en sortie la meilleure approximation de la commande. À l'égard de sa performance, sa convergence dépend de la valeur initiale de la partie ajustable.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté le principe de la commande par modes glissants d'ordre un. Une telle commande se compose de deux éléments :

- Une hyper surface sur laquelle le système doit évoluer
- Une loi de commande forçant le système à atteindre cette surface de glissement et y demeurer jusqu'à l'équilibre.

L'objectif de la commande par mode glissant est de forcer le système à évoluer sur la surface de glissement. Ceci permet de forcer l'équation de glissement vers zéro et par un choix approprié de cette équation l'erreur tend aussi vers zéro.

Sa dynamique devient insensible aux variations paramétriques, aux erreurs de modélisation et à certaines perturbations externes.

Les avantages de la commande par mode glissant sont importants et multiples et les plus principaux sont sa robustesse et sa simplicité de mise en œuvre.

Cependant, le problème principal de cette commande est le phénomène de réticence correspondant à des oscillations du système à haute fréquence autour de la surface de glissement. Ceci est dû au caractère discontinu de la commande. Il existe différentes méthodes

pour réduire ce phénomène comme les modes glissants d'ordre supérieur, la logique floue etc....

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter un aperçu bibliographique sur les outils de base de la logique floue type-1 et type-2, ainsi que la démarche à suivre pour la conception d'un régulateur flou et les différentes méthodes de la logique Floue.

Chapitre III

LA LOGIQUE FLOUE

III.1 Introduction

Les systèmes de contrôle ont contribué à l'atteinte des différents objectifs globaux des entreprises, soit à diminuer les coûts de production ou à augmenter la quantité ou la qualité de leurs produits.

L'une des avenues empruntées afin d'améliorer les systèmes de contrôle est d'introduire de la logique floue à l'intérieur de la boucle de contrôle [25].

En effet, la logique floue a démontré sa capacité à améliorer les performances des systèmes de contrôle non linéaire est adaptatif.

La logique floue ne remplacera pas les autres systèmes classiques ; elle est plutôt un outil supplémentaire qui permet d'obtenir des performances impossibles à atteindre autrement dans certains cas. En général, les solutions sont plus simples, plus près des raisonnements humains et plus faciles à élaborer.

L'être humain résout souvent des problèmes complexes à l'aide de données approximatives ; Les règles de la logique floue étant semblables à celles du raisonnement humain en ce qu'elles sont approximatives, en effet comme la logique floue tient compte des données du monde naturel, tout comme les humains, elle représente les données par des règles plutôt que par des équations précises, une approche par la logique floue semble tout a fait appropriée. [27]

III.2 Définitions

➤ La logique floue

La logique floue est une théorie mathématique englobant la logique classique, contrairement à cette dernière elle autorise plus de deux valeurs de vérité pour une proposition, il y a des états intermédiaires entre vrai et faux.

Par exemple, en plus d'être vrai ou faux, des résultats pourraient avoir des significations telles que probablement vraies, et probablement fausses.

➤ Les fonctions d'appartenance

L'ensemble des valeurs linguistiques que peut prendre la variable floue sont représentées dans la logique floue par des fonctions d'appartenance et chaque élément de cet ensemble a une valeur d'appartenance qui est le degré de compatibilité de cet élément avec le concept qui est représenté par l'ensemble flou. Et cette valeur varie entre 0 et 1 contrairement au ensemble classique ou binaire qui ont deux valeurs seulement 0(faux) ou 1(vrais).

Les fonctions d'appartenance les plus utiliser sont de forme : triangulaire, trapézoïdale, gaussienne.

- Triangulaire :

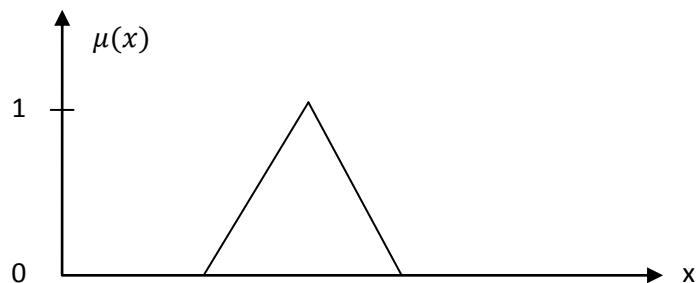


Figure [III.1] : fonction d'appartenance triangulaire

- Trapézoïdale

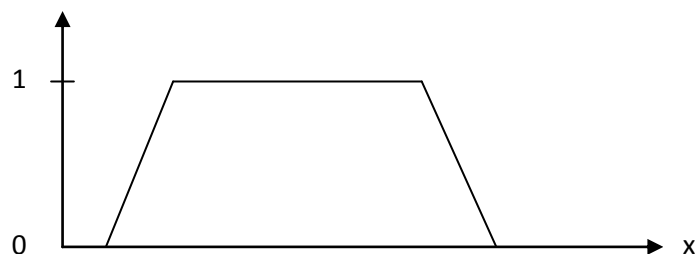


Figure [III.2] : fonction d'appartenance Trapézoïdale

- Gaussienne :

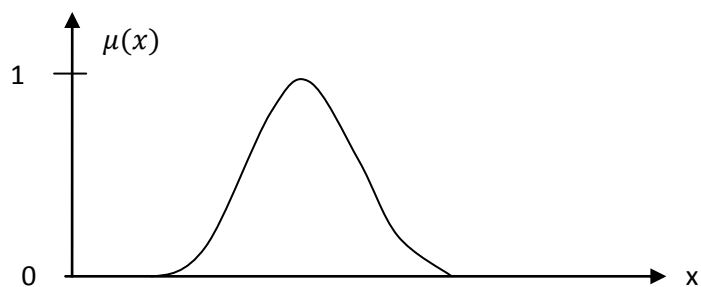


Figure [III.3] : fonction d'appartenance Gaussienne.

➤ Univers de discours

Un des premiers pas dans conception d'une application floue est de définir l'ensemble de référence ou univers du discours pour chaque variable linguistique.

➤ **Ensemble flous**

En logique floue, un ensemble flou contient plusieurs valeurs. L'ensemble flou est concerné par un degré d'appartenance (ou degré de vérité). On utilise un continuum de valeurs logiques entre 0 (complètement faux) et 1 (complètement vrai). Une fonction d'appartenance est utilisée pour mapper un item X dans le domaine des nombres réels à un intervalle $[0, 1]$, ce qui permet un degré de vérité.

L'appartenance à un ensemble représente une valeur entre 0 et 1. Un ensemble flou peut être défini comme un ensemble ayant des frontières floues.

➤ **Sous-ensembles flous**

La notion de sous-ensembles flous a pour but de permettre des gradations dans l'appartenance d'un élément à une classe, c'est-à-dire d'autoriser un élément à appartenir plus ou moins à une classe prédéfinie.

Soit E un univers et μ_A est fonction d'appartenance qui caractérise le degré d'appartenance d'un élément x au sous-ensemble flou A : $E \rightarrow [0; 1]$. On appelle sous-ensemble flou A de E l'ensemble des éléments de E qui vérifient $\mu_A(x) \neq 0$. Un sous-ensemble flou est entièrement caractérisé par sa fonction d'appartenance. Si on connaît A , alors on connaît μ_A et inversement.

L'interprétation de la fonction est la suivante :

- $\mu_A(x)=0$ signifie que x n'appartient pas à A avec certitude.
- $\mu_A(x)=1$ signifie que x appartient à A avec certitude.
- Les autres valeurs servent à graduer le degré d'appartenance de x à A .

III.3 Bref historique [23]

-1965 le prof. L. A. Zadeh de l'Université de Berkeley (Californie) pose les bases théoriques de la logique floue.

-1973 L. A. Zadeh propose d'appliquer la logique floue aux problèmes de réglage.

-1974 Première application du réglage par la logique floue appliquée à une turbine à vapeur.

Suivie en 1980 par une application sur un four à ciment et en 1983 sur un épurateur d'eau.

-1985 Premiers produits industriels (Japon) utilisant le principe de la logique floue appliqué à des problèmes de réglage et de commande. Développement de processeurs dédiés à des applications de réglage par la logique floue.

III.4 la logique classique et la logique floue

Dans le cadre de la logique classique, une proposition est soit vraie, soit fausse (1 ou 0). Par exemple, la logique classique peut facilement partitionner la température d'une pièce en deux sous-ensembles, «moins de 15 degrés» et «15 degrés ou plus».

Toutes les températures de moins de 15 degrés sont alors considérées comme appartenant à l'ensemble «moins de 15 degrés». On leur affecte une valeur de 1. Toutes les températures atteignant 15 degrés ou plus ne sont pas considérées comme appartenant à l'ensemble «moins de 15 degrés». On leur attribue une valeur de 0.

Cependant, le raisonnement humain s'appuie fréquemment sur des connaissances ou des données inexactes, incertaines ou imprécises. Une personne placée dans une pièce dont la température est soit de 14.95 degrés soit de 15.05 degrés, ne fera certainement pas de distinction entre ces deux valeurs. Cette personne sera pourtant capable de dire si la pièce est «Froide» ou «chaude», sans pour cela utiliser de température

III.5 Principe de la logique floue

La logique floue est une branche des mathématiques et, à ce titre, toute une série de notions fondamentales sont développées. Ces notions permettent de justifier et de démontrer certains principes de base. Dans ce qui suit, on ne retiendra que les éléments indispensables à la compréhension du principe du réglage par la logique floue. Ces éléments sont :

- Les variables floues.
- Les règles d'inférences.
- Les opérateurs flous.

III.5.1 Les variables floues (linguistique)

Contrairement aux variables binaires qui sont définies par les deux états « vrai » ou « faux », les variables floues présentent toute une gradation entre la valeur « vrai » et la valeur « faux ».

Par exemple : peu, beaucoup, énormément...

Exemple

Afin de décrire la température d'une pièce par une variable linguistique, on peut utiliser l'ensemble des termes suivants : $T(v)=\{\text{froid, tiède, chaud}\}$. En considérant que l'univers du discours est l'intervalle $[0,45]$, on peut définir les termes linguistiques comme suit : froid est une température environ inférieure à 10 degrés. Tiède est une température d'environ 17

degrés et chaud est une température environ supérieure à 24 degrés.ces termes peut être caractérisé par des fonctions d'appartenance représentées sur la figure suivante :

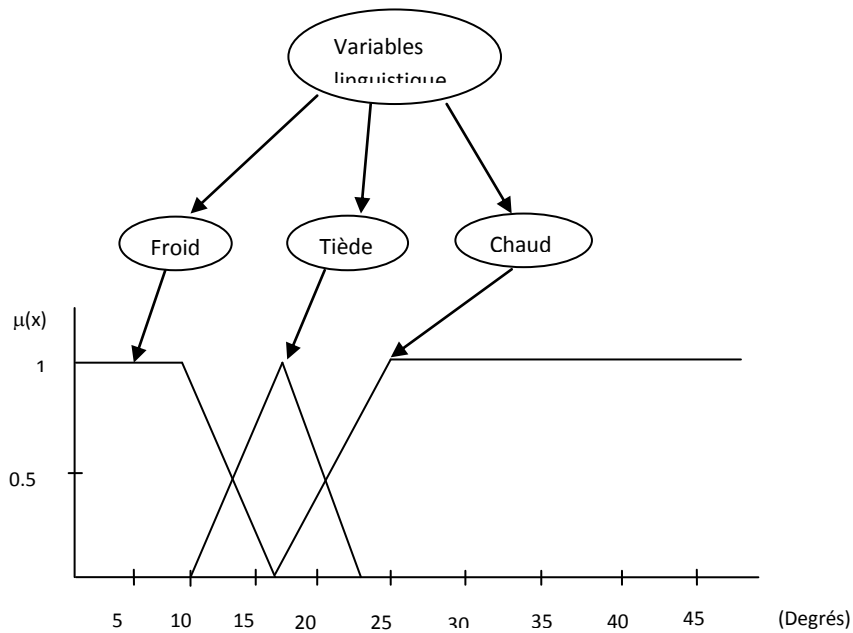


Figure [III.4] : les variables linguistiques pour décrire la température

III.5.2 Les règle d’inférences

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. Ces règles se présentent sous la forme :

Si condition 1 et/ou condition 2 (et/ou...) alors action sur les sorties.

III.5.3 Les Opérateurs flous

Les règles d’inférences font appel aux opérateurs présentés dans le tableau ci-dessous, qui s’appliquent aux variables floues.

Opérateur	Opérateur sur le degré de vérité des variables
ET	Minimum
	Produit
OU	Maximum
	Valeur moyenne
Non	Complément à un

Tableau [III 1] : Opérateurs flous.

Les opérations minimum et maximum présentent l'avantage de la simplicité lors du calcul, par contre elles privilégient l'une des deux variables.

Quant aux opérations produites et valeur moyenne, elles sont les plus complexes à calculer mais produisent un résultat qui tient compte des valeurs de variables [24]

III.6 Structure interne d'un système d'inférence flou (SIF)

Un système flou est un système à base de connaissances particulières, dont l'architecture de base, illustrée par la figure ci-dessous, se compose essentiellement de quatre modules à savoir : Fuzzification, base des règles, raisonnement flou et défuzzification.

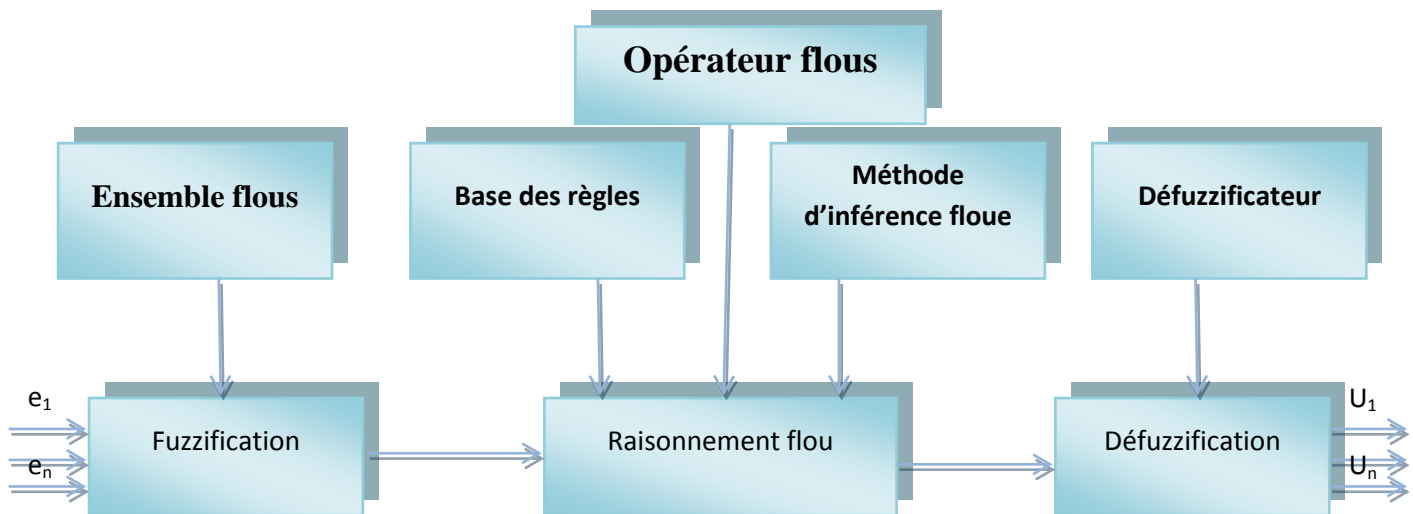


Figure [III.5] : Architecture de base d'un système flou

III.6.1 la fuzzification

La fuzzification est réalisée dans l'interface d'entrée du système flou. Durant cette phase, les informations issues du système sont tout d'abord normalisées, ensuite, les données normalisées sont transformées en qualifications linguistiques, en utilisant des règles sémantiques définies par un expert.

Les entrées dans un système flou sont en général mesurées à l'aide d'organes de mesures qui sont le plus souvent de type analogique. Etant donné que, l'implémentation du système flou se fait toujours en numérique, il faut d'abord convertir les entrées analogiques en numérique, puis on procède à la fuzzification. L'adaptation des entrées permet de garantir l'appartenance de celles-ci à l'univers de discours choisi U . La dernière étape de fuzzification est la généralisation des degrés d'appartenances à chaque valeur

linguistique définie par sa fonction d'appartenance. Par ailleurs, les fonctions d'appartenance les plus utilisées sont : triangulaire, trapézoïdale, gaussienne, sigmoïde, etc.

III.6.2 la base de règle

Une base de règles floues est une collection de règles qui permet de lier les variables floues d'entrée et de sortie. La description de la commande se fait par l'intermédiaire de ces règles qui ont la forme suivante :

si x_1 est A_1 ET x_2 est A_2 alors y est B (III.1)

Où :

x_1 et x_2 sont les grandeurs physiques caractéristiques du système, A_1 , A_2 et B sont les termes linguistiques. Le ET de conjonction est réalisé en effectuant le minimum entre les degrés de vérité des propositions floues x_1 est A_1 et x_2 est A_2 .

III.6.3 Méthode d'inférence floue

Elle permet de calculer l'ensemble flou associé à la commande et se fait par les opérations d'inférence floue et l'agrégation des règles.

L'inférence floue repose sur l'utilisation d'un opérateur d'implication floue pour chaque règle à analyser. Cet opérateur quantifie la force de liaison entre la prémisse et la conclusion de la règle. Plusieurs méthodes existent, max-min (Mamdani), max-prod (Larsen) et somme-prod (Sugeno).

➤ Méthode de max-min

Cette méthode est la plus mentionnée dans la littérature sur les régulateurs flous. Elle utilise les mêmes descriptions pour les sous-ensembles de sorties que pour des entrées à la condition de chaque règle R_i est attribuer un poids d'activation w_i qui dépend de la condition elle-même et des valeurs d'entrées. pour l'opération ET, on utilise l'opérateur min le poids d'activation comme la constante d'écrêtage pour le sous-ensemble de sortie imposé par la partie conséquente de la règle $R(i)$,

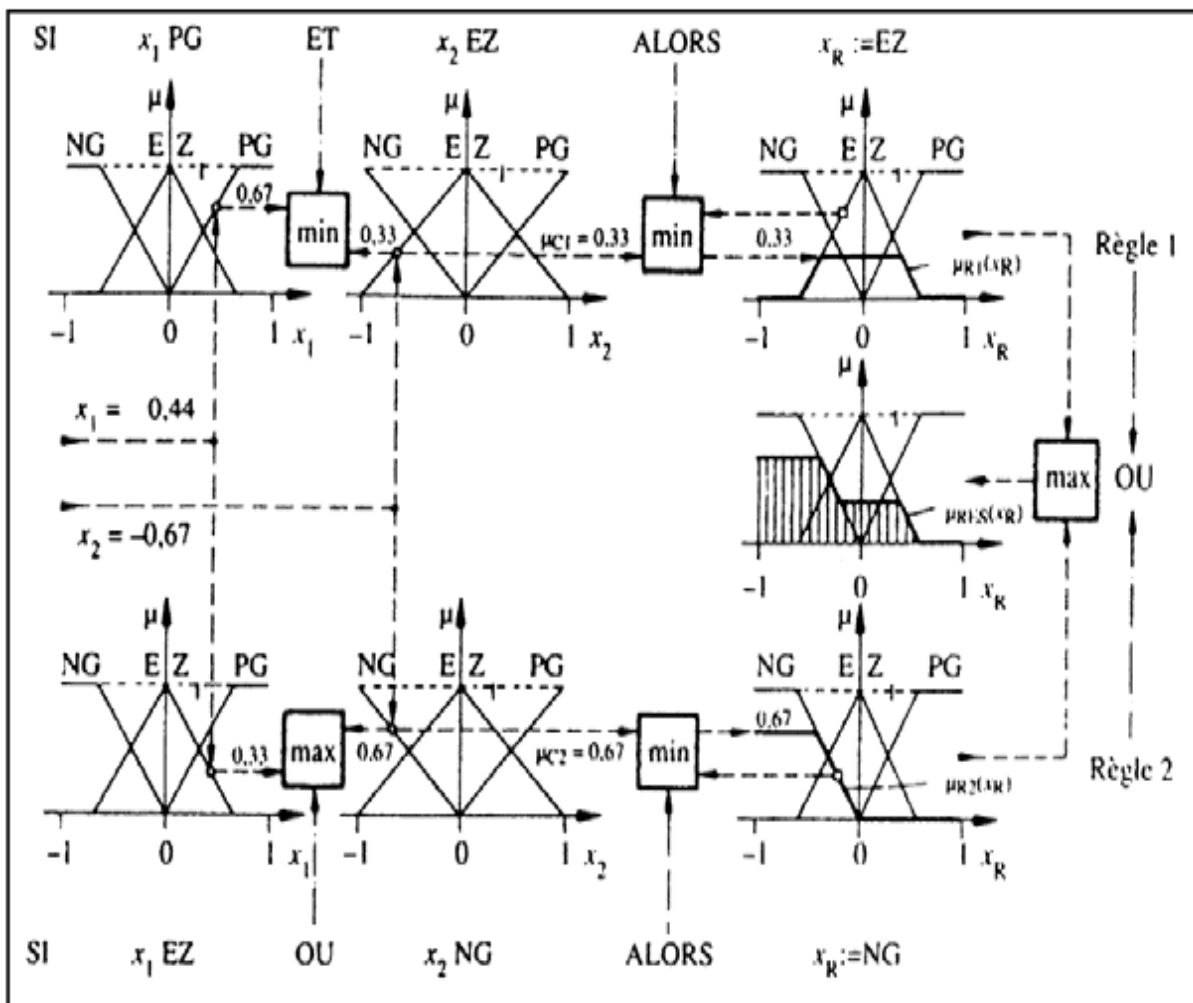


Figure [III.6] : Méthode d'inférence max-min pour deux variables d'entrée et deux règles.

➤ **Méthode de max-prod**

La méthode d'inférence max-prod réalise en général, au niveau de la condition, l'opérateur OU par la formation du maximum et l'opérateur ET par la formation du minimum, par contre, la conclusion dans chaque règle, introduite par ALORS, qui lie le facteur d'appartenance de la condition avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie X_N . Par l'opérateur ET, est réalisé cette fois ci par la formation du produit.

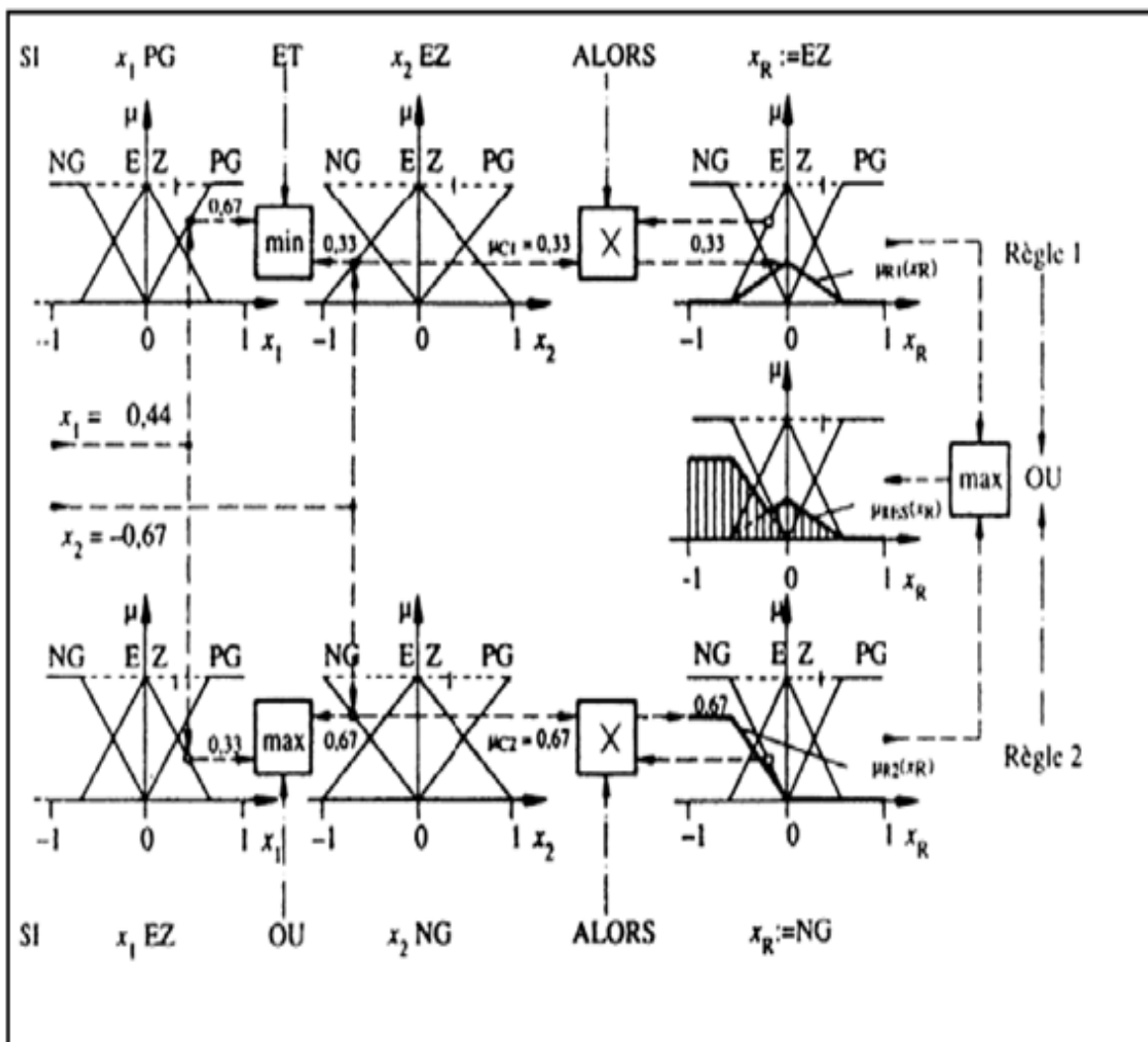


Figure [III.7] : Méthode d'inférence max-prod pour deux variables d'entrée et deux règles.

➤ **Méthode de somme-prod**

Par opposition aux méthodes d'inférence précédente, la méthode d'inférence somme-prod réalise, au niveau de la condition, l'opérateur OU par la formation de somme, plus précisément par la valeur moyenne, tandis que l'opérateur ET est réalisée par la formation du produit, La méthode d'inférence somme-prod est représenté comme suit :

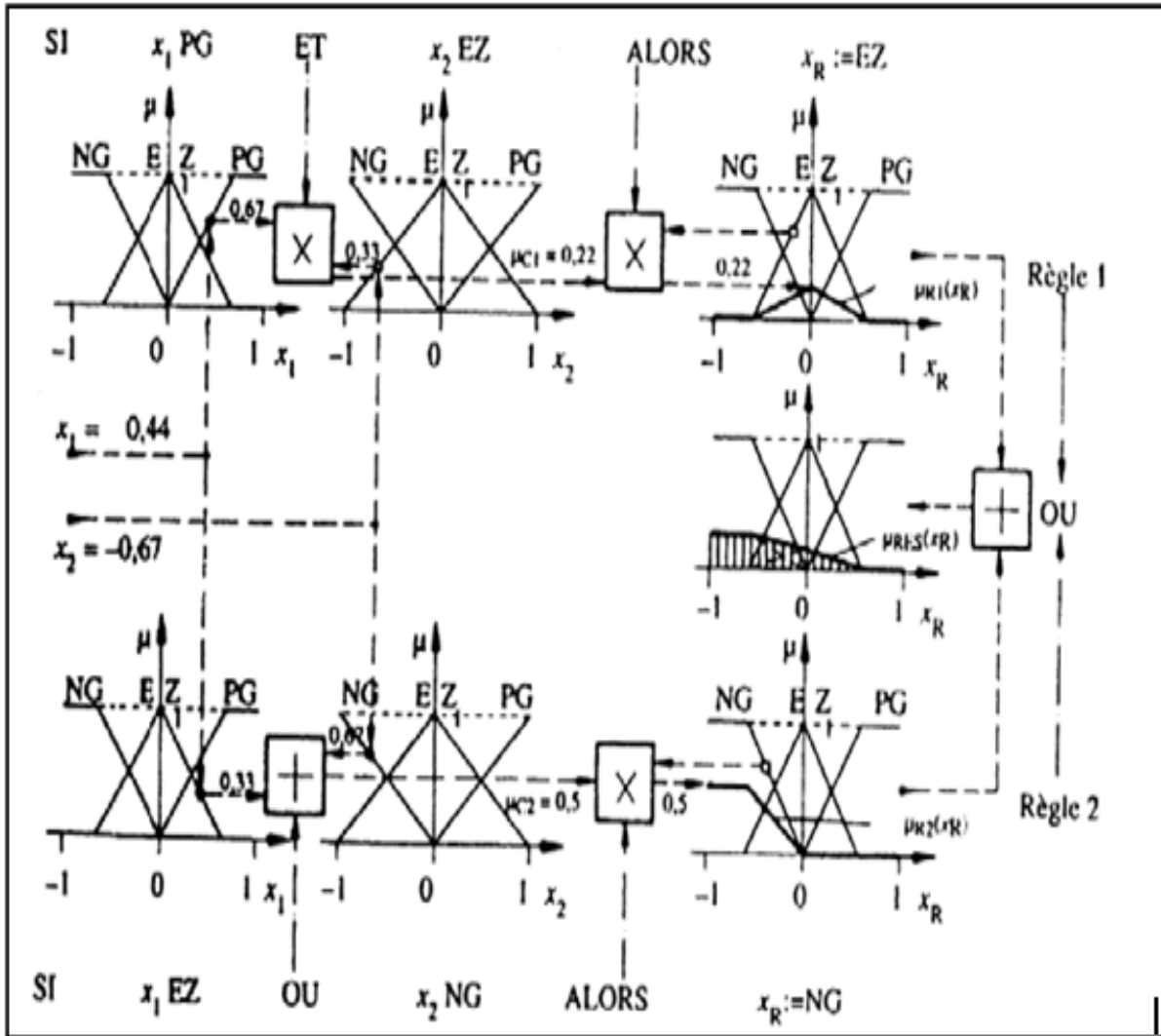


Figure [III.8] : Méthode d'inférence somme-prod pour deux variables d'entrée et deux règles.

III.6.4 Défuzzification

Les valeurs obtenues lors de la combinaison des règles appliquées aux intervalles flous de la variable de sortie, définies une fonction d'appartenance.

Il s'agit de convertir cette information en une grandeur physique. Plusieurs façons de faire, peuvent être envisagées mais, en pratique, on utilise surtout les deux méthodes suivantes :

- Défuzzification par calcul du centre de gravité.
- Défuzzification par calcul du maximum.

En général, c'est la défuzzification par calcul du centre du gravité qui est la plus utilisée.

III.6.4.1 Défuzzification par calcul du centre de gravité

Il s'agit de calculer le centre de gravité de la fonction d'appartenance de la variable de sortie.

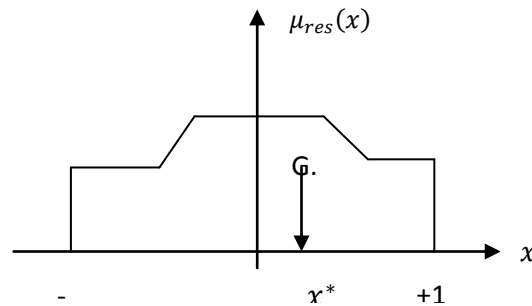


Figure [III 9] défuzzification par calcul du centre de gravité.

Le calcul du centre de gravité permet bien d'obtenir une seule valeur pour la grandeur de sortie. Son calcul est cependant relativement complexe puisqu'il nécessite le calcul d'une intégrale, on utilisant la relation suivante :

$$u^* = \frac{\int_{-1}^{+1} u \mu_{res}(u) du}{\int_{-1}^{+1} \mu_{res}(u) du} \quad (\text{III.2})$$

Ou dans le cas simple de fonctions d'appartenance en raies, d'une somme pondérée,

III.6.4.2 Défuzzification par calcul du maximum.

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

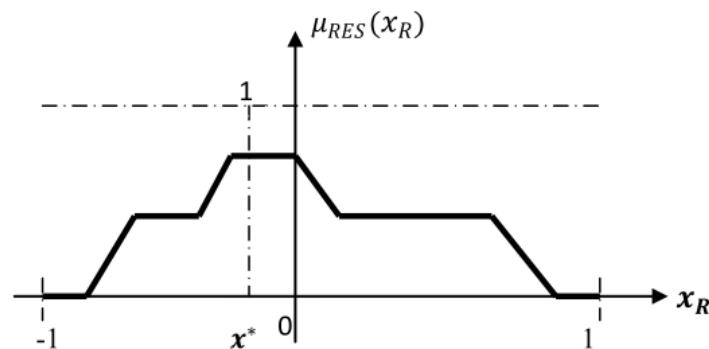


Figure [III.10] : La défuzzification par la méthode de maximum.

L'abscisse du centre de gravité peut être déterminée à l'aide de la relation :

$$x_R^* = \frac{\int_{-1}^1 x_R \mu_{RES}(x_R) dx_R}{\int_{-1}^1 \mu_{RES}(x_R) dx_R} \quad (\text{III.3})$$

III.7 types de régulateurs flous

III.7.1 Régulateur de type Mamdani

Dans la plupart des applications rapportées dans la littérature, un contrôleur de ce type est conçu pour régler, asservir une variation de sortie d'un procédé, soit uniquement à partir de l'erreur e (consigne moins la mesure), soit à partir de l'erreur et sa variation Δe . En 1974, E.H Mamdani avait présenté, pour la première fois, la technique de réglage par la logique floue, celle-ci consiste à déterminer un ensemble de règles qui maîtrise le comportement dynamique 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 des conclusions symboliques, l'inférence max-min et la défuzzification par centre de gravité.

➤ Les avantages du système flou Mamdani

-L'avantage majeur de ces modèles est que les prémisses et les conclusions des règles sont de nature entièrement linguistique. Ceci les rend facilement compréhensibles, et donne une interprétation sémantique claire au modèle.

-Autre avantage réside dans la flexibilité dans l'implémentation : ceci est dû à la liberté dans le choix des formes d'implication floues, du fuzzificateur et du défuzzificateur.

➤ les inconvénients du système flou Mamdani

-un grand nombre de règle est souvent nécessaire pour approcher le comportement global d'un système. Par conséquent, le nombre de paramètre à identifier est élevé.

-le deuxième inconvénient, du moins du point de vue purement théorique, réside dans la mise en œuvre heuristique, ne prenant en compte aucun critère de stabilité ou de robustesse de la théorie de la commande.

III.7.2 Régulateur flou de type Sugeno

Dans les régulateurs de ce type, les conclusions des règles ne sont pas symboliques (elles sont représentées par des sous-ensembles flous) mais une fonction (numérique) des entrées :

$$b^i = f(x_1, k, x_n) \text{ Les prémisses étant symboliques} \quad (\text{III.5})$$

Où f est généralement une fonction polynomiale.

La sortie du régulateur est donnée par :

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n b^i * \alpha_i(x)}{\sum_{j=1}^n \alpha_j} \quad (\text{III.6})$$

Où les α_i sont les valeurs de vérité de chaque règle pour $i=1 \dots n$. et la sortie donnée par le régulateur est la variation du signal de commande.

➤ Les avantages du système flou Sugeno

Ces modèles sont actuellement les plus utilisés dans la conception des contrôleurs flous car ils présentent les avantages suivant :

-ils permettent décrire des situations où la structure physique du système est bien connue, par exemple, une fonction linéaire exprime la relation entrée-sortie.

-ils permettent d'approcher le comportement d'un système complexe par une collection de modèles locaux, généralement linéaires.

-les modèles de type Takagi-Sugeno ont une capacité de représentation importante. En effet, le nombre de règles nécessaires pour approcher un système à un certain degré de précision est généralement plus faible que dans le cas des modèles linguistiques.

-les systèmes flous de type Sugeno permettent d'exploiter un certain nombre de techniques numériques issues de l'automatique conventionnelle (méthode moindres carrés récursifs, filtrage de Kalman, commande adaptative, commande prédictive...etc.) et d'établir l'analyse de la stabilité et la robustesse.

-il a été démontré dans la littérature que les systèmes flous de type Sugeno sont de bon approximateurs universels car ils sont capables d'approximer toute fonction non linéaire continue sur un ensemble compact avec une précision arbitraire définie.

➤ **les inconvénients du système flou Sugeno**

-Toutefois, l'inconvénient majeur de ces modèles réside dans la nature fonctionnelle des conclusions, c'est-à-dire, les règles n'ont pas de signification sémantique claire comme dans le cas des modèles linguistique.

-les contrôleurs de Takagi-Sugeno peuvent être considérés comme une classe particulière de contrôleurs non linéaire.

III.8 la logique floue type 1 et type 2

La logique floue classique appelée aujourd'hui logique floue type-1 a été généralisée vers une nouvelle logique floue appelée logique floue type-2. Ces dernières années, Mendel et ses collègues ont beaucoup travaillé sur cette nouvelle logique [22], ils ont bâti son fondement théorique, et ils ont démontré son efficacité et sa supériorité par rapport à la logique floue type-1.

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

Toutes ces incertitudes mènent à obtenir des incertitudes au niveau des fonctions d'appartenance floues. Les ensembles flous type-1 ne sont donc pas capables de modéliser directement de telles incertitudes, par ce que leurs fonctions d'appartenances floues sont définies d'une manière mathématique précise. De l'autre côté, les ensembles flous type-2 sont capables de modéliser de telles incertitudes parce que leurs fonctions d'appartenance sont elles-mêmes floues.

Les fonctions d'appartenance type-1 sont bidimensionnelles, par contre, les fonctions d'appartenance floues type-2 sont tridimensionnelles. La nouvelle (troisième) dimension des ensembles flous type-2 fournit un degré de liberté supplémentaire permettant de prendre en charge la modélisation des incertitudes.

III.9 le concept des ensembles flous type 2

Le concept des ensembles flous type 2 a été introduit par Zadeh comme extension du concept de l'ensemble flou ordinaire appelé ensemble flou type 1. Un ensemble flou type 2 est caractérisé par une fonction d'appartenance floue, c'est-à-dire, la valeur d'appartenance (degré d'appartenance) de chaque ensemble flou dans $[0, 1]$. De tels ensembles, peuvent être utilisés dans les situations où nous avons de l'incertitude dans les valeurs d'appartenance elle-même.

L'incertitude peut être soit dans la forme de la fonction d'appartenance ou dans l'un de ses paramètres. Donc les ensembles flous type 1 peuvent être considérés comme une approximation du premier ordre de l'incertitude, alors que les ensembles flous type 2 seront considérés comme approximation du deuxième ordre.

III.10 les ensembles flous type-2

On se basera sur les définitions des ensembles flous type-1, afin de définir les ensembles flous type-2 où le degré d'appartenance de chaque élément de ces ensembles est un ensemble flou type-1.[23]

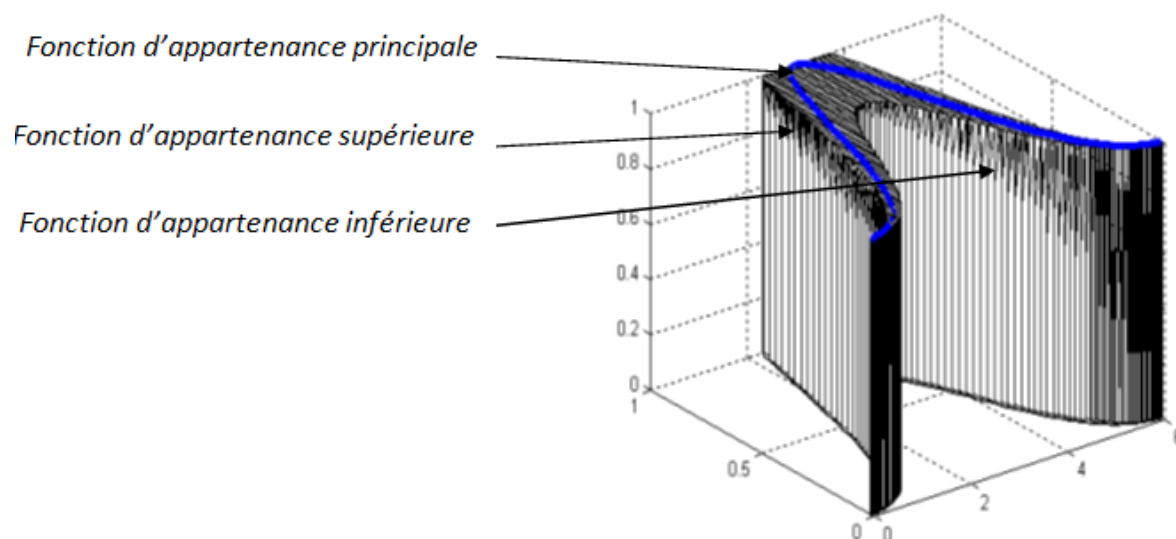


Figure [III.11] : Représentation tridimensionnelle d'un ensemble flou type-2 avec une fonction d'appartenance principale Gaussienne

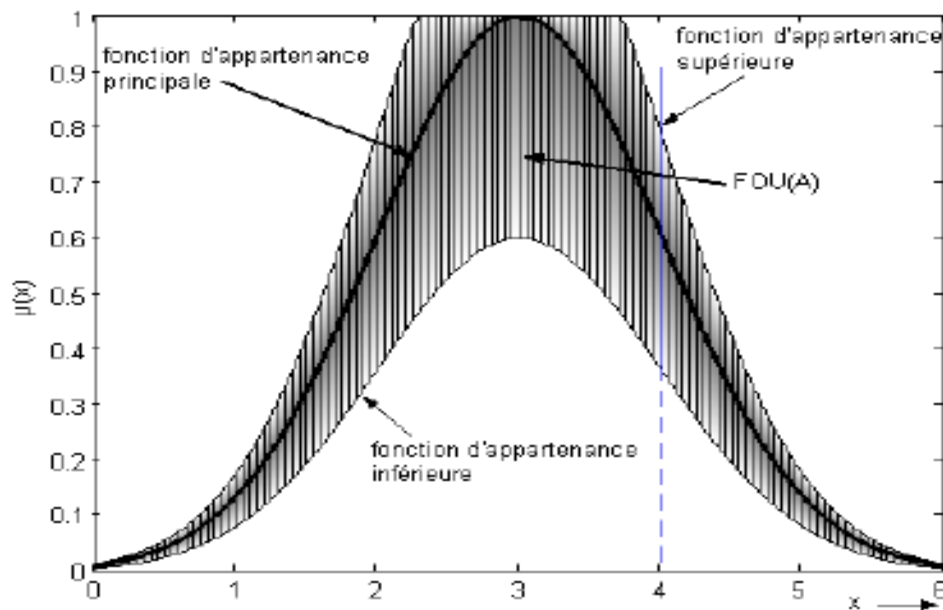


Figure [III.12] : Représentation d'un ensemble flou type-2.

- Le domaine de la fonction d'appartenance secondaire est appelé l'«appartenance primaire de x ».
- l'amplitude de la fonction d'appartenance secondaire est appelée le degré d'appartenance secondaire
- L'incertitude dans la fonction d'appartenance de l'ensemble flou type-2 \tilde{A} , consiste en une région bornée appelée l'empreinte d'incertitude (Footprint of Uncertainty : FOU). C'est l'union de toutes les fonctions d'appartenance primaires.
- Les fonctions d'appartenance supérieure de \tilde{A} sont deux fonctions d'appartenance type-1 qui représentent les frontières du FOU. La fonction d'appartenance supérieure correspond à la borne supérieure du $\text{FOU}(\tilde{A})$
- Pour chaque entrée, seulement un degré d'appartenance secondaire est égal à 1.

On appelle l'ensemble de toutes les appartenances primaires qui ont une appartenance secondaire égale à 1, une fonction d'appartenance principale [24].

Dans la figure [III.12] ou [III.11] la fonction d'appartenance principale illustre le fait que les ensembles flous type-1 sont un cas particulier des ensembles flous type-2, ayant une appartenance secondaire égale à l'unité pour une seule appartenance primaire, et zéro pour toutes les autres.

- Les ensembles flous type-2 les plus utilisés sont de forme intervalle, Gaussienne et triangulaire. Le nom du type est pris de la forme du degré d'appartenance primaire. Notons qu'il n'est pas nécessaire que la fonction d'appartenance principale soit de la même forme de type d'ensemble utilisé.

III.11 la structure du système flou type-2

Un contrôleur flou classique est composé d'une interface de fuzzification, une base de règle, un système d'interface de défuzzification. La structure du contrôleur flou type-2 est similaire à celui du classique avec la particularité d'utilisation d'un réducteur de type pour convertir les ensembles flous type-2 à la sortie du système d'inférence en ensemble flou type-1 avant la phase de défuzzification [25], Ses différentes opérations sont illustré par la figure suivante :

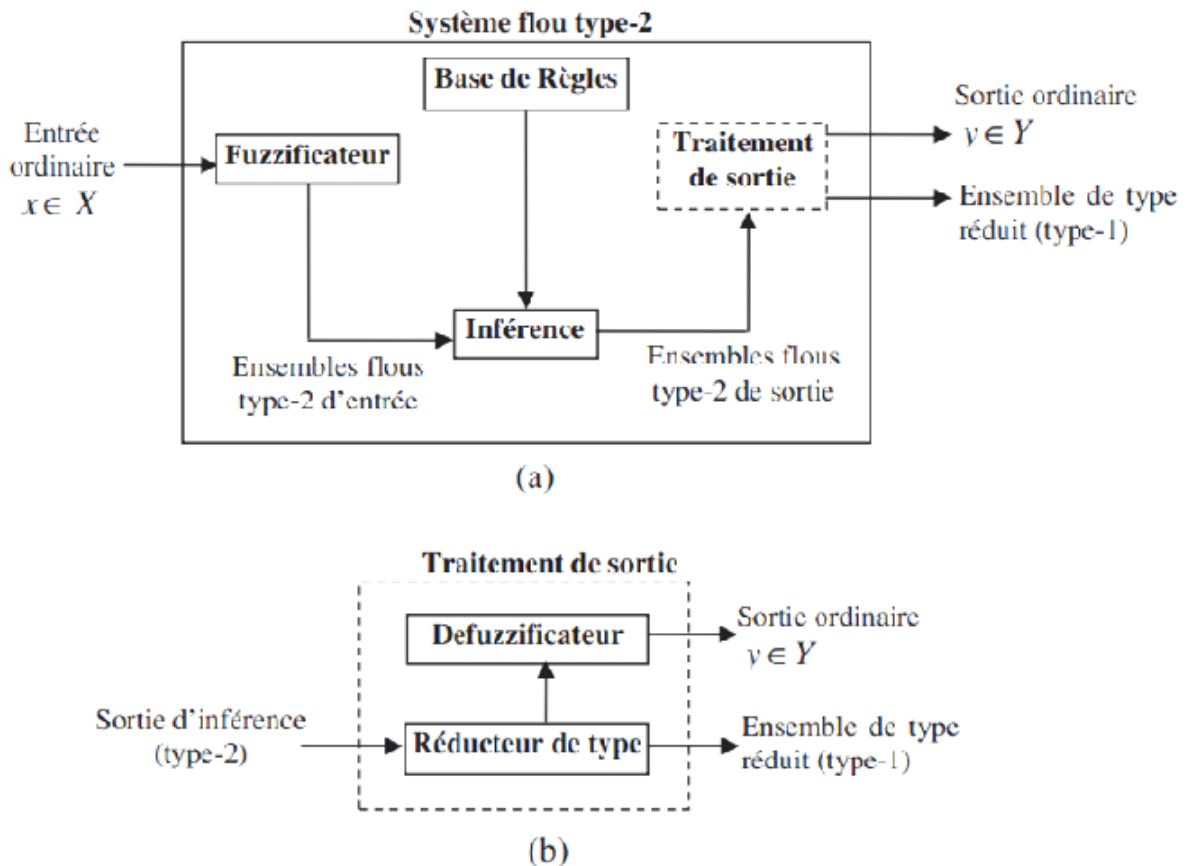


Figure [III.13] : structure d'un système flou type-2, avec ses deux sorties

➤ **Le module du traitement de la sortie**

Le module de traitement de la sortie se compose de deux blocs, le Réducteur de type et l'Inférence de défuzzification. Les méthodes de réduction de type donnent un EFT-1 à partir de l'EFT-2 obtenu à la sortie du mécanisme d'inférence. L'ensemble résultant obtenu par la réduction de type sera par la suite défuzzifié pour obtenir une sortie numérique (déterministe).

- **Réduction du type**

Dans un système flou type-1, où les ensembles de sortie sont des ensembles flous type-1, nous effectuons la défuzzification dans le but d'obtenir une valeur numérique (ensemble de type-0) représentant la combinaison des ensembles de sortie.

Dans le cas du type-2, les ensembles de sortie sont des ensembles de type-2 ; donc nous devons utiliser des versions étendues des méthodes de défuzzification de type-1 appelée la réduction de type [22]. Cette opération va transformer l'ensemble flou type-2 résultant en un ensemble flou type-1 appelé ensemble type réduit, qui sera défuzzifié par la suite. Cet ensemble type réduit résultant prend en considération plus d'information au sujet des incertitudes des règles que la valeur défuzzifié (un nombre).

Parmi les méthodes de réduction de type utilisées on cite :

- *La réduction de type par le centre de gravité
- *La réduction du type par la hauteur
- *La réduction de type par le centre des ensembles

- **Défuzzification**

A la fin de l'étape de la réduction de type, on obtient un EFT-1, type réduit et presque les entrées du système à commander sont des valeurs précises, alors il est nécessaire de transformer l'ensemble type réduit en une valeur numérique bien déterminée [26]. Les méthodes utilisées pour la défuzzification sont les mêmes que pour type-1 (cité précédemment). Mais la plus utilisée c'est celle de centre de gravité.

La façon la plus naturel de faire ceci est de trouver le centre de gravité de l'ensemble type réduit. Le calcul du centre de gravité est équivalent a trouvé une moyenne pondérée des sorties de tous les ensembles flou type-1 imbriqués dans le système flou type-2, où les poids correspondent aux appartenances dans l'ensemble type réduit.

III.12 conclusion

Dans ce chapitre, Plusieurs notion de base de la théorie de la logique floue type-1 sont présentées ainsi que la démarche a suivre pour la conception d'un régulateur flou et les différentes méthodes de la logique Floue.

En effet la conception d'un système flou commence par le choix des variables linguistiques qui déterminent son état, puis des règles linguistiques qui établissent les relations d'inférence entre ces variables.

La structure des systèmes flous type-1 et type-2 ainsi le fonctionnement de leurs différents blocs constituant sont détaillés.

Dans le chapitre suivant, la propriété d'approximation des systèmes flous et la robustesse de la commande par mode glissant, seront exploitées pour développer une structure de la commande floue par mode glissant pour prendre en charge des systèmes non linéaire multivariables

Chapitre IV

SIMULATION ET APPLICATION DES COMMANDES

IV.1. Introduction

Le développement d'une loi de commande pour un système donné suppose la disponibilité de modèle mathématique. Cependant l'obtention de ce modèle est généralement une opération qui n'est pas facile. Pour contourner ce problème, l'approximation du modèle ou de la loi de commande peut être une alternative. Dans ce contexte l'utilisation des lois de commande classique, ne permet pas de garantir de bonne performances de poursuite en présence des perturbations externes ou des variations structurelles, d'où la nécessité d'utilisé des commandes robustes.

La commande par mode glissant peut être une alternative à ce problème, en raison de sa robustesse vis-à-vis des incertitudes et des perturbations externes.

Cependant, la présence de la fonction signe, dans la partie discontinue de la commande, provoque le phénomène de broutement qui est indésirable.

Pour remédier a ce problème, plusieurs solutions on été proposée dans la littérature.

Dans ce chapitre nous allons proposée de remplacer la fonction signe de la partie discontinue par la fonction saturation afin d'éliminer le phénomène de chattering. Ensuite d'introduire des perturbations à un instant donné à fin de testé la robustesse de la commande.

Enfin nous allons faire une conception d'un régulateur flou, que nous allons introduire dans la partie discontinue de la commande par mode glissant pour éliminer le chattering tout en restant robuste et insensible ou perturbations.

IV.2 Modèle dynamique du robot

Le modèle du robot manipulateur didactique à 2 degrés de liberté est représenté par la figure suivante est donné par l'équation (I.25) développée dans le chapitre I :

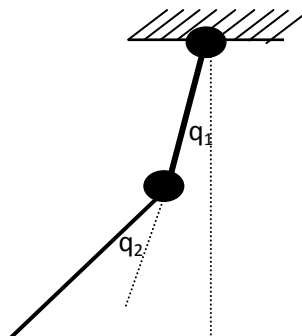


Figure [IV.1] : Robot manipulateur didactique à 2ddl

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau$$

Les matrices $M(q)$, $C(q, \dot{q})$ et $G(q)$ de notre système sont donnée respectivement par (I.33), (I.34) et (I.36):

$$M(q) = \begin{bmatrix} 8.77 + 1.02 \cos(q_2) & 0.76 + 0.51 \cos(q_2) \\ 0.76 + 0.51 \cos(q_2) & 0.62 \end{bmatrix}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -0.5 \sin(q_2) \dot{q}_2 & -0.5 \sin(q_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ 0.5 \sin(q_2) \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G(q) = 10 \begin{bmatrix} 7.6 \sin(q_1) + 0.63 \sin(q_1 + q_2) \\ 0.63 \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix}$$

Avec : $M(q)$ la matrice d'inertie, $C(q, \dot{q})$ la matrice des termes de Coriolis et forces centrifuges et $G(q)$ le vecteur de gravité.

IV.3. Application des commandes classiques

Nous allons appliquer et simuler les lois de commande classique développées dans le chapitre I.

IV.3.1. Application de la loi de commande point à point

Les paramètres de la loi de commande proportionnelle dérivée avec compensation de l'effet de gravité, donnée par la formule (I.37) dont le schéma bloc et représenté par la figure [I.13] sont :

- ❖ Le gain de position : $Kp = \begin{bmatrix} 580 & 0 \\ 0 & 470 \end{bmatrix}$
- ❖ Le gain de vitesse : $Kv = \begin{bmatrix} 132 & 0 \\ 0 & 60 \end{bmatrix}$
- ❖ Les positions désirées sont : $qd = \begin{bmatrix} 1.5 \\ 1.6 \end{bmatrix}$

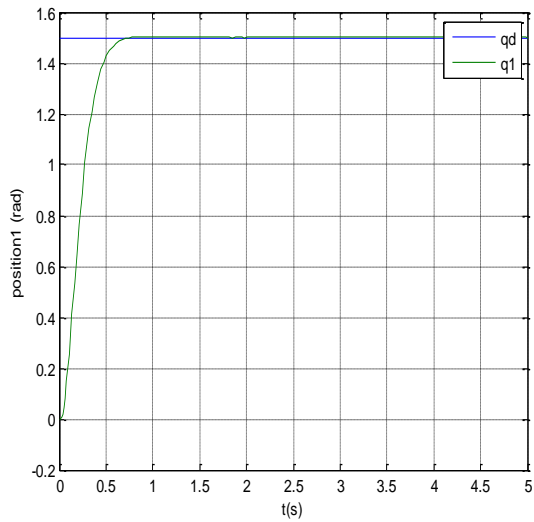


Figure [IV.3.1.a] : allure de la position 1 avec la commande point à point

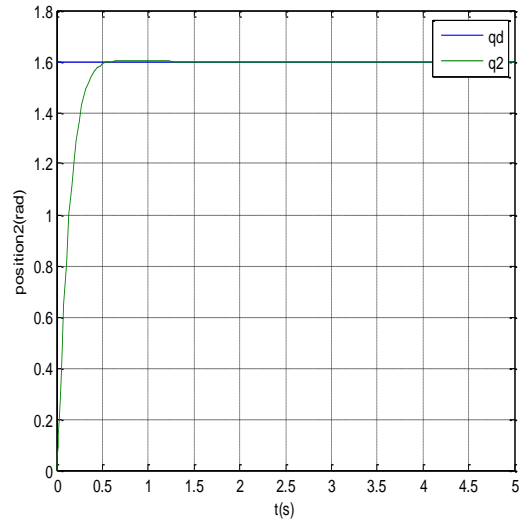
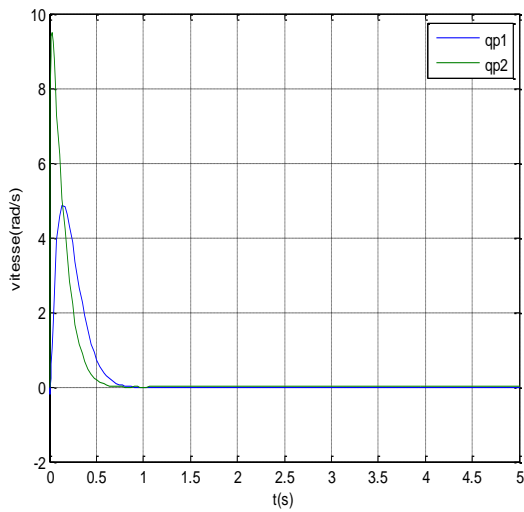


Figure [IV.3.1.b]: allure de la Position 2 avec la commande point à point



Figure[IV.3.1.c] : allures des vitesses avec la commande point à point

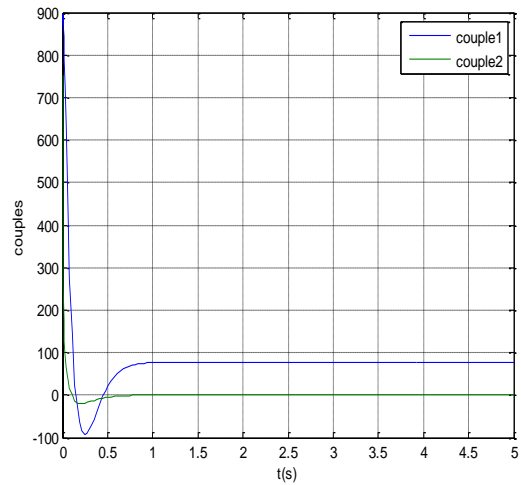


Figure [IV.3.1.d] : allures des couples avec la commande point à point

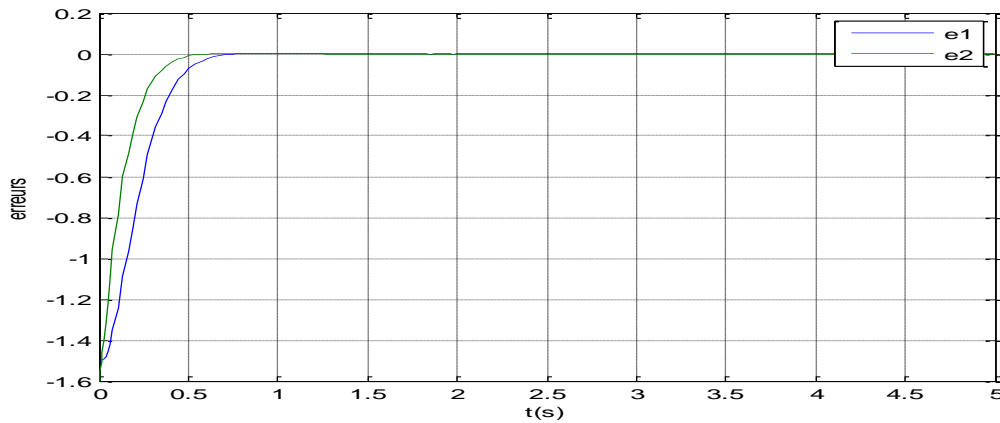


Figure [IV.3.1.e] : allures des erreurs de position 1 et 2

➤ **Interprétation des résultats**

D'après la figure [IV.3.1.a] et la figure [IV.3.1.b] nous remarquons que l'articulation 1 et l'articulation 2 atteignent les valeurs désirées 1.5 rad et 1.6 rad respectivement.

Et temps de réponse pour l'articulation 1 est de 0.5s et pour l'articulation 2 est de 0.34s.

D'après la figure [IV.3.1.d], on remarque que les couples des deux articulations sont très élevés.

Les erreurs de position, illustrées dans la figure [IV.3.1.e] convergent vers zéro.

IV.3.2 Application de la loi de commande du couple calculé

Nous allons mettre en évidence la loi de commande donnée par formule (I.52), dont le schéma bloc est représenté par la figure [I.18].

Les trajectoires désirées sont générées en utilisant le polynôme d'interpolation de degré 5 donnée par la formule (I.48) et illustré par la figure [I.16].

Les gains proportionnel et dérivée utilisés sont :

$$\diamond Kp = \begin{bmatrix} 900 & 0 \\ 0 & 440 \end{bmatrix}$$

$$\diamond Kv = \begin{bmatrix} 55 & 0 \\ 0 & 40 \end{bmatrix}$$

Les résultats de simulation sont présentés comme suit :

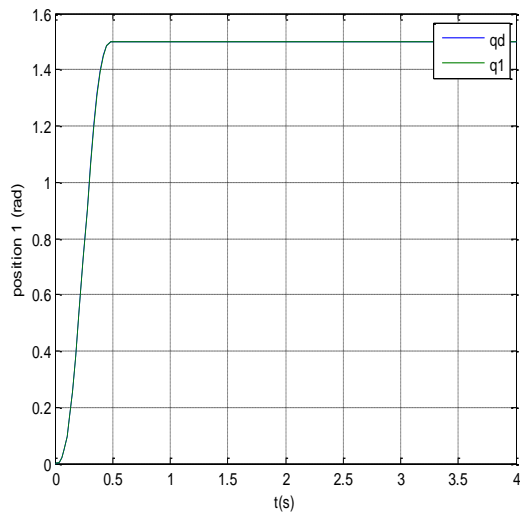


Figure [IV.3.2.a] : allure de la position 1 avec la commande du couple calculé

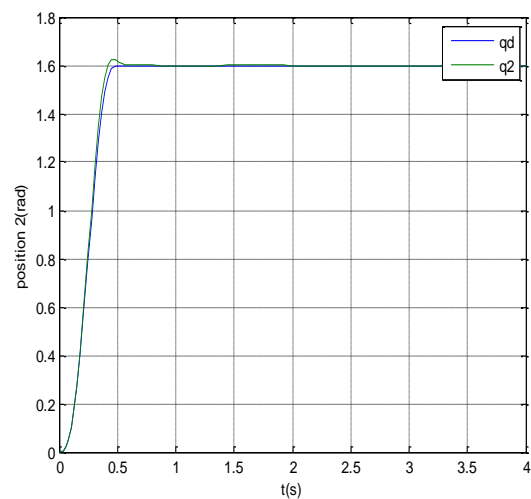


Figure [IV.3.2.b] : allure de la position 2 avec la commande du couple calculé

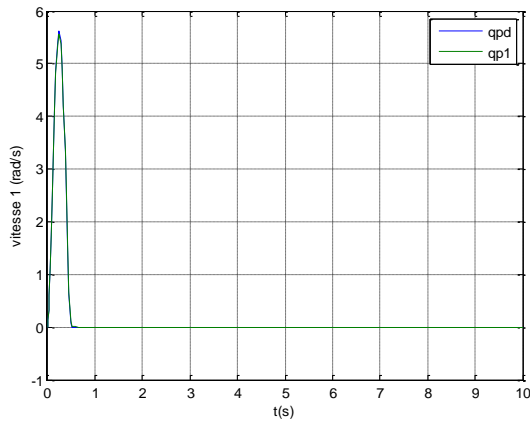


Figure [IV.3.2.c] : allure de la vitesse 1 avec la commande du couple calculé

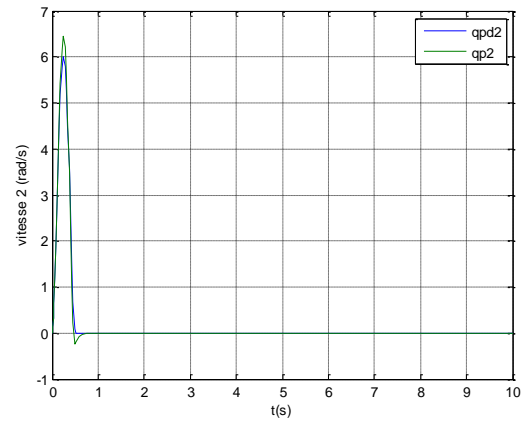


Figure [IV.3.2.d] : allure de la vitesse 2 avec la commande du couple calculé

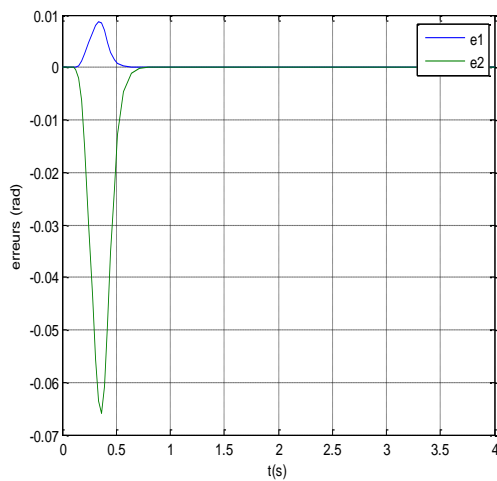


Figure [IV.3.2.e] : allures des erreurs de position avec la commande du couple calculé

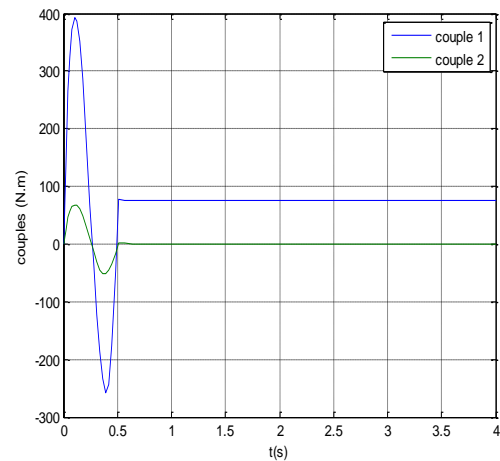


Figure [IV.3.2.f] : allures des couples avec la commande du couple calculé.

➤ **Interprétation des résultats**

D’après les figures si dessus on remarque qu’on a une bonne poursuite des trajectoires désirées en position et en vitesse.

Les erreurs de position des deux articulations convergent vers zéro.

IV.4. Application des commandes développées

IV.4.1 Commande par modes glissants (MG)

La synthèse de la loi de commande en mode glissant du bras manipulateur à 2ddl, donnée par la formule (II.11), dont le modèle dynamique est donné par l'équation (I.25) s'illustre comme suit :

On a donc d'une part :

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

Et d'autre part :

$$M(q)\ddot{q} + C(q)\dot{q} + G(q) = \tau$$

✓ Calcul de la loi de commande équivalente u_{eq}

$$\ddot{q} = M^{-1}[u_{eq} - C(q)\dot{q} - G(q)] \quad (IV.1)$$

☞ **Calcul du degré relatif**

$$L_g L_f^i h(x) = 0 \quad \text{avec} \quad i=0 \dots r-1 \quad (IV.2)$$

Le modèle d'état non linéaire est donné comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x) u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (IV.3)$$

Calcul du modèle d'état de notre système

On pose :

$$\begin{cases} \begin{cases} x_1 = q \\ x_2 = \dot{q} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{q} = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{q} \end{cases} \\ h(x) = q = x_1 \end{cases}$$

Après des calculs mathématiques, on trouve :

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{pmatrix} x_2 \\ -M^{-1}(C x_2 + G) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{pmatrix} u \\ y = h(x) = x_1 \end{cases} \quad (IV.4)$$

Tell que :

$$f(x) = \begin{pmatrix} x_2 \\ -M^{-1}(C x_2 + G) \end{pmatrix}$$

$$g(x) = \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{pmatrix}$$

Pour $i=0$

$$L_g h(x) = \left[\frac{\partial h(x)}{\partial x_1} \quad \frac{\partial h(x)}{\partial x_2} \right] g(x) = 0 \quad (\text{IV.5})$$

Pour $i=1$

$$L_g L_f^1 h(x) = L_g \left(\left[\frac{\partial h(x)}{\partial x_1} \quad \frac{\partial h(x)}{\partial x_2} \right] f(x) \right) = M^{-1} \quad (\text{IV.6})$$

Avec $M^{-1} \neq 0$

D'où

$$r-1=1 \Rightarrow r=2$$

Donc le degré relatif $r=2$

La relation (II.6) s'écrit comme suit :

$$s = \lambda e + \dot{e}$$

$$\text{Et } \dot{s} = \lambda \dot{e} + \ddot{e}$$

Au régime glissant

$$s = \dot{s} = 0$$

Donc

$$\dot{s} = \lambda(\dot{q} - \dot{q}_d) + (\ddot{q} - \ddot{q}_d) = 0$$

$$\Rightarrow \ddot{q} = \ddot{q}_d - \lambda(\dot{q} - \dot{q}_d) \quad (\text{IV.7})$$

On a :

$$\ddot{q}_d - \lambda(\dot{q} - \dot{q}_d) = M^{-1}[u_{eq} - C(q)\dot{q} - G(q)] \quad (\text{IV.8})$$

D'où :

$$u_{eq} = C(q)\dot{q} + G(q) + M[\ddot{q}_d - \lambda(\dot{q} - \dot{q}_d)] \quad (IV.9)$$

✓ La commande discontinue est donnée par

$$u_d = -K\text{sign}(s(e))$$

✓ Donc la commande globale est donnée comme suit :

$$u = C(q)\dot{q} + G(q) + M[\ddot{q}_d - \lambda(\dot{q} - \dot{q}_d)] - K\text{sign}(s(e)) \quad (IV.10)$$

Le schéma de simulation de la commande par modes glissants

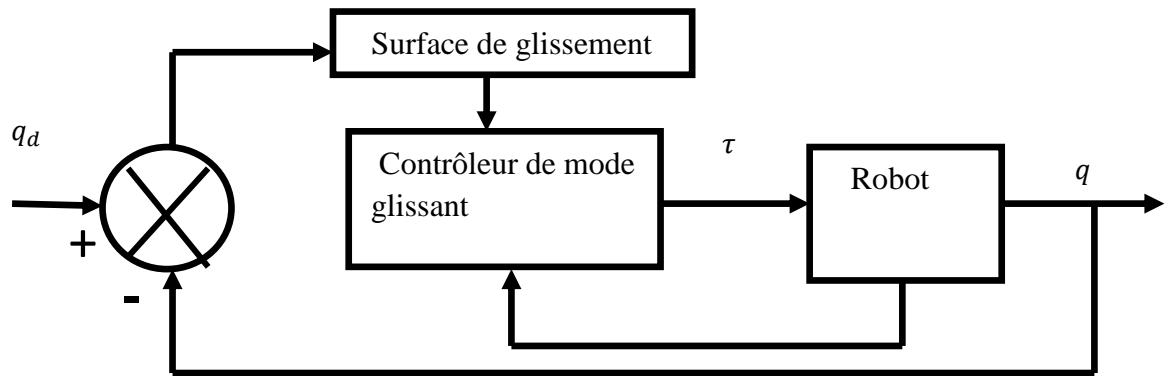


Figure [IV.1] : Schéma bloc de la commande par modes glissants

IV.4.1.1 la simulation en mode régulation

Dans cette partie, nous allons représenter les résultats de simulation de notre système, en mode régulation, commandé par le contrôleur à modes glissants.

Après application de cette commande, Son comportement, est illustré par les figures suivantes :

Pour les gains suivants :

☞ $K1=800$

☞ $K2=290$

Et

$\lambda=15$

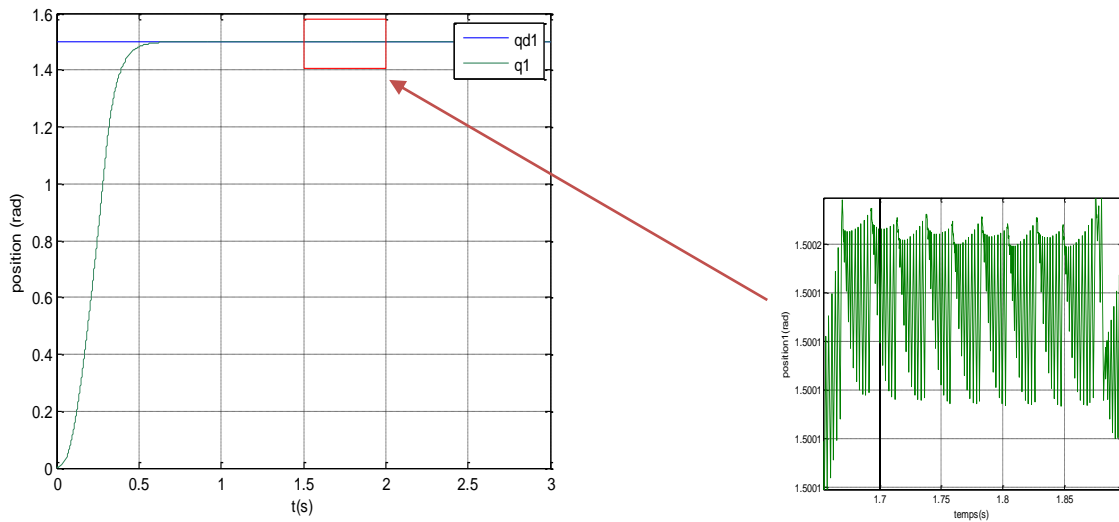


Figure [IV.4.1.1.a]: Allure de la position 1 et illustration du phénomène de Chattering avec la commande par modes glissants

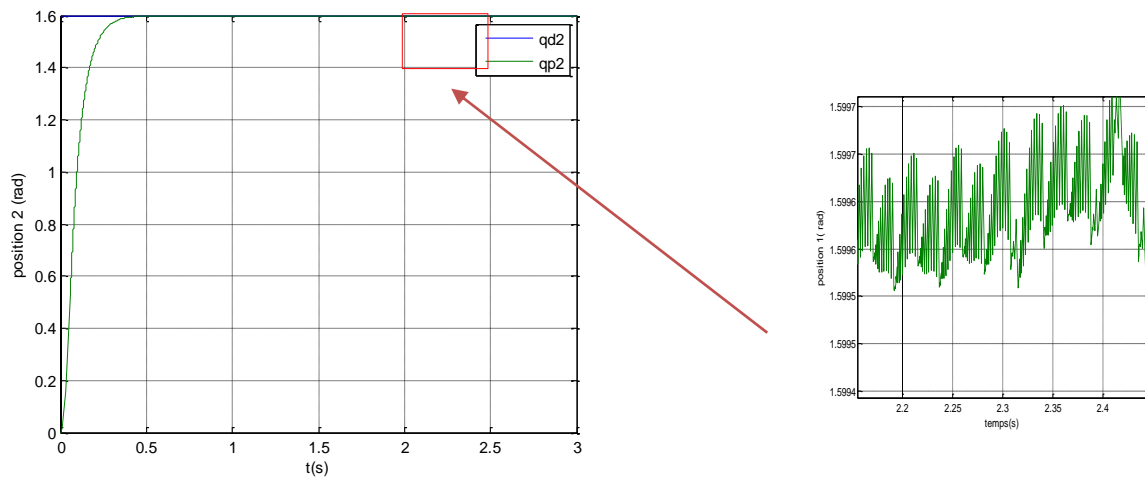


Figure [IV.4.1.1.b]: Allure de la position 2 et illustration du phénomène de Chattering avec la commande par modes glissants

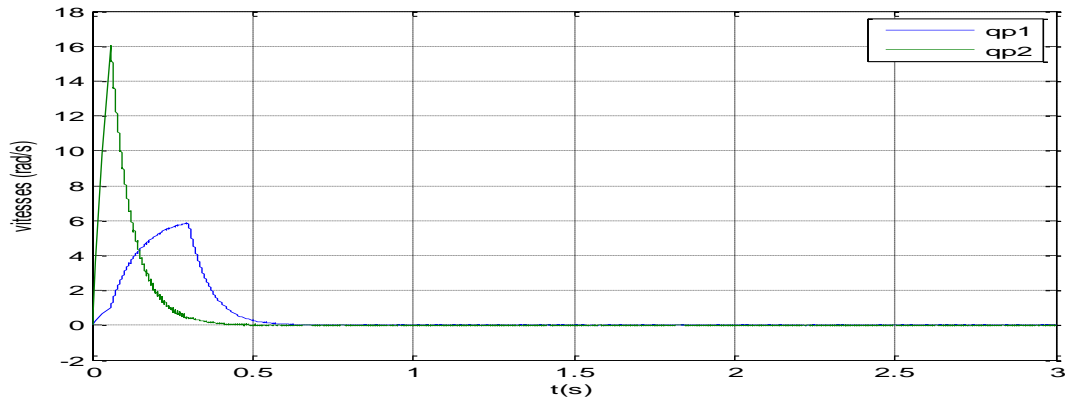


Figure [IV.4.1.1.c]: Allures des vitesses angulaires avec la commande par modes glissants

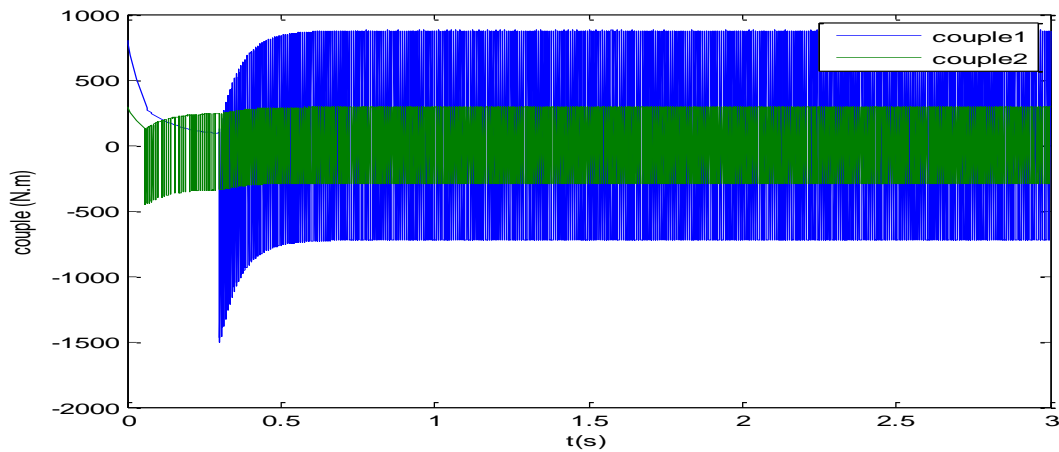


Figure [IV.4.1.1.d]: Allures des couples avec la commande par mode glissant

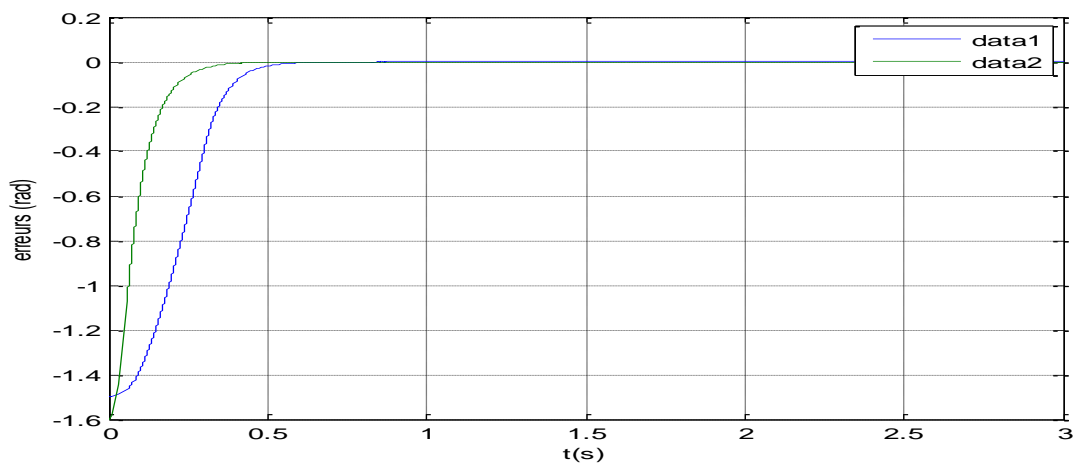


Figure [IV.4.1.1.e]: Allures des erreurs de position avec la commande par mode glissant

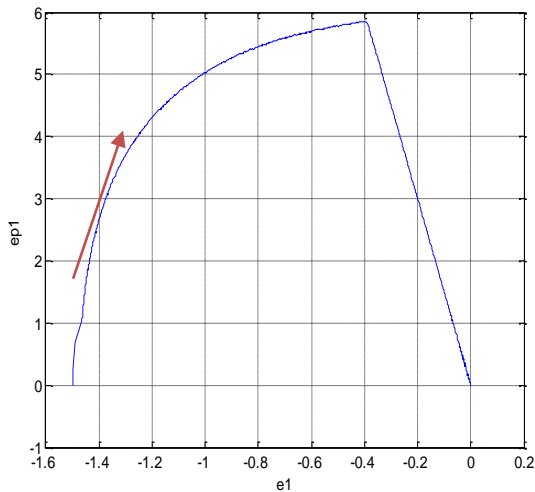


Figure [IV.4.1.1.f]: plan de phase de la première articulation

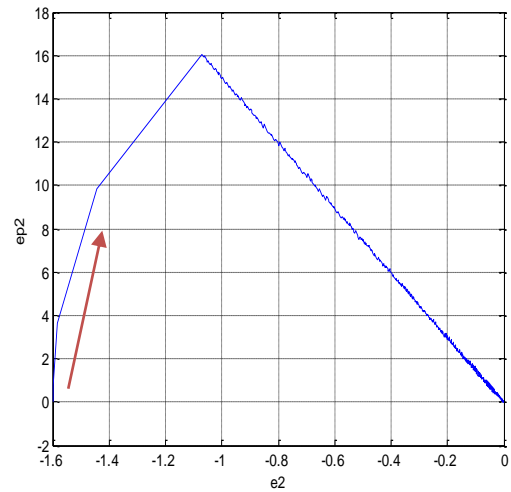


Figure [IV.4.1.1.g]: plan de phase de la deuxième articulation

➤ Interprétation des résultats

D'après la figure [IV.4.1.1.a], on remarque que l'articulation 1 atteint la valeur désirée ($q_{d1}=1.5$ rad) avec un temps de réponse de 0.41s.

Et de la figure [IV.4.1.1.b], la 2^{ème} articulation atteint la valeur désirée ($q_{d2}=1.6$ rad) avec un temps de réponse de 0.23s.

Et dans les deux cas, il y a apparition du phénomène de chattering (broutement, réticence) qui est dû à la fonction sign.

La figure [IV.4.1.1.e] montre que les erreurs de positions, convergent vers zéro,

☞ Élimination du phénomène de chattering

Pour éliminer le phénomène de chattering, nous proposons de remplacer la fonction **sign** par une autre fonction, dite fonction de **saturation**.

Les résultats de simulation sont représentés par les figures suivantes

Nous avons utilisé les mêmes paramètres que précédemment

❖ $k_1=800$

❖ $k_2=290$

Et

❖ $\lambda=15$

Les résultats de simulation sont représentés comme suit :

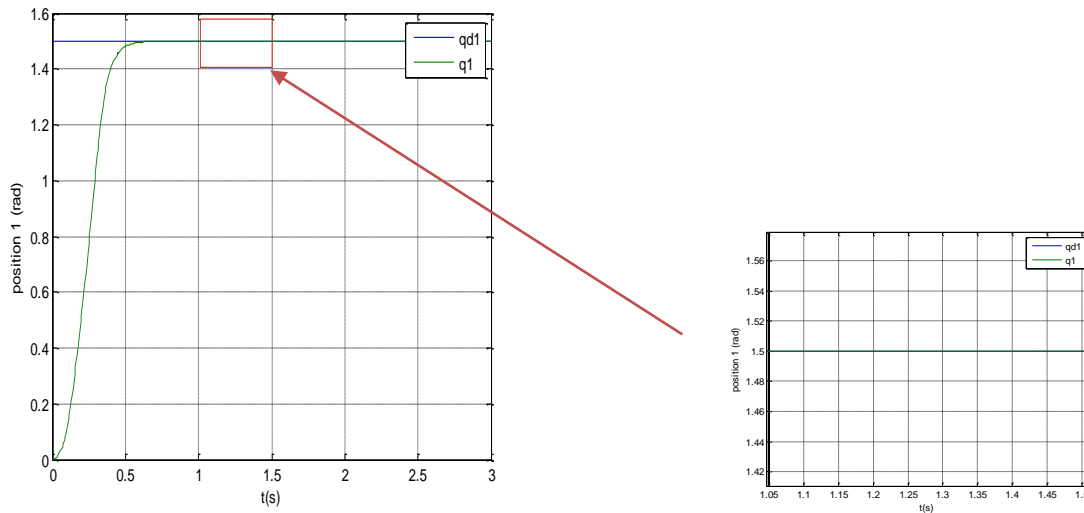


Figure [IV.4.1.1.h]: Allure de la position 1 avec la commande par mode glissant (avec la fonction sat)

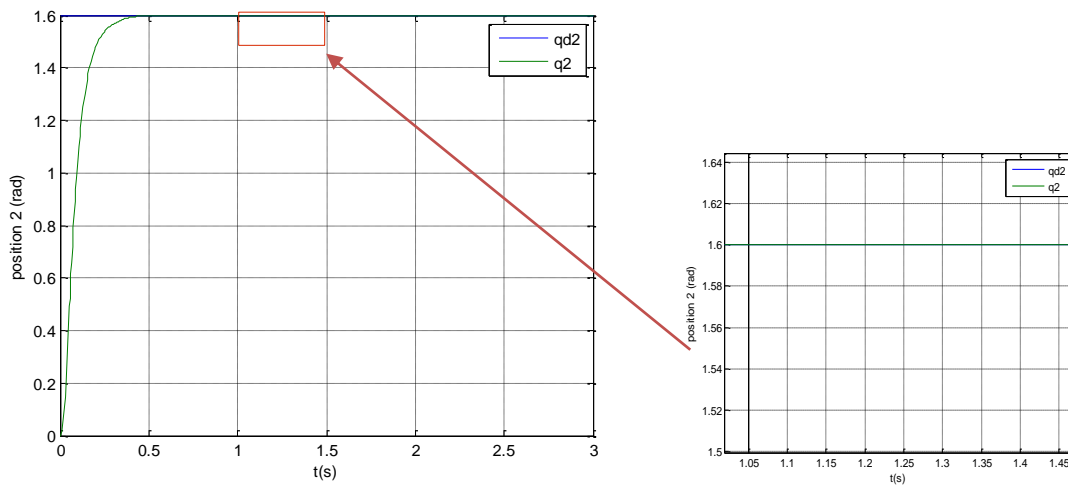


Figure [IV.4.1.1.i]: allure de la position 2 avec la commande par mode glissant (avec la fonction sat)

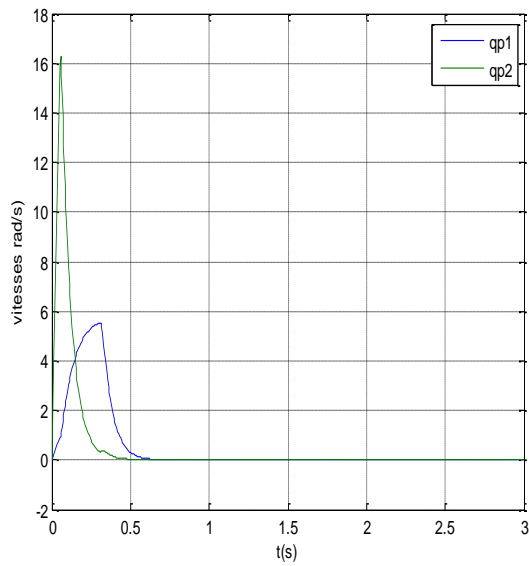


Figure [IV.4.1.1.j]: Allures des vitesses avec la commande par modes glissants (avec la fonction sat)

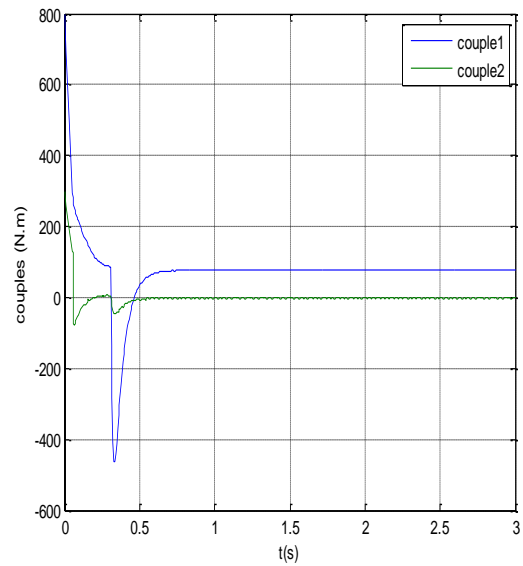


Figure [IV.4.1.1.k]: Allures des couples avec la commande par modes glissants (avec la fonction sat)

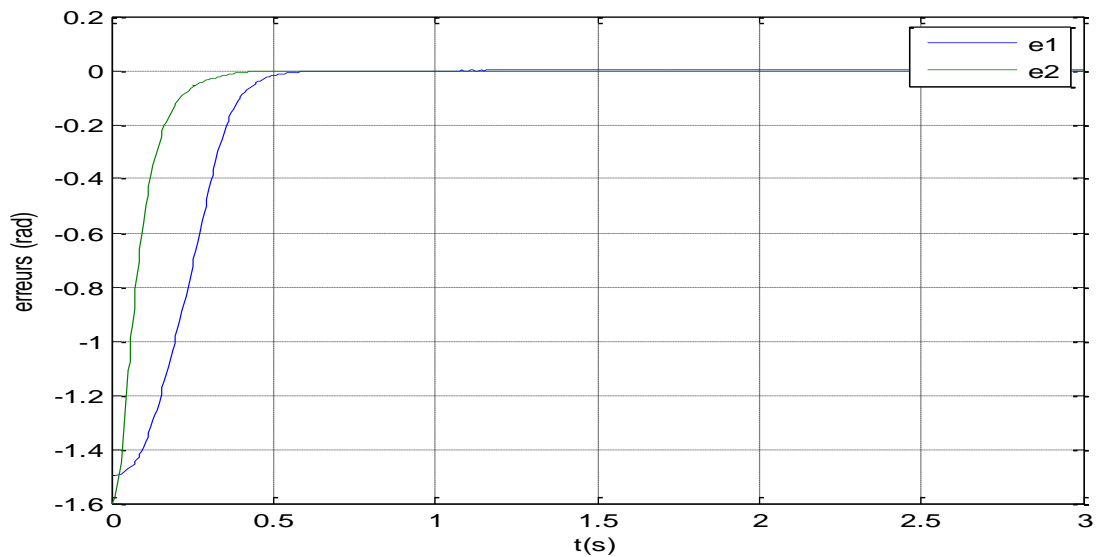


Figure [IV.4.1.1.l]: Allures des erreurs de position avec la commande par mode glissant (avec la fonction sat)

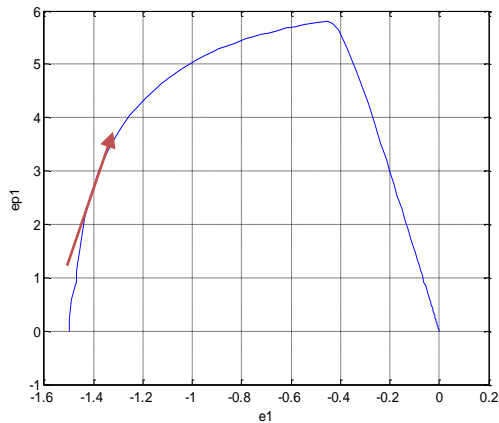


Figure [IV.4.1.1.m]: plan de phase 1 avec la commande par modes glissants (avec la fonction sat)

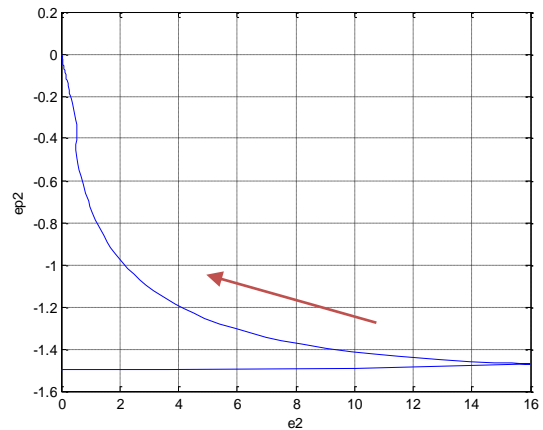


Figure [IV.4.1.1.n]: plan de phase 2 avec la commande par modes glissants (avec la fonction sat)

➤ Interprétation des résultats

D'après la figure [IV.4.1.1.h], le phénomène de chattering est éliminé et le temps de réponse est le même ($tr=0.41s$) et on remarque la même chose pour la 2^{ème} articulation dans la figure [IV.4.1.1.i] ($tr=0.23s$).

Remarque :

On constate que la fonction saturation a éliminé le chattering sans pour autant modifier les performances du système.

IV.4.1.2- Simulation en mode poursuite de trajectoire

Dans cette partie, nous allons représenter les résultats de simulation de notre système, en mode poursuite de trajectoire, commandé par le contrôleur à mode glissant avec la fonction saturation.

Pour les gains suivants :

- ❖ $K1=800$
- ❖ $K2=290$

- Et
- ❖ $\lambda=15$
- Et
- ❖ Les conditions initiales sont différentes de zéro (CI=0.2).

Après application de cette commande, Son comportement, est illustré par les figures suivantes :

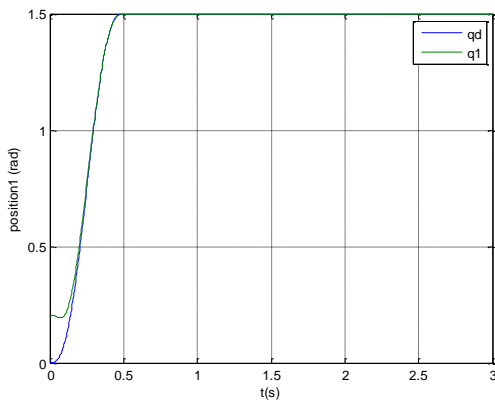


Figure [IV.4.1.2.g]: allure de la position 1 commandé par mode glissant avec la fonction sat.

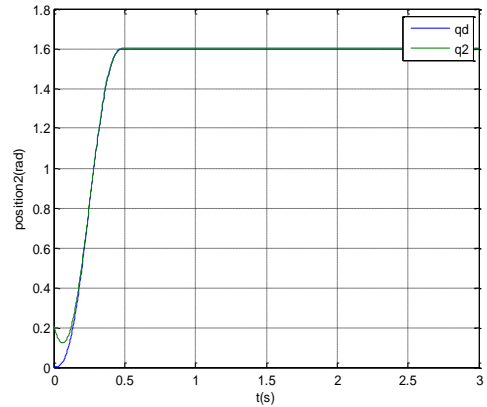


Figure [IV.4.1.2.h]: allure de la position 2 commandé par mode glissant avec la fonction sat.

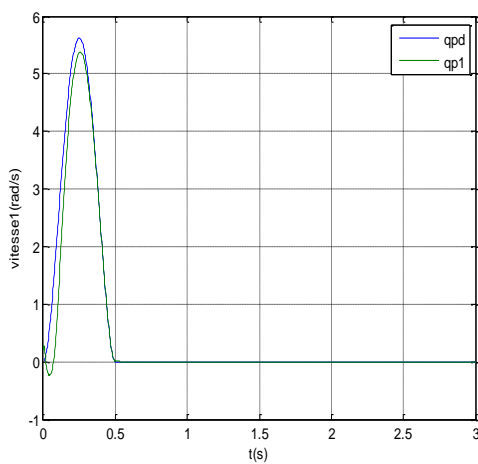


Figure [IV.4.1.2.i] : allure de la vitesse 1 commandé par mode glissant avec la fonction sat.

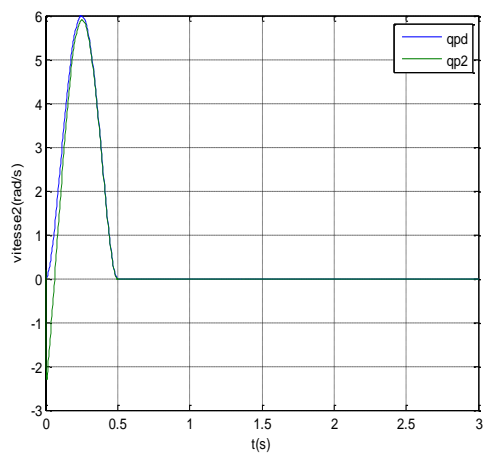


Figure [IV.4.1.2.j] : allure de la vitesse 2 commandé par mode glissant avec la fonction sat.

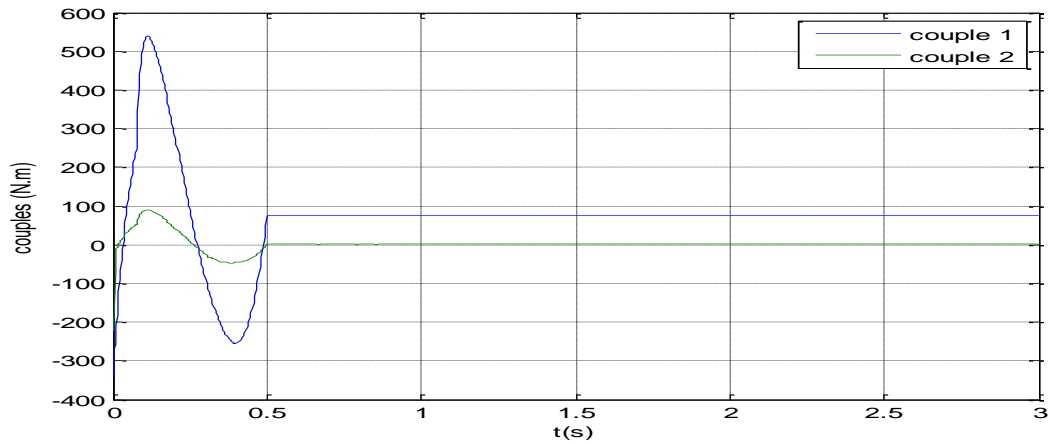


Figure [IV.4.1.2.k]:allure des couples 1 et 2, commandé par mode glissant avec la fonction sat.

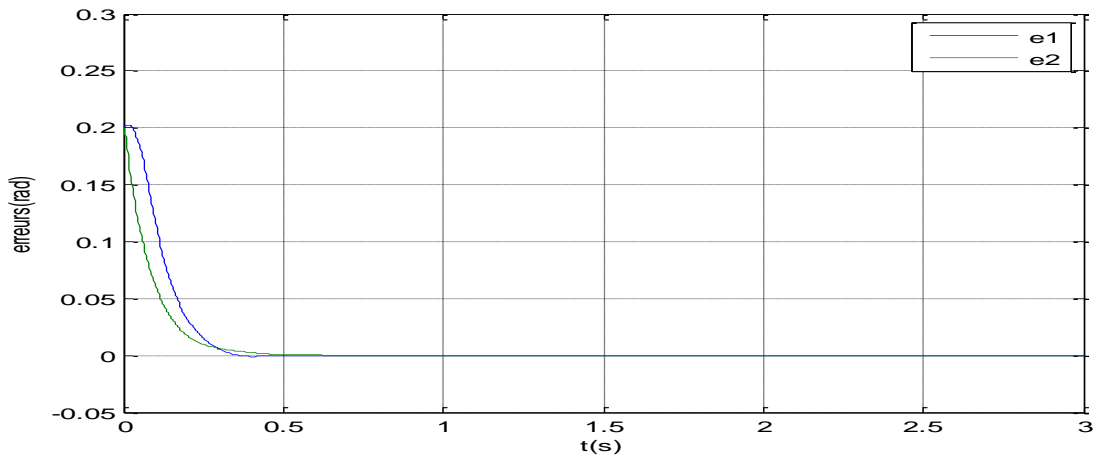


Figure IV.4.1.2.l : allures des erreurs de position 1 et 2, commandé par mode glissant avec la fonction sat.

Interprétation des résultats de simulation

D'après les figures [IV.4.1.2.g], [IV.4.1.2.h], on remarque que les deux articulations 1 et 2 poursuivent les trajectoires désirées en position et les figures [IV.4.1.2.i],[IV.4.1.2.j] en vitesse angulaire.

On constate que phénomène de Chattering n'apparaît pas.

La figure [IV.4.1.2.k] montre que le couple maximum qu'il faut appliquer à l'articulation 1 est de 540 N.m et de 90 N.m pour la 2^{ème} articulation.

La figure [IV.4.1.2.1] montre que les erreurs de position des deux articulations, convergent vers zéro

IV.4.2-Test de régulation

Dans ce passage, nous allons introduire des perturbation (d) sur notre système à un instant donnée.

Avec :

- ❖ $d=[20;20]$ à $t=1.2s$
- ❖ $k_1=800$
- ❖ $k_2=290$
- ❖ $\lambda=15$

Les résultats de simulation son représenté comme suit :

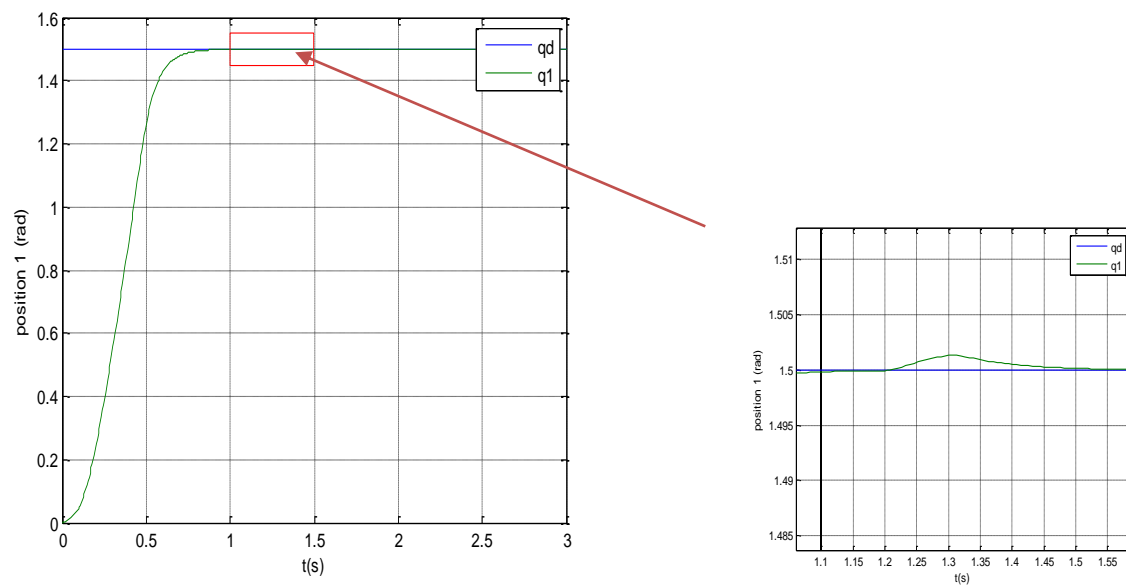


Figure [IV.4.2.a] : allure de position 1, commandé par le mode glissant, avec fonction saturation et des perturbations.

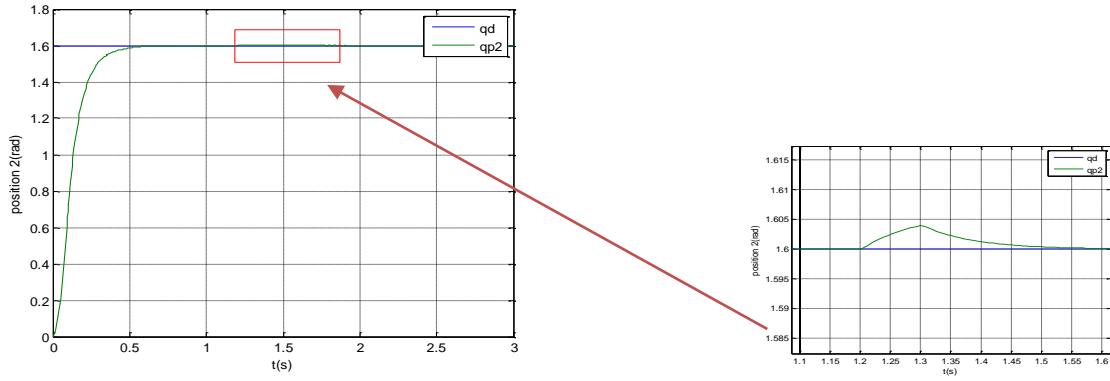


Figure [IV.4.2.b] : allure de position 1, commandé par le mode glissant, avec fonction saturation et des perturbations

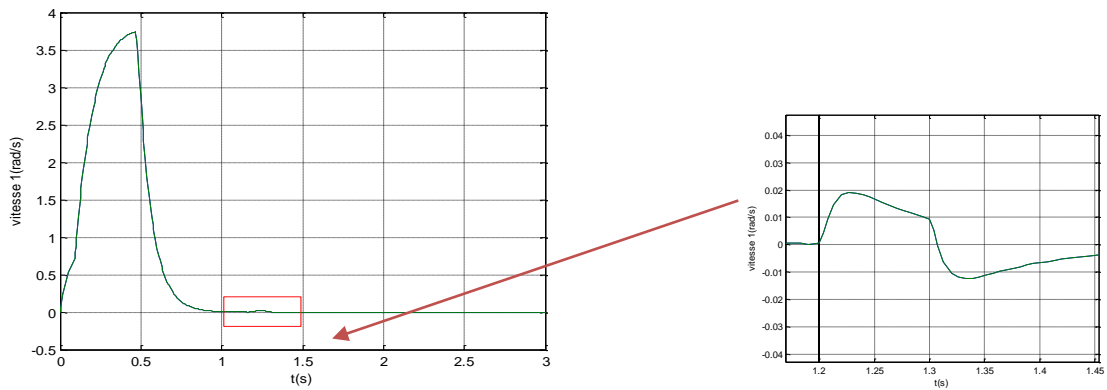


Figure [IV.4.2.c] : allure de vitesse 1, commandé par le mode glissant, avec fonction saturation et des perturbations.

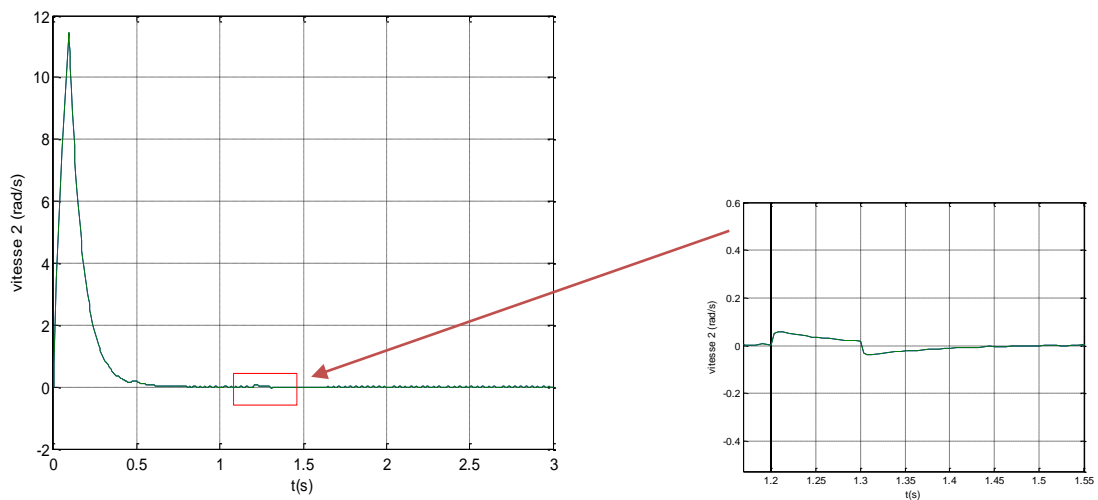


Figure [IV.4.2.c] : allure de vitesse 1, commandé par le mode glissant, avec fonction saturation et des perturbations.

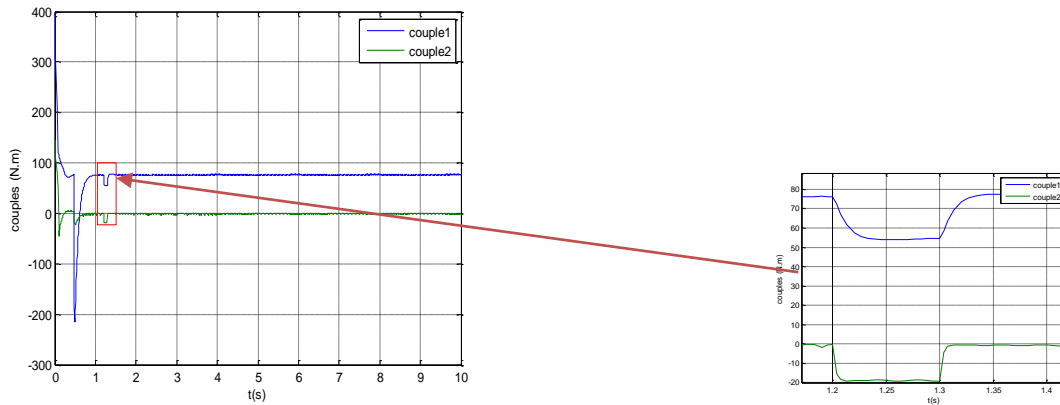


Figure [IV.4.2.d] : allure des couples, commandé par le mode glissant, avec fonction saturation et des perturbations.

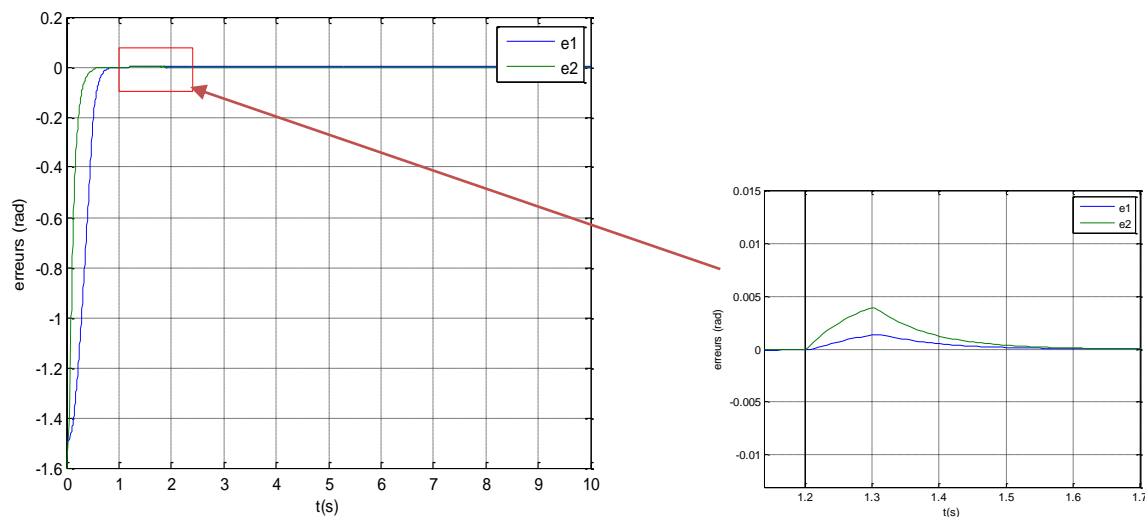


Figure [IV.4.2.e] : allure des erreurs, commandé par le mode glissant, avec fonction saturation et des perturbations.

➤ **Interprétation des résultats**

D'après les figures précédentes, on constate que le système réagit aux perturbations, à un instant donné, mais il revient à la position désiré.

Remarque

Le mode glissant est une commande robuste.

IV.4.2 commande floue glissant

IV.4.2.1 conception du régulateur flou

Dans cette partie, nous allons concevoir un régulateur flou de type Mamdani comportant quatre (04) entrées qui sont l'erreur 1 (e_1), sa dérivé (Δe_1) et l'erreur 2 (e_2), sa dérivé (Δe_2), les deux variables de sortie du régulateur sont u_1 et u_2 , qu'on mettra a la place de la commande équivalente du mode glissant.

- **Fonctions d'appartenance** les fonctions d'appartenance pour chaque entrée, sortie sont représenté comme suit deux fonctions trapézoïdal et une triangulaire

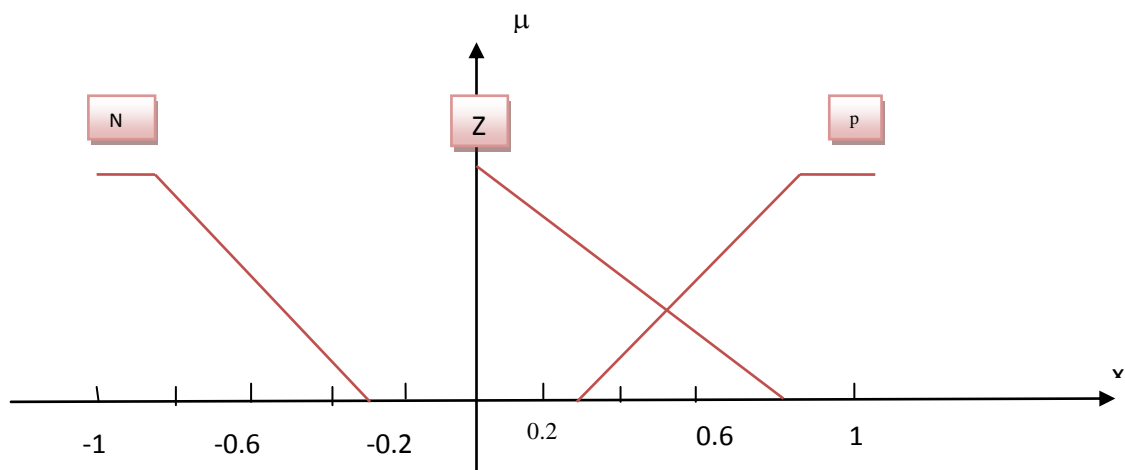


Figure [IV.4.2.1.a] : fonctions d'appartenance

Avec

N : Négatif

Z : Zéro

P : Positif

- **Règles d'inférence** les règles d'inférence utilisé sont représenté dans le tableau suivant :

$\Delta e \backslash e$	N	Z	P
N	N	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	P

Tableau [IV 1] la matrice d'inférence

Dans le cas présent, où chaque variable d'entrée est subdivisée en trois ensembles, on peut formuler au maximum dix-huit (18) règles d'inférence.

- Nous avons utilisé l'inférence max-min, la méthode de défuzzification utilisée est la méthode du centre de gravité et pour le choix des facteurs d'échelle (K_{e1} , $K_{\Delta e1}$, K_{e2} , $K_{\Delta e2}$, K_{u1} et K_{u2}) résultent après différents essais de simulation a fin d'avoir les meilleurs résultats.
- Le bloc de simulation est donné sous cette forme :

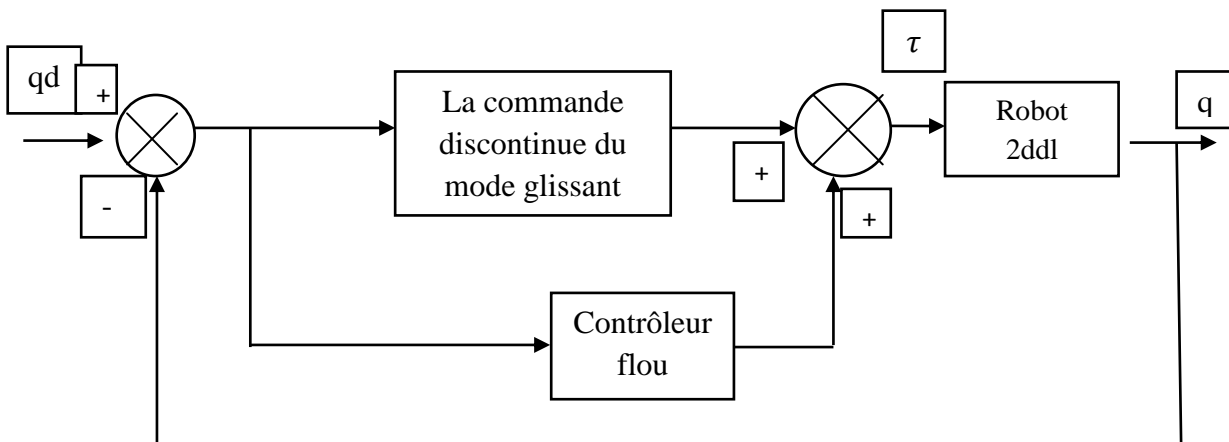


Figure [IV.4.2.1.b] : bloc de simulation mode glissant flou

IV.4.2.2 simulation de la commande floue glissant en mode régulation

Dans cette partie de notre travail, nous allons présenter les résultats de simulation après remplacement de la commande équivalente du mode glissant par un contrôleur flou.

Les gains de normalisation (ou facteurs d'échelle) et le λ (la pente de la surface de glissement), sont réajusté de façon a avoir un bon résultat tout ou long de la simulation.

Les résultats de simulation sont représentés comme suit :

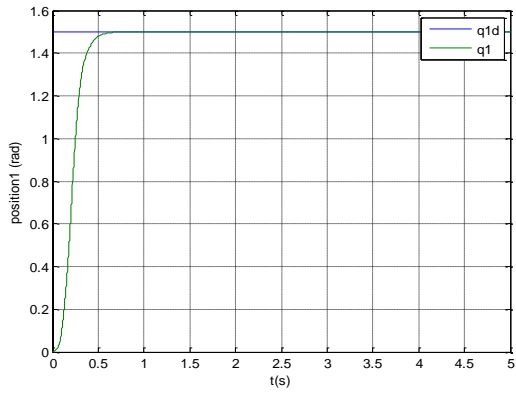


Figure [IV.4.2.2.a] : allure de la position 1 avec la commande par mode flou glissant

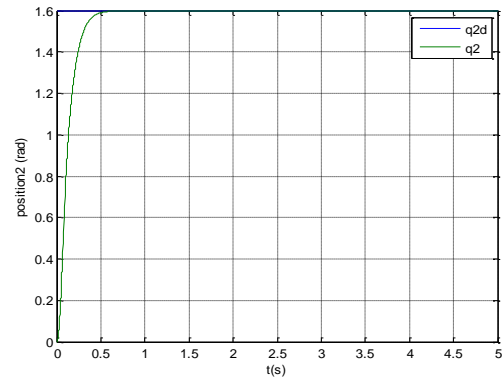


Figure [IV.4.2.2.b] : allure de la position 2 avec la commande par mode flou glissant

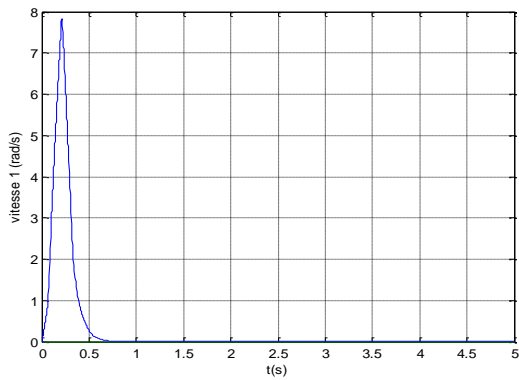


Figure [IV.4.2.2.c] : allure de la vitesse 1 avec la commande par mode flou glissant

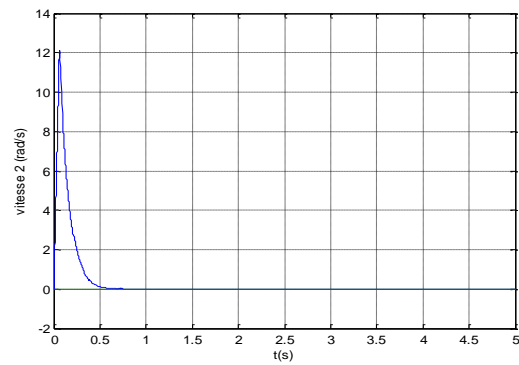


Figure [IV.4.2.2.d] : allure de la vitesse 2 avec la commande par mode flou glissant

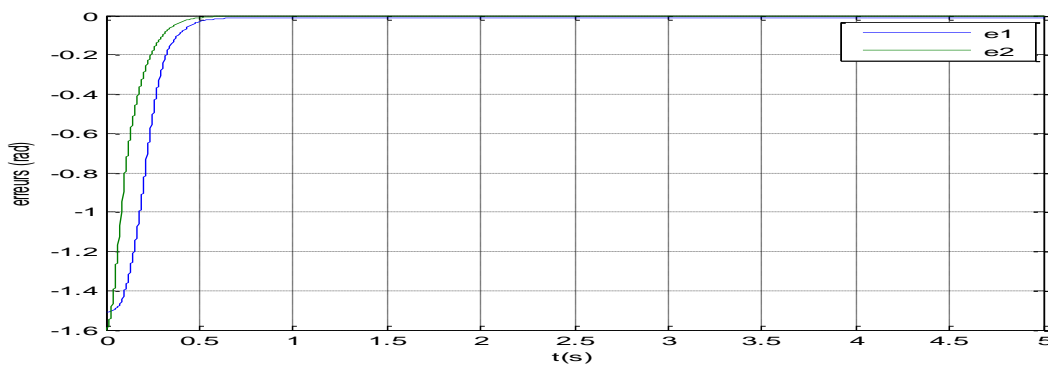


Figure [IV.4.2.2.e] : allures des erreurs de position 1 et 2 avec la commande par mode flou glissant

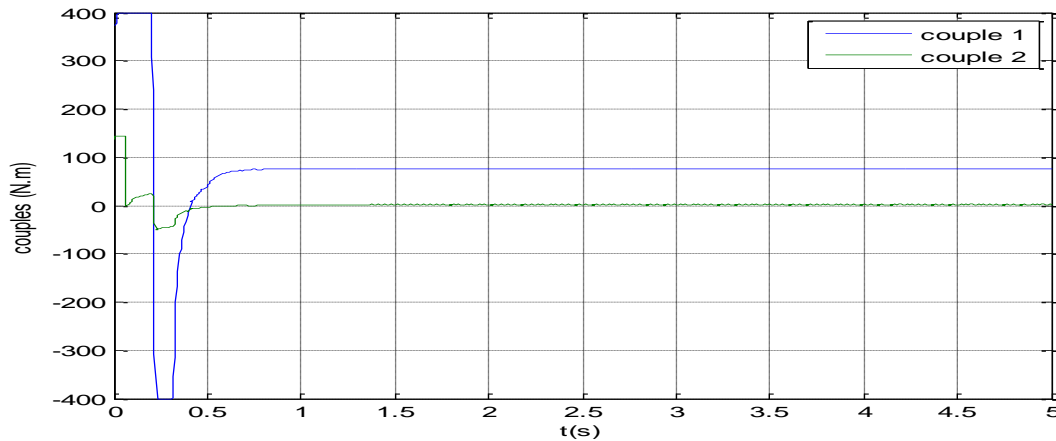


Figure [IV.4.2.2.f] : allures des couples de commande 1 et 2 avec la commande par mode fluou glissant

➤ Interprétation des résultats de simulation

Nous constatons des figures [IV.4.2.2.a] et [IV.4.2.2.b] que, le régulateur flou a maintenu la réponse du système sur la surface de glissement et la rendu linéaire (le même rôle que la commande équivalente du mode glissant), aussi les deux articulations atteignent les valeurs désirées 1.5 rad et 1.6 rad avec des temps de réponse de 0.39s et de 0.21s respectivement. Et la figure [IV.4.2.2.f] montre que les erreurs de positions convergent vers zéro.

IV.4.2.3 Simulation en mode Poursuite de trajectoire

Dans cette partie, nous allons représenter les résultats de simulation de notre système, en mode poursuite de trajectoire, commandé par un contrôleur flou glissant avec la fonction saturation et les mêmes paramètres du contrôleur en mode régulation

Après application de cette commande, Son comportement, est illustré par les figures suivantes :

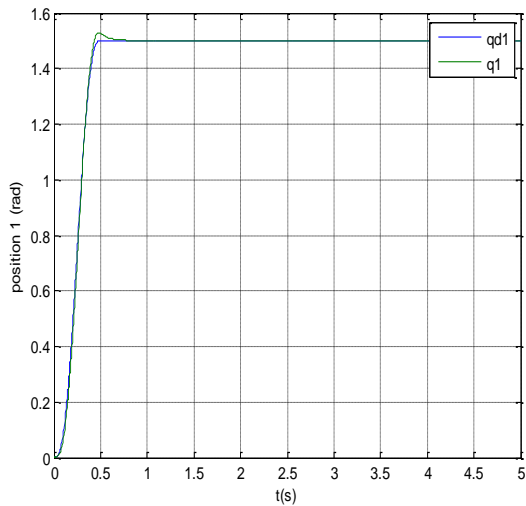


Figure [IV.4.2.3.a] : allure de la position 1 en mode poursuite de trajectoire avec la commande par mode flou glissant

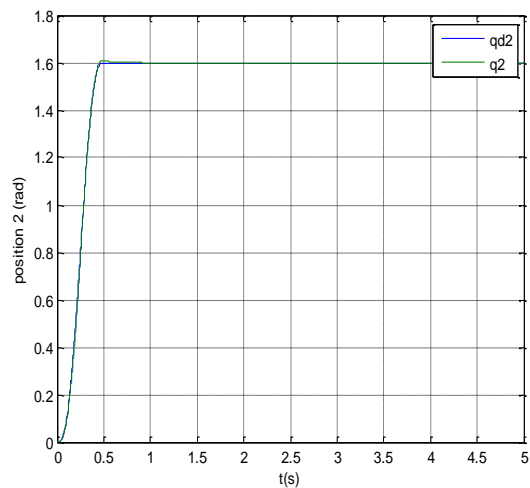


Figure [IV.4.2.3.b] : allure de la position 2 en mode poursuite de trajectoire avec la commande par mode flou glissant

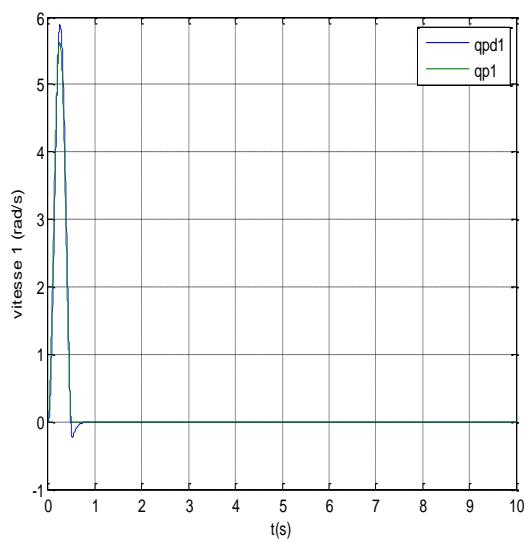


Figure [IV.4.2.3.c] : allure de la vitesse 1 en mode poursuite de trajectoire avec la commande par mode flou glissant

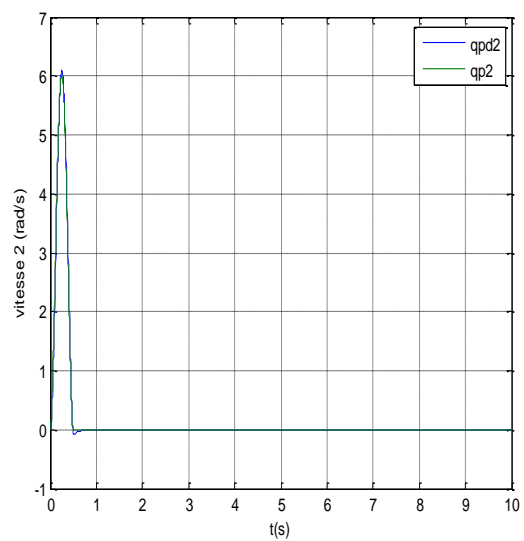


Figure [IV.4.2.3.d] : allure de la vitesse 2 en mode poursuite de trajectoire avec la commande par mode flou glissant

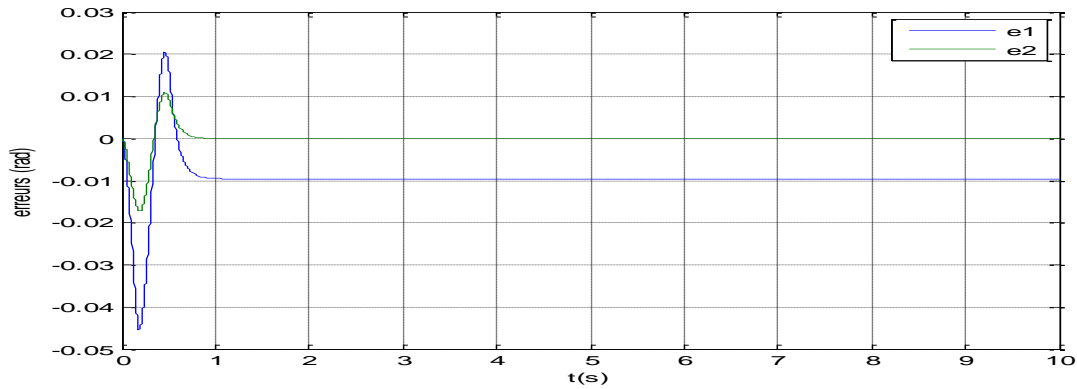


Figure [IV.4.2.3.e] : allures des erreurs de position 1 et 2 en mode poursuite de trajectoire avec la commande par mode flu glissant

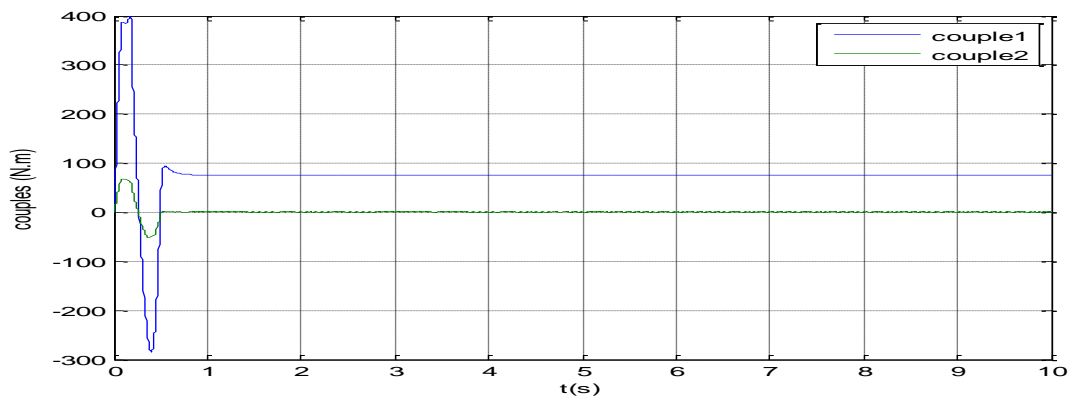


Figure [IV.4.2.3.f] : allures des couples de commande 1 et 2 en mode poursuite de trajectoire avec la commande par mode flu glissant

➤ Interprétation des résultats de simulation

Nous constatons, après implantation du système flu, que les deux articulations 1 et 2 des figures [IV.4.2.3.a], [IV.4.2.3.b] poursuivent les trajectoires désirées en position et les figures [IV.4.2.3.c],[IV.4.2.3.d] en vitesse angulaire

La figure [IV.4.2.3.e] montre que les erreurs de position des deux articulations, convergent vers zéro

La figure [IV.4.2.3.f] montre que le couple maximum qu'il faut appliquer à l'articulation 1 est de 400 N.m et de 80 N.m pour la 2^{ème} articulation.

IV.4.2.4 Test de régulation

Dans ce passage, on va introduire des perturbation (d) sur notre système à un instant donné.

On gardant les mêmes paramètres du système que précédemment. Les résultats de simulation sont représentés comme suit :

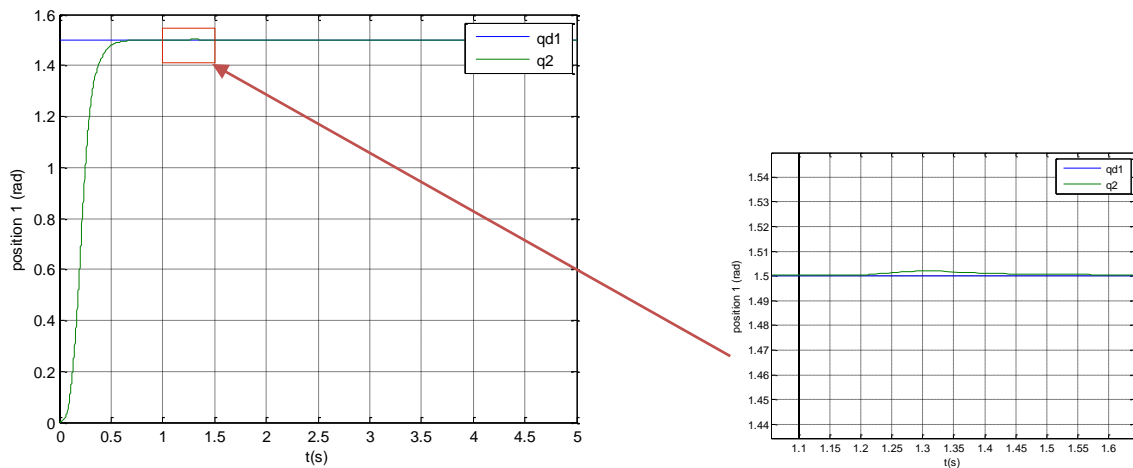


Figure [IV.4.2.4.a] : allures de la position 1 avec la commande par mode flou glissant + perturbation

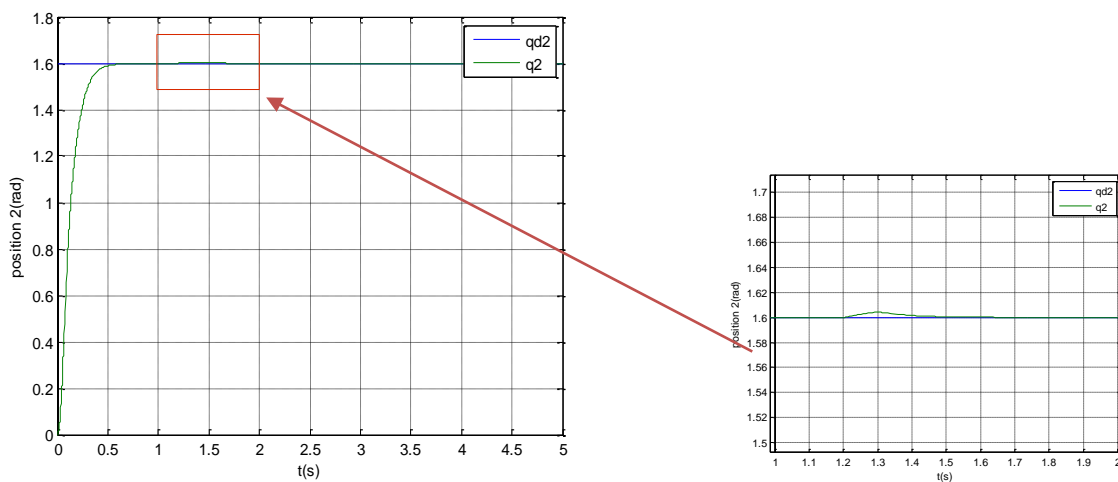


Figure [IV.4.2.4.b] : allures de la position 2 avec la commande par mode flou glissant + perturbation

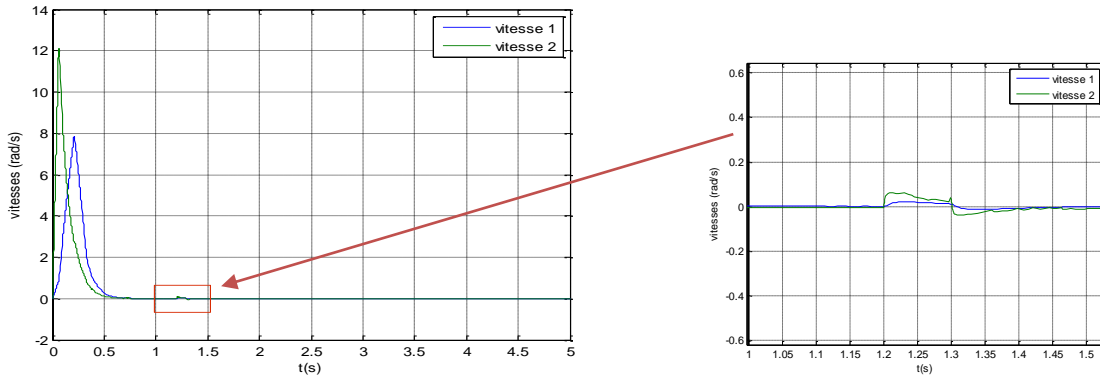


Figure [IV.4.2.4.c] : allures de la vitesse 1 et 2 avec la commande par mode flou glissant + perturbation

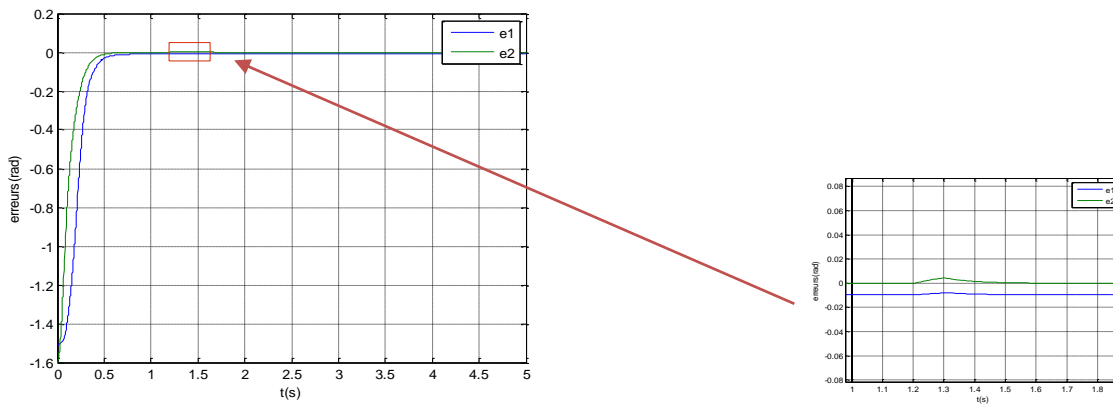


Figure [IV.4.2.4.d] : allures des erreurs 1 et 2 avec la commande par mode flou glissant + perturbation

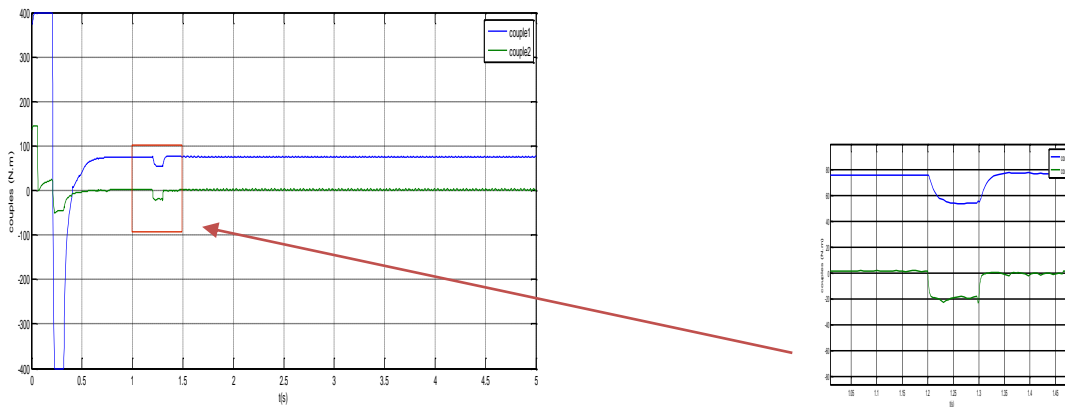


Figure [IV.4.2.4.e] : allures des couples 1et 2 avec la commande par mode flou glissant + perturbation

➤ **Interprétation des résultats de simulation**

D'après les figures précédentes, on constate que le système réagit ou perturbations, a un instant donné, mais il revient à la position désiré, le système a gardé sa robustesse même après avoir remplacé la commande équivalente par un contrôleur flou.

IV.4.2.5 tes de robustesse

Dans ce passage, nous allons introduire aux deux matrices d'inertie et de coriolis des incertitudes paramétriques sous forme de matrices $M0$ et $C0$. Le comportement des deux articulations est représenté par la figure suivante :

Avec :

$$M0 = \begin{bmatrix} 0.001 & 0.002 \\ 0.002 & 0.001 \end{bmatrix} \text{ et } C0 = \begin{bmatrix} 0.001 & 0.001 \\ 0.001 & 0.001 \end{bmatrix}$$

Telle que :

$$\begin{cases} M1 = M + M0 \\ C1 = C + C0 \end{cases}$$

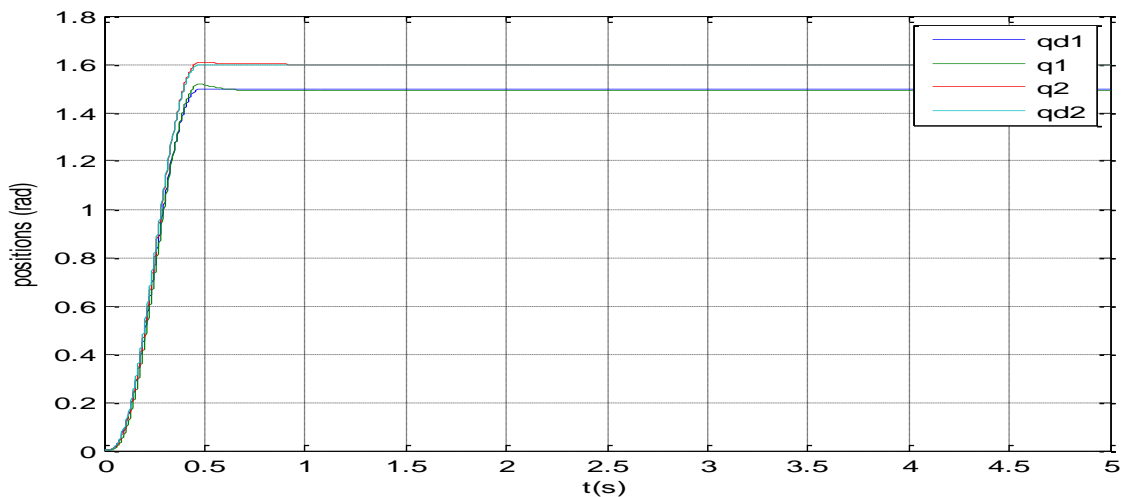


Figure [IV.4.2.5] : allures des positions 1et 2 avec la commande par mode flou glissant + incertitude

➤ **Interprétation des résultats**

D'après les figures [IV.4.2.5] nous constatons que le comportement du système est insensible aux incertitudes paramétriques pour les valeurs données.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé en premier lieu par l'application des lois de commande classique, après simulation de ces dernières on a pu constater des résultats obtenus, que ces lois sont insuffisantes car elles sont non robuste surtout lorsque les exigences sur la précision et autres caractéristiques dynamiques des systèmes sont strictes.

Pour remédier à ces inconvénients, nous avons appliqué la loi de commande par mode glissant, qu'est une commande robuste, non linéaire, simple à concevoir, réponse dynamique rapide et stable, mais nous avons constaté l'apparition du phénomène de broutement (chattering), pour l'éliminer nous avons remplacé la fonction signe de la commande discontinue qu'est le siège de ce phénomène par la fonction saturation.

En fin on a conçu un régulateur flou, que nous avons implanté dans la place de la commande équivalente du mode glissant et on a remplacé la fonction signe par la fonction saturation.

Les résultats de simulation s'avèrent très satisfaisants. Les améliorations apportées sont essentiellement l'amélioration du temps de réponse en mode régulation, ainsi la commande montre une bonne poursuite des trajectoires désirées et l'élimination du phénomène de broutement.

Conclusion générale et perspectives

❖ Conclusion générale

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

Le bras manipulateur à deux degrés de libertés reste toujours un benchmark, utilisé par les automaticiens vu sa dynamique hautement non linéaire et couplée.

Dans ce mémoire, nous avons donné des généralités sur les bras manipulateur, ou nous avons parlé un peu sur leur modèle géométrique et cinématique. Une importante partie du mémoire a été consacré à la dynamique de ces bras qui a été déduite par ce qu'on appelle le lagrangien.

L'objectif principal de notre travail était de concevoir une commande par modes glissants flous en vue de la commande en position et en vitesse d'un bras manipulateur à deux degrés de liberté.

Pour atteindre cet objectif, nous avons commencé par présenter l'ensemble des définitions et des outils nécessaires à la mise au point de la stratégie adoptée pour le développement des lois de commande garantissant les performances souhaitées. En effet après un rappel sur les lois de commande classique, que nous avons appliqué et simulé dans la dernière partie de notre travail, nous avons pu constater que ces lois de commande présentent des insuffisances comme le temps de réponse élevé et la délicatesse du choix des matrices des gains proportionnels et dérivés.

Pour améliorer la robustesse du système, nous avons présenté la commande par mode glissant, ainsi que ses avantages (simplicité de conception, robustesse vis-à-vis des perturbations externes) et également le principal inconvénient de ce type de commande à savoir, l'existence d'un phénomène important, le chattering. Pour atténuer ou éliminer celui-ci, des solutions ont été proposées en remplaçant le terme discontinu (fonction signe) par une fonction continue saturation, la solution de la couche limite, fuzzy sliding mode, mode glissant d'ordre supérieur,... Et c'est ce que nous avons pu constater, des résultats de simulation de la commande par mode glissant avec la fonction signe ensuite avec saturation.

Par la suite, nous avons étudié le principe de la logique floue, nous avons explicité les différentes étapes de la conception du contrôleur flou, à savoir ; la fuzzification, la base de connaissance, le moteur d'inférence et la défuzzification, ainsi que les deux types de régulateur flous type 1 et type 2.

Conclusion générale et perspectives

Un régulateur flou est par la suite conçu étape par étape pour remplacer la commande équivalente du mode glissant, et la fonction signe de la partie discontinue par la fonction saturation.

Les résultats de simulation sous plusieurs conditions ont été rapportés, nous remarquons que, non seulement le Chattering est éliminé mais aussi les performances du système sont nettement améliorées et nous avons aussi une bonne poursuite de trajectoire. Des tests de robustesse nous ont confirmé que le comportement du système est insensible aux perturbations et aux incertitudes paramétriques.

❖ Perspectives

*Remplacement de la commande discontinue du mode glissant par un système flou.

*Utilisation du mode glissant d'ordre supérieur

*Application d'un régulateur adaptatif flou par mode glissant.

*Utiliser les algorithmes génétiques pour calculer les facteurs d'échelle.

*Utilisation des observateurs plus évolués

*Utilisation de la commande H_∞ avec la logique floue

* ...

Bibliographie

- [1] Jean louis boimand ISTIA univ Angers
- [2] J.Yen and N.PFluger « a fuzzy logic based robot navigation system » PP971-978, 1992.
- [3] P-G.Zavlangas, S-G.Tzafestas and K Althoefter « fuzzy obstacle avoidance and navigation for omnidirectional mobile robot». ESIT 2000, Aachen Germany 2000.
- [4] E-dombre et W-Khalil « modélisation, identification et commande des robots » Hermès 2^{ème} édition 1999.
- [5] W-Khalil et E-dombre «bases de la modélisation et de la commande des robots manipulateur de type série ».
- [6] Bernard Baylie, université louis pasteur de Strasbourg, 2004/2005.
- [7] H.S.Shim, J.H.Kim, K.Koh « Variable structure control of nonholonomic mobile robot» .conf robot automat, May1995.
- [8] Filipov, « Differential equations with discontinuous right hand side », 1960.
- [9] P. Ruaux, G. Bourdon, S-Delaplace « Dynamic control of wheeled mobile robot using sliding mode». PP 205-112, 1996.
- [10] H.S.Shim, J.H.Kim « Sliding mode motion control of non holonomic mobile robot». PP 15-23, 1999.
- [11] M-Chakib, « Commande et observateur par mode glissant d'un système de pompage et d'un bras manipulateur», 2009.
- [12] R-Chellal, Y-Benbelkacem « Conception d'un contrôleur SMRFNNC en vue de piloter un robot manipulateur a 2ddl»,2009.
- [13] A-Hamzaoui, N-Essounbouli, J-Zaytoun « Commande par mode glissant flou d'un system non linéaire incertain »,2009.
- [14] Buhler « réglage par mode Glissant»,1991 .
- [15] J-P. Lasalle, « Some extension of Lyapunov's second méthode», CT-7(1960),520-527.
- [16] M-Mrabeti « Commande et observateur par mode glissant d'un système de pompage et d'un bras manipulateur», 2009.
- [17] Slotine. Li « Applied non linear control» 1991.
- [18] V.UTKIM, Hoonlee, « chattering problem in sliding mode control system», 2007.
- [19] F-Plestan, « Quelque contribution a la theorie de la commande par mode glissant».2010.
- [20] Slotine, J-J-E« Robot analysis and control», 1988.
- [21] A-Isidori, « non linear control system», 1995.

[22] N-N.karnik, J-M.Mendel « An introduction to type-2 Fuzzy logic systems». Univ Southern California, Rep, Oct 1998.

[23] J-M.Mendel, Bob John, R-I, «Type-2 fuzzy sets made simple», IEEE Trans, Fuzzy Syst, vol.10, no.2, pp.117-127, April 2002.

[24] Y-Oulmas «commande adaptative floue de la position et de l'orientation des robots manipulateurs» Ecole Nationale Polytechnique Laboratoire de la Commande des Processus, 2006.

[25] A-El Ougli «Intégration des techniques floues à la synthèse des contrôleurs adaptatif» Univ Sidi Mohamed Ben Abdallah Fès, 2009

[26] P-Ioannou, J-Sun «Robust Adaptive Control», Prentice-Hall, NJ, 1996

[27] Claude Théoret « élaboration d'un logiciel d'enseignement et d'application de la logique floue dans un contexte d'automate programmable »Montréal 2009

Résumé

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

Dans ce mémoire, nous avons donné des généralités sur les bras manipulateur, ou nous avons parlé un peu sur leur modèle géométrique et cinématique. Une importante partie du mémoire a été consacré à la dynamique de ces bras qui a été déduite par ce qu'on appelle le lagrangien.

L'objectif principal de notre travail était de concevoir une commande par modes glissants flous en vue de la commande en position et en vitesse d'un bras manipulateur à deux degrés de liberté.

Pour atteindre cet objectif, nous avons commencé par présenter l'ensemble des définitions et des outils nécessaires à la mise au point de la stratégie adoptée pour le développement des lois de commande garantissant les performances souhaitées. En effet après un rappel sur les lois de commande classique, que nous avons appliqué et simulé dans la dernière partie de notre travail, nous avons pu constater que ces lois de commande présentent des insuffisances comme le temps de réponse élevé et la délicatesse du choix des matrices des gains proportionnels et dérivées.

Pour améliorer la robustesse du système, nous avons présenté la commande par mode glissant, ainsi que ses avantages (simplicité de conception, robustesse vis-à-vis des perturbations externes) et également le principal inconvénient de ce type de commande à savoir, l'existence d'un phénomène important, le chattering. Pour atténuer ou éliminer celui-ci, des solutions ont été proposées en remplaçant le terme discontinu (fonction signe) par une fonction continue saturation, la solution de la couche limite, fuzzy sliding mode, mode glissant d'ordre supérieur,... Et c'est ce que nous avons pu constater, des résultats de simulation de la commande par mode glissant avec la fonction signe ensuite avec saturation.

Par la suite, nous avons étudié le principe de la logique floue, nous avons explicité les différentes étapes de la conception du contrôleur flou, à savoir ; la fuzzification, la base de connaissance, le moteur d'inférence et la défuzzification, ainsi que les deux types de régulateur flous type 1 et type 2.

Un régulateur flou est par la suite conçu étape par étape pour remplacer la commande équivalente du mode glissant, et la fonction signe de la partie discontinue par la fonction saturation.

Les résultats de simulation sous plusieurs conditions ont été rapportés, nous remarquons que, non seulement le Chattering est éliminé mais aussi les performances du système sont nettement améliorées.

Mot-clé

Bras manipulateurs, modélisation des bras manipulateurs, commande par mode glissant, lois de commande classique, logique floue, commande hybride, mode glissant flou, poursuite de trajectoire, simulation des lois de commande classique sous MATLAB, simulation du mode glissant flou sous MATLAB