République **A**lgérienne **D**émocratique et **P**opulaire
Ministère de L'**E**nseignement **S**upérieur et de la **R**echerche **S**cientifique

Université **M**ouloud **M**ammeri De **T**izi-**O**uzou

Faculté De **G**énie **E**lectrique Et D'informatique
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

Mémoire de Fin d'Etude de MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : **Commande des systèmes**

Présenté par

Djamel MEKKI
Redouane OUAREZKI

Mémoire dirigé par **M. SAIDI Khayreddine**

Thème

Commande par mode glissant flou d'un bras manipulateur

Mémoire soutenu publiquement le 21 septembre 2014 devant le jury composé de :

M Prénom NOM
Grade, Lieu d'exercice, Président

M Prénom NOM
Grade, Lieu d'exercice, Rapporteur

M Prénom NOM
Grade, Lieu d'exercice, Examinateur

M Prénom NOM
Grade, Lieu d'exercice, Examinateur

Promotion 2014

Remerciements

Avant tout, nous remercions DIEU le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience durant toutes ces années d'étude.

Nous adressons, particulièrement, nos vifs remerciements à nos parents pour leurs conseils, leurs soutiens et la bonne éducation qu'ils nous ont donnée depuis la naissance.

A l'issue de ce travail, nous tenons à exprimer nos remerciements à notre promoteur M .Kh. SAIDI pour son aide, sa disponibilité et son orientation judicieuse.

Nous adressons également nos remerciements aux membres du jury qui feront l'honneur d'évaluer notre travail ainsi qu'à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation depuis la première année primaire.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents.

Mes frères et sœurs.

Toute ma famille.

Mes amis.

Mon binôme ainsi qu'à toute sa famille.

R. OUAREZKI

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mon très cher père ; symbole de sacrifices, ma très chère maman ;

Symbole de tendresse et d'amour

A mon très cher frère Mohamed

A mes très chères sœurs

A tous mes amis en particulier : Sabrina ; Belka ; Redouane……..etc

DJAMEL

Chapitre IV Application des commandes et résultats de simulation

Introduction générale

Généralement les connaissances de l'univers humain sont imparfaites dans la mesure où elles peuvent souffrir d'incertitudes et/ou d'imprécisions. L'homme intègre naturellement ces imperfections dans la vie de tous les jours, en particulier au niveau du raisonnement et de la décision, L'utilisation des outils mathématiques de modélisation est appropriée et justifiée pour les systèmes bien définis. Mais, quand la complexité augmente, ces outils deviennent moins efficaces. Le traitement des systèmes complexes nécessite souvent la manipulation d'informations incertaines. De façon naturelle, l'être humain est capable de manipuler de tels systèmes. Il décrit son comportement par des méthodes approximatives au lieu de raisonner en termes mathématiques. Un robot doit posséder des capacités de perception et de mouvement nécessaires pour qu'il puisse exécuter ses tâches **[7].**

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 (CSV). 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 modes glissants a été longtemps limitée dans ses applications à cause du caractère discontinu de sa commande qui engendre des oscillations autour de la surface de commutation : c'est le phénomène de réticence (Chattering en anglais). Les chercheurs ont introduit plusieurs solutions pour remédier à cet inconvénient, pour résoudre ce problème nous avons proposé de remplacer la commande discontinue des modes glissants, qui est le siège de ce phénomène, par un contrôleur flou.

La logique floue diffère de la logique classique parce qu'elle permet des définitions partielles ou "floues" de règles de contrôle. La puissance de la logique floue vient de sa capacité à décrire un phénomène ou processus particulier de façon linguistique, puis de représenter ce phénomène par un faible nombre de règles. Les connaissances dans un système flou sont contenues dans les règles et dans les ensembles flous qui contiennent des descriptions générales des propriétés du phénomène en question.

L'intérêt de l'utilisation de la commande par mode glissant flou réside dans: la grande précision, la réponse dynamique rapide, la stabilité, la simplicité de la conception et de l'implantation et la robustesse vis-à-vis de la variation des paramètres internes et externes.

Notre mémoire est organisé de la manière suivante :

- Le premier chapitre présente la définition des robots, ainsi que les différents Types de modélisations des bras manipulateurs.
- Le deuxième chapitre sera dédié à la présentation de la théorie de commande par modes glissants.
- Le troisième chapitre sera consacré à la logique floue.
- Le quatrième chapitre a pour but la présentation des résultats de simulations des commandes classiques et développés.

I.1 introduction

Pour commander ou simuler le comportement d'un système mécanique articulé (robot), on doit disposer d'un modèle. Plusieurs niveaux de modélisation sont possibles selon les objectifs, les contraintes de la tâche et les performances recherchées.

Les modèles mathématiques nécessaires sont :

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

I.2 Définition d'un robot

D'après l'Association Française de Normalisation (AFNOR), un robot est un « manipulateur commandé en position, reprogrammable, polyvalent, à plusieurs degrés de liberté, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outilles et des dispositifs spécialisés, au cours de mouvement variable et programmés pour l'exécution d'une variété de taches. Il a souvent l'apparence d'un ou plusieurs bras se terminant par un poignet. Son unité de commande utilise, notamment, un dispositif de mémoire et éventuellement de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances. Ces machines polyvalentes sont généralement étudiées pour effectuer la même fonction de façon cyclique et peuvent être adaptées à d'autres fonctions sans modification permanente du matériel **[2].**

I.3 Constituants mécaniques d'un robot

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

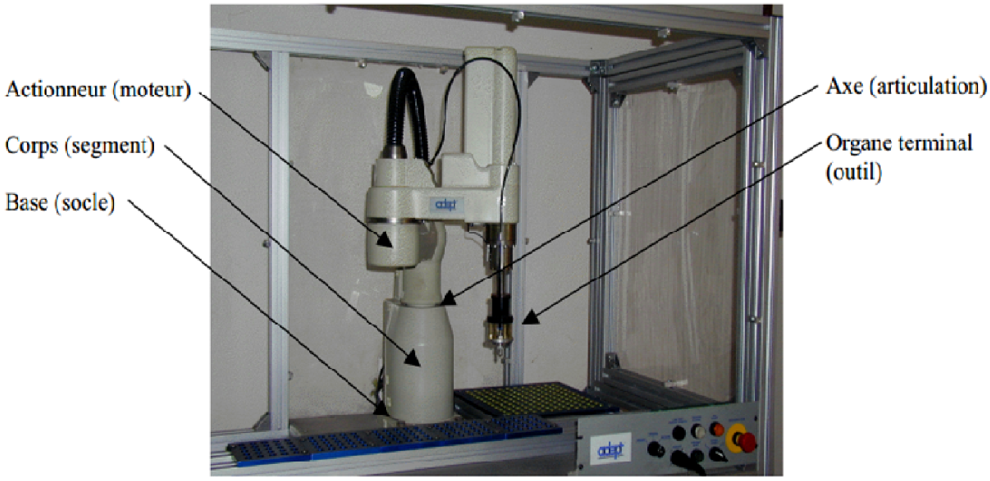


Figure [I.1] Un robot manipulateur du type SCARA

I.3.1 Organe terminal

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

I.3.2 Système mécanique articulé

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

- **Articulations**

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

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

- **Articulation rotoïde**

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

- **Articulation prismatique**

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

On peut constituer des liaisons de mobilité supérieure à 1, en combinant des articulations simples. Une rotule par exemple est obtenue avec trois articulations rotoïde dont les axes sont concourants **[12].**

I 3.3 Actionneurs

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

a. Actionneurs électriques

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

b. Actionneurs pneumatiques et hydrauliques :

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

I.3.4 Capteurs

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

- capteurs internes ou proprioceptifs.
- capteurs externes ou extéroceptifs.

I.3.5 Système de commande et de traitement de l'information (cerveau)

Elle assure la gestion et la distribution aux divers actionneurs (génération des signaux de commande). Le chois du système de commande est guidé par :

- Complexité de la mécanique.
- L'ampleur des tâches à réaliser.
- Performances souhaitées.

I.4 Degré de liberté d'un robot

On appelle degrés de liberté dans une liaison, les mouvements relatifs indépendants d'un solide par rapport à l'autre autorisés par cette liaison

I.5 Coordonnées homogènes

I.5.1 Représentation d'un point

Soit M un point de l'espace.

Il existe un unique triplet (x, y, z) de nombres réels tel que :

$$\overrightarrow{OM} = \overrightarrow{xi} + \overrightarrow{yj} + \overrightarrow{zk}$$

x est l'abscisse**,** *y* est l'ordonnée**,** *z* est la cote du point M dans le repère $(\overrightarrow{O}, \overrightarrow{i}, \overrightarrow{j}, \overrightarrow{k})$

$$p = \begin{bmatrix} Px \\ Py \\ Pz \\ 1 \end{bmatrix}$$

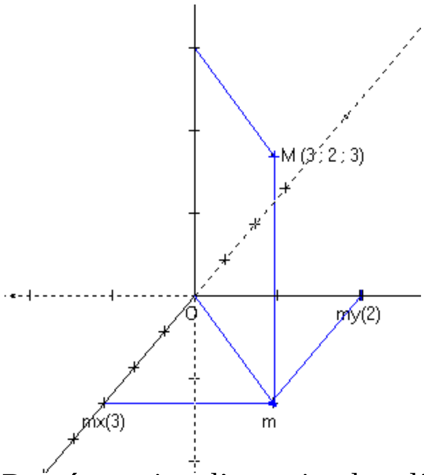


Figure [I.2] Représentation d'un point dans l'espace.

I.5.2 Représentation d'une direction

La représentation d'une direction (vecteur libre) se fait aussi par quatre composantes, mais le quatrième est nul, indiquant un point à l'infini. Si l'on note Ux, Uy, Uz les coordonnées cartésiennes d'un vecteur unitaire u, en coordonnées homogènes on écrit **[7]** :

$$U = \begin{bmatrix} Ux \\ Uy \\ Uz \\ 0 \end{bmatrix}$$

I.5.3 Représentation d'un plan

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

$$Q = [\alpha \quad \beta \quad \gamma \quad \delta]$$

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

$$Q\,p = [\alpha \quad \beta \quad \gamma \quad \delta]$$

I.6 Transformation homogène

I.6.1 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:

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

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 **[3].**

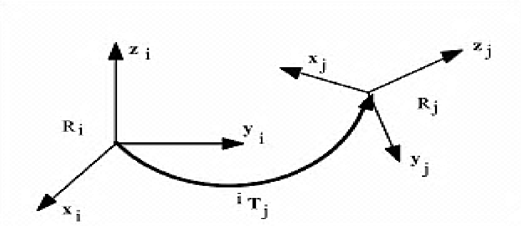


Figure [I.3] Transformation des repères.

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

$$ {}^{i}T_j = \begin{bmatrix} & {}^{i}A_j & & {}^{i}P_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{i}s_j & {}^{i}n_j & {}^{i}a_j & {}^{i}P_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

Avec :

- ${}^{i}A_j$ est la matrice de rotation.

- ${}^{i}P_j$ est le vecteur de translation.

I.6.2 Matrice de rotation

Les trois matrices de rotation sont définies comme suit :

Matrice de rotation par rapport à l’axe x

$$ ROT(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

Matrice de rotation par rapport à l’axe y

$$\mathrm{ROT}(y,\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matrice de rotation par rapport à l'axe z

$$\mathrm{ROT}(z,\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

I.7 Modélisation des bras manipulateurs

I.7.1 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 :

1. Modèle géométrique direct.
2. Model géométrique inverse.

Pour analyser le comportement mécanique de la structure mécanique d'un robot ou d'un bras manipulateur, il est nécessaire de lier un repère orthonormé à chacun de ses corps et un référentiel attaché à la base du robot ou du bras manipulateur. L'étude des mouvements des corps revient alors à l'étude des mouvements des repères.

I.7.1.1 Modèle géométrique direct

Dans le modèle géométrique direct, la position et l'orientation de l'organe terminal est donnée en fonction des variables articulaires, nous l'exprimons par la fonction suivante :

$$x_i = F(q_1, q_2, \dots\dots..q_n) \qquad \text{(I.1)}$$

$i = 1,2 \dots\dots\dots.p.$

Avec

p : C'est le nombre de variables géométriques.

n : C'est le nombre de degré de liberté du robot

I.7.1.2 Convention de Denavit –Hartenberg modifié

Méthodologie à suivre pour décrire les robots à structure ouverte simples.
Une structure ouverte simple est composée de n+1 corps notés C_0........ 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 Cj au corps Cj_{-1} (fig.I.4)

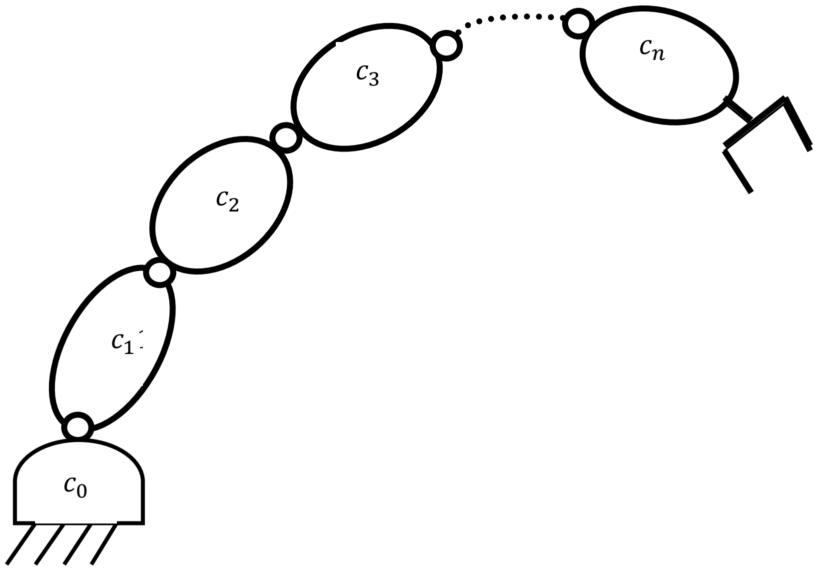


Figure [I.4] Robot à structure ouverte simple

La méthode de description est basée sur le principe suivant :

- **Principe**
  - Fixer des repères à chaque corps du robot.
  - Calculer les matrices homogènes entre chaque corps.
  - Calculer la matrice homogène entre base et l'organe terminal
- **Hypothèses :**

On suppose que le robot est constitué d'un chaînage de $n+1$ corps liés entre eux par n articulations rotoïdes ou prismatiques. A chaque corps, on associe un repère Ri. Les repères sont numérotés de 0 à n. La i ème articulation, dont la position est notée q_i est le point qui relie les corps c_{j-1} et c_j.

Le repère R_j fixé au corps c_j est défini de sorte que :

- L'axe z_j est porté par l'axe de l'articulation j.

- L'axe x_j est porté par la perpendiculaire commune aux axes z_j et z_{j-1}. Si les axes z_j et z_{j-1} sont parallèles ou colinéaire, le choix de x_j n'est pas unique.

- **Les paramètres de Denavit modifier**

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

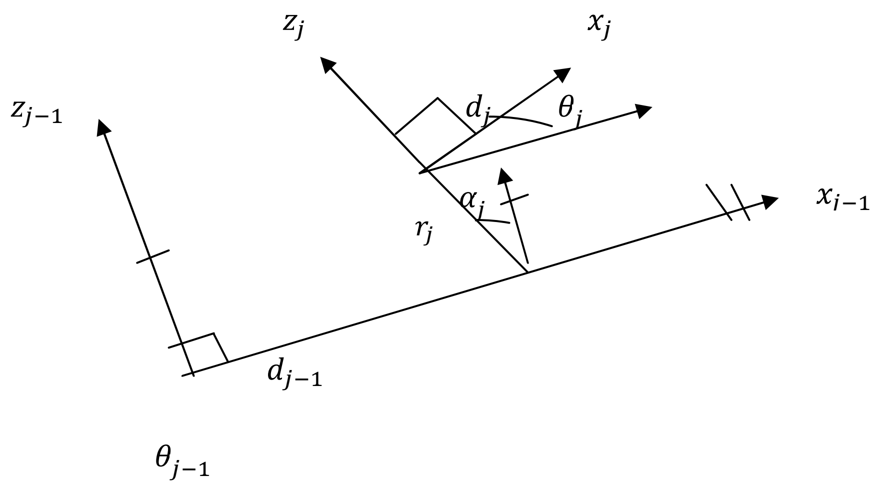


Figure [I.5] : paramétres geométriques dans le cas d'une structure ouverte simple

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

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

$$ {}^{j-1}\boldsymbol{T_j} = \boldsymbol{Rot}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\alpha_j})\boldsymbol{Trans}(\boldsymbol{x},)\boldsymbol{Rot}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{\theta_j})\boldsymbol{Trans}(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{r_j}) \quad \text{(I.2)} $$

$$
{}^{j-1}\boldsymbol{T}_j = \begin{bmatrix} \cos(\boldsymbol{\theta}_j) & -\sin(\boldsymbol{\theta}_j) & 0 & \boldsymbol{d}_j \\ \cos(\boldsymbol{\alpha}_j)\,\boldsymbol{sin}(\boldsymbol{\theta}_j) & \cos(\boldsymbol{\alpha}_j)\cos(\boldsymbol{\theta}_j) & -\sin(\boldsymbol{\alpha}_j) & -\boldsymbol{r}_j\sin(\boldsymbol{\alpha}_j) \\ \sin(\boldsymbol{\alpha}_j)\boldsymbol{sin}(\boldsymbol{\theta}_j) & \sin(\boldsymbol{\alpha}_j)\cos(\boldsymbol{\theta}_j) & \cos(\boldsymbol{\alpha}_j) & \boldsymbol{r}_j\cos(\boldsymbol{\alpha}_j) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
$$

I.7.1.3 Modèle géométrique inverse

Le modèle géométrique inverse nous permet le calcul des variables articulaires en fonction des variables géométrique. Il est constitué par la fonction inverse ou réciproque de F

$$q = F^{-1}(X) \tag{I.3}$$

Avec

$q = (q_1, q_2, \ldots\ldots q_n)^T$

$X = (x_1, x_2, \ldots\ldots x_p)^T$

I.7.2 Modélisation cinématique

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

I.7.2.1 Modèle cinématique direct

On dérive les équations du modèle géométrique direct par rapport au temps, on obtient le modèle cinématique direct suivant :

$$\frac{\mathbf{dX}}{\mathbf{dt}} = \frac{\boldsymbol{\partial}\mathbf{F}}{\boldsymbol{\partial}\mathbf{q}}\frac{\mathbf{dq}}{\mathbf{dt}} \tag{I.4}$$

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

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

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

I.7.2.2 Modèle cinématique inverse

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

$$\dot{q} = J^{-1}(q)\dot{X} \tag{I.5}$$

I.7.3 Modélisation dynamique :

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

- ✓ Dans la modélisation dynamique on constate deux modèles :

I.7.3.1 Le modèle dynamique inverse

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

$$\boldsymbol{\tau = G(q, \dot{q}, \ddot{q}, fest)} \tag{I.6}$$

I.7.3.2 Le modèle dynamique direct

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

$$\boldsymbol{q = G(q, \ddot{q}, \tau, fext)} \tag{I.7}$$

La méthode la plus utilisée est constituée par les **équations de Lagrange-Euler.**

I.7.3.2.1 Formalisme de Lagrange-Euler

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

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{q}_i} = \boldsymbol{\tau}_\mathbf{i} \qquad \text{(I.8)}$$

Avec E_D est l'énergie de dissipation en cas de présence de frottement visqueux, T_i est la force où le couple généralisé à la $i^{ème}$ articulation, n est le nombre de degré de liberté, q_i est la coordonnée généralisée de l'articulation i, $\dot{q}_1$ est la dérivée de la coordonnée généralisée et L est le Lagrangien exprimé par l'équation suivante :

$$\mathbf{L} = \mathbf{E_c} - \mathbf{E_P}$$

Avec :

E_c : l'énergie cinétique.

$E_{p.}$: L'énergie potentielle.

I.7.4 Modélisation dynamique d'un bras manipulateur à 2d.d.l

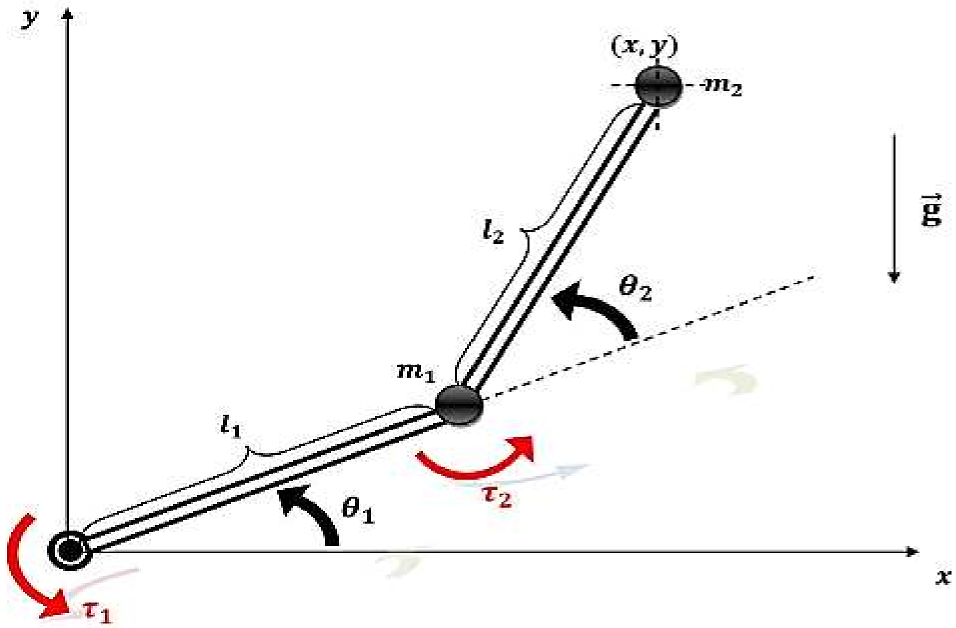


Figure [I.6]: Robot manipulateur à 2 d.d.l.

- θ_i L'angle adjoint à chaque bras avec l'axe des abscisses.
- m_i La masse située au centre de gravité de chaque bras.
- l_i Langueur du bras.
- 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 l'étude dynamique.

Les cordonnées cartésiennes sont :

1ere extrémité : $\begin{cases} x_1 = l_1 \cos\theta_1 \\ y_1 = I_1 \sin\theta_1 \end{cases}$ 2ème extrémité : $\begin{cases} x_2 = x_1 + l_2 \cos\ (\theta_1 + \theta_2) \\ y_2 = y_1 + l_2 \sin\ (\theta_1 + \theta_2) \end{cases}$

Le modèle dynamique est donné comme suit **[2]** :

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \tag{I.9}$$

Avec :

$M(q)$: Matrice d'inertie **.**elle est symétrique et définie positive.

$C\,(q,\dot{q})$: Matrice des forces centrifuges et de Coriolis

$G(q)$: Vecteur de gravité

- **Equation du mouvement Lagrange**

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \tag{I.10}$$

q_i : $i^{ème}$ coordonnée généralisée

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

Le Lagrangien L du système étant la différence entre l'énergie cinétique et potentielle **[1]**.

$L = Ec - Ep$

- **Energie cinétique**

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

$$Ec = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)l_1^2\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}m_2 l_2^2(\dot{\theta_1} + \dot{\theta_2})^2 + m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1\left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2\right)\cos\theta_2 \tag{I.11}$$

- **Energie potentielle**

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

$$Ep = (m_1 + m_2)g\,l_1 \sin\theta_1 + m_2 g l_2 \sin(\,\theta_1 + \theta_2)) \tag{I.12}$$

- **Lagrangien du système**

$$L = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)l_1^2\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}m_2l_2^2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2l_1l_2\dot{\theta}_1(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\cos\theta_2$$
$$- [(m_1 + m_2)g\, l_1 \sin\theta_1 + m_2gl_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] \qquad (I.13)$$

Dans notre cas (I.10) s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1}\right] - \frac{\partial L}{\partial q_1} = \tau_1 \\ \frac{d}{dt}\left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2}\right] - \frac{\partial L}{\partial q_2} = \tau_2 \end{cases} \qquad (I.14)$$

La dynamique du robot manipulateur est donnée sous forme d'équations différentielles non linéaires suivantes :

- $\tau_1 = [(m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2\cos\theta_2]\ddot{\theta}_1 + [m_2l_2^2 + m_2l_1l_2\cos\theta_2]\ddot{\theta}_2 - m_2l_1l_2\dot{\theta}_2(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\sin\theta_2 + (m_1 + m_2)gl_1\cos\theta_1 + m_2gl_2\cos(\theta_1 + \theta_2)\ ]$ (I.15)

- $\tau_2 = [m_2l_2^2 + m_2l_1l_2\cos\theta_2]\ddot{\theta}_1 + [m_2l_2^2]\ddot{\theta}_2 + m_2l_1l_2\dot{\theta}_1^2\sin\theta_2 + m_2gl_2\cos(\theta_1 + \theta_2)$ (I.16)

Nous réécrivons les équations du système sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2\cos\theta_2 & m_2l_2^2 + m_2l_1l_2\cos\theta_2 \\ m_2l_2^2 + m_2l_1l_2\cos\theta_2 & m_2l_2^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2\end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} - m_2l_1l_2\dot{\theta}_2(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\sin\theta_2 \\ m_2l_1l_2\dot{\theta}_1^2\sin\theta_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}(m_1 + m_2)gl_1\cos\theta_1 + m_2gl_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \\ m_2gl_2\cos(\theta_1 + \theta_2)\end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix}\tau_1 \\ \tau_2\end{bmatrix} \qquad (I.17)$$

Nous identifions les différents termes :

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2\cos\theta_2 & m_2l_2^2 + m_2l_1l_2\cos\theta_2 \\ m_2l_2^2 + m_2l_1l_2\cos\theta_2 & m_2l_2^2 \end{bmatrix}$$

$$C(\theta,\dot{\theta}) = \begin{bmatrix} -2\, m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \sin\theta_2 & -\dot{m}_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_2 \sin\theta_2 \\ m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 \sin\theta_2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G(\theta) = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2) g l_1 \cos\theta_1 + m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}$$

Remarque :

Si on prend en considération dans la modélisation l'effet des perturbations le modèle dynamique de ce robot est donné par l'équation matricielle suivante :

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) + T_d = \tau \qquad \text{(I.18)}$$

T_d ; Perturbations

I.8 Quelques lois de commande classique des robots manipulateurs

I.8.1 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'autre lois de commande, et ceci par la compensation de l'effet du vecteur de gravité.

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

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) \qquad \text{(I.19)}$$

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 :

$$\tau = G(q) - k_p \tilde{q} - k_v \dot{q} \qquad \text{(I.20)}$$

Où k_p et k_v sont respectivement les matrices des gains proportionnels et dérivés de dimension (n×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 qd la position désirée. $\dot{\tilde{q}} = \dot{q} - \dot{q}_d = \dot{q}$ est l'écart en vitesse.

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

$$\ddot{\tilde{q}} = -M(q)\left[(C(q,\dot{q}) + k_v)\,\dot{\tilde{q}} + k_p\tilde{q}\right] \quad \text{(I.21)}$$

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

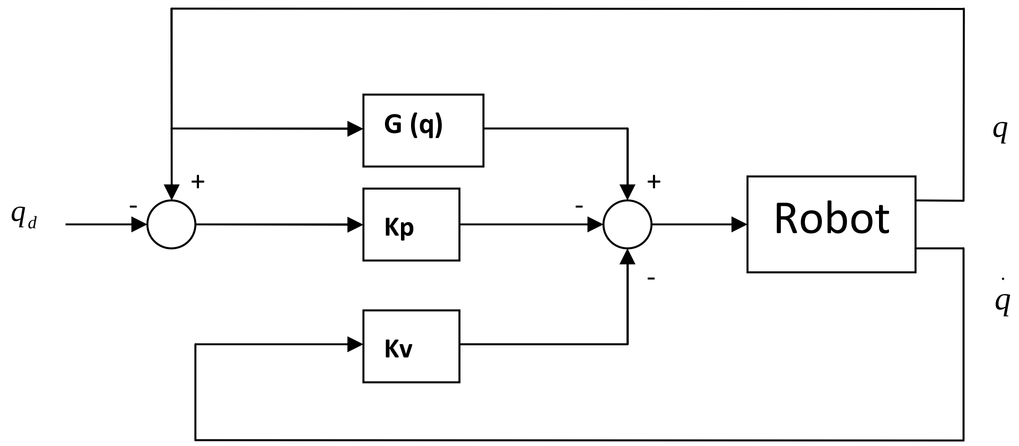


Figure [I.7] : Schéma bloc d'une commande point à point

I.8.2 Commande en poursuite de trajectoire

I.8.2.1. 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:

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

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

$$q_d(t) = q^i + r(t)D \tag{I.22}$$

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.8.2.1.1 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 :

$$q_d(t) = q^i + r(t)D \qquad \text{Avec } r(t) = \frac{t}{t_f} \tag{I.23}$$

Ainsi $$\dot{q}_d(t) = \dot{r}(t)D \qquad \text{avec } \dot{r}(t) = \frac{1}{t_f} \tag{I.24}$$

Et $$\ddot{q}_d(t) = \ddot{r}(t)D \qquad \text{avec } \ddot{r}(t) = 0 \tag{I.25}$$

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.

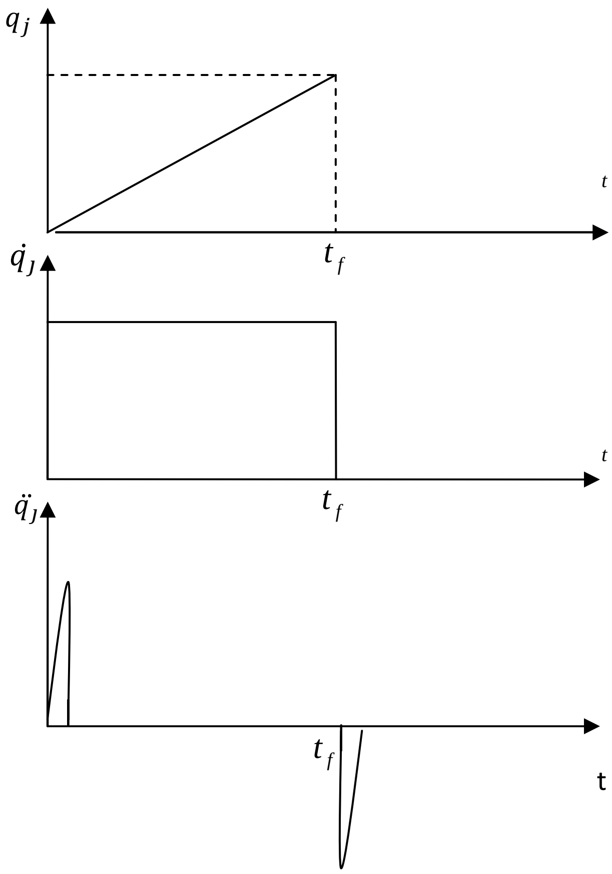


Figure [I.8]: Polynôme d'interpolation linéaire.

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:

$$q_d(t) = q^i + [3(\frac{t}{t_f})^2 - 2(\frac{t}{t_f})^3]D \tag{I.26}$$

Ainsi $$\dot{q}_d(t) = [6(\frac{t}{t_f^2}) - 6(\frac{t^2}{t_f^3})]D \qquad \text{(I.27)}$$

et

$$\ddot{q}_d(t) = [(\frac{6}{t_f^2}) - 12(\frac{t}{t_f^3})]D \qquad \text{(I.28)}$$

La figure I.9 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.

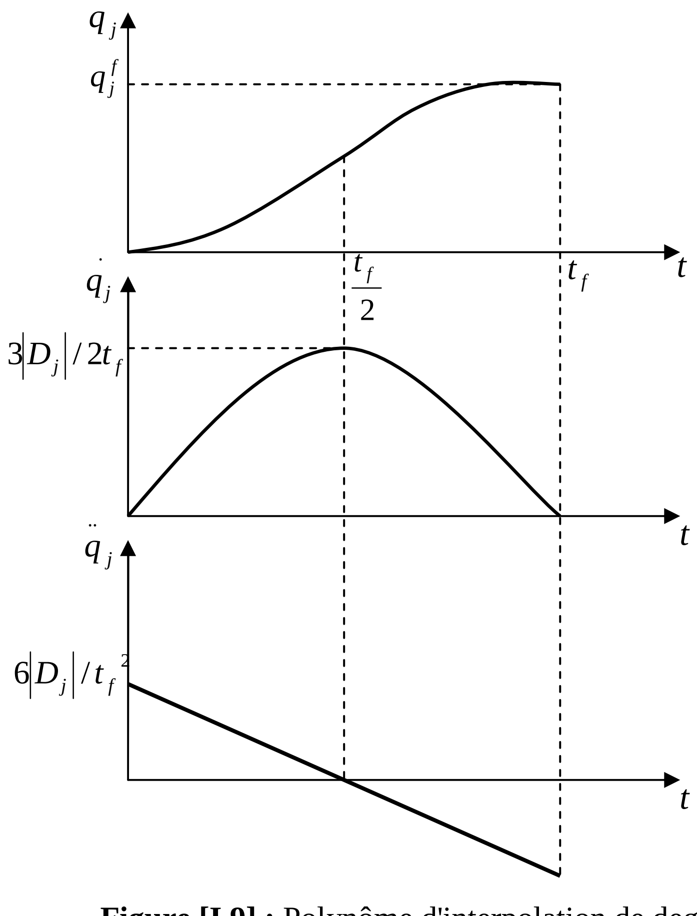


Figure [I.9] : Polynôme d'interpolation de degré 3**.**

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

$$\left|\dot{q}_{f\max}\right| = \frac{3|D_j|}{2t_f} \qquad \text{Avec } |D_j| = |q_j^f - q_j^i| \qquad \text{(I.29)}$$

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

$$\left| \ddot{q}_{f\,\max} \right| = \frac{6\left|D_j\right|}{t_f^2} \qquad \text{(I.30)}$$

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 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 :

$$r(t) = 10\left(\frac{t}{t_f}\right)^3 - 15\left(\frac{t}{t_f}\right)^4 + 6\left(\frac{t}{t_f}\right)^5 \qquad \text{(I.31)}$$

Les trajectoires des positions, vitesses et accélérations pour l'articulation j sont présentées à la figure I.10. Les vitesses et accélérations maximales ont pour expressions :

$$\left| \dot{q}_{f\,\max} \right| = \frac{15\left|D_j\right|}{8t_f} \qquad \text{(I.32)}$$

$$\left| \ddot{q}_{f\,\max} \right| = \frac{10\left|D_j\right|}{\sqrt{3}t_f^2} \qquad \text{(I.33)}$$

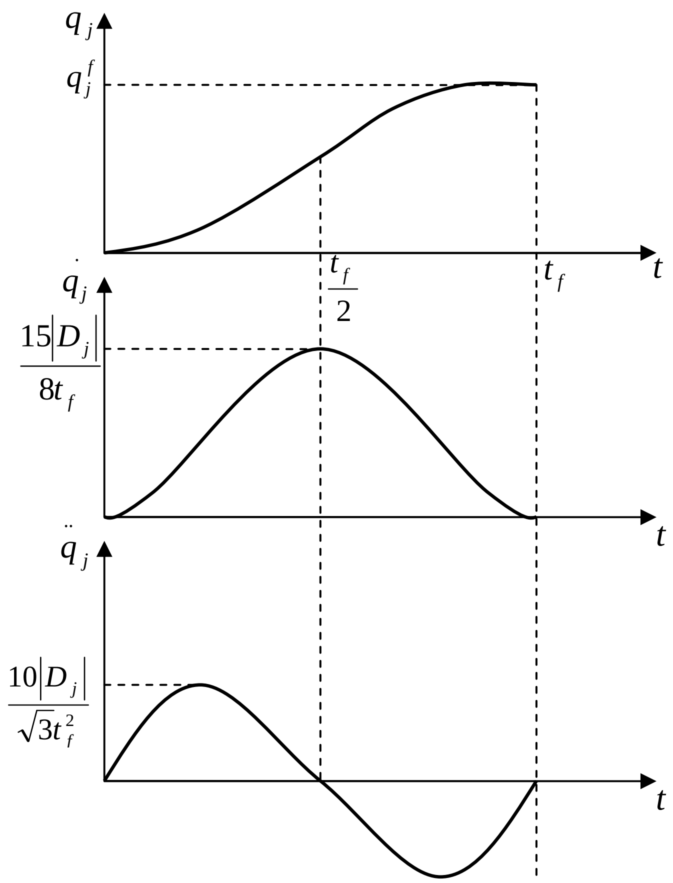
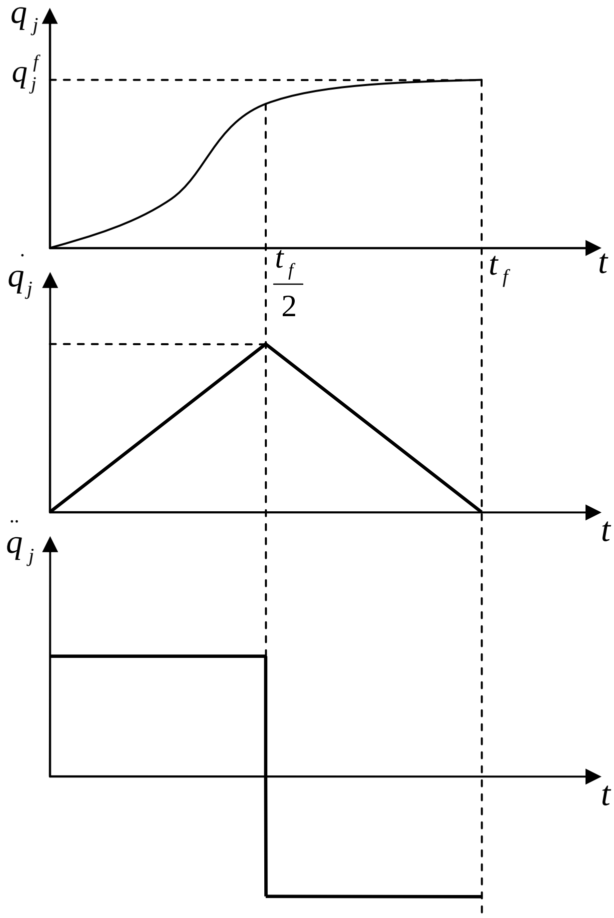


Figure [I.10] : Polynôme d'interpolation de degré 5.

I.8.2.1.2. 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

$$\begin{cases} q_d(t) = q^i + 2(\frac{t}{t_f})^2 D & 0 \le t \le t_f/2 \\ q_d(t) = q^i + [-1 + 4(\frac{t}{t_f}) - 2(\frac{t}{t_f})^2] D & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (I.34)$$



La figure [I.11] montre l'allure des positions, vitesses et accélérations.

I.8.3 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 condition 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:

$$\tau = M(q)[\ddot{q}_d + k_p \tilde{q} + k_v \dot{\tilde{q}}] + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) \qquad \text{(I.35)}$$

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 :

$$\ddot{q}_d + k_p \tilde{q} + k_v \dot{\tilde{q}} = 0 \qquad \text{(I.36)}$$

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.12

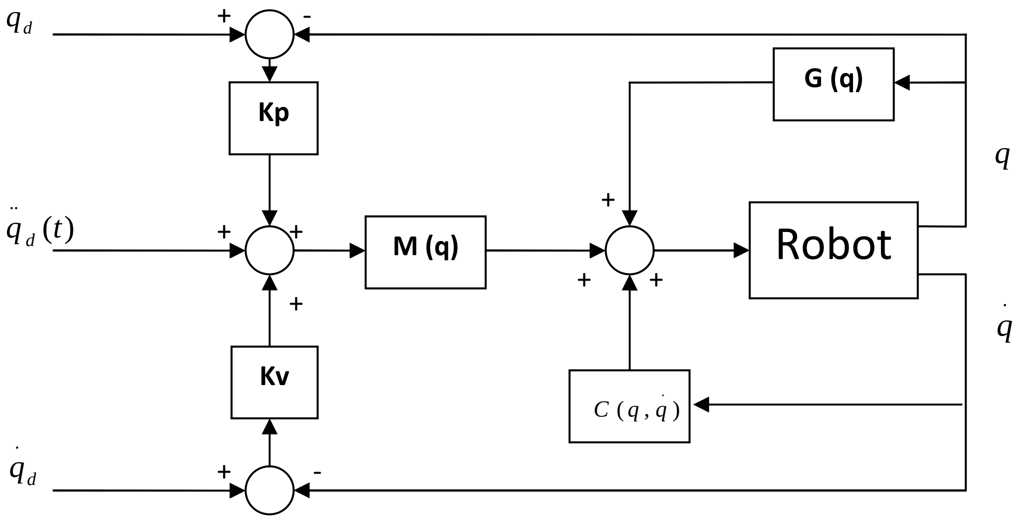


Figure [I-12] : Schéma bloc de la commande du couple calculé.

I.9 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre une description générale des robots manipulateurs, où nous avons présenté les outils mathématiques utilisés dans la robotique. Nous avons terminé par décrire les trois méthodes de modélisation : la modélisation géométrique, cinématique et dynamique. Nous nous sommes focalisés particulièrement sur la modélisation dynamique d'un bras manipulateur à deux degré de liberté (2ddl) pour une utilisation ultérieure. Enfin nous avons présenté quelques lois de commande classique.

II.1 Introduction :

Un modèle mathématique constitue souvent une description approchée de la réalité physique, et la loi de commande ne pourrait être construite que sur ce dernier. Ainsi la commande choisie devra être robuste dans le sens où elle devra garantir une faible sensibilité aux erreurs et aux incertitudes sur les paramètres, à leurs variations et aux perturbations. Notre choix s'est porté sur la commande par modes de glissement qui n'est autre qu'un cas particulier de la théorie des systèmes à structure variable et multifonctions. Basée essentiellement sur la résolution des équations différentielles à second membre discontinu, initiée par Filippov en 1960 **[5]**, sera utilisée dès la parution des livres d'Emelyanov **[3]** et d'Utkin **[11].** La communauté automaticienne s'est rapidement rendu compte de l'intérêt de cette technique qui allie simplicité de synthèse et robustesse.

II.2.Structures de base

Dans la commande des systèmes à structure variable par mode de glissement, on distingue trois structures de base différentes :

II.2.1 Structure par commutation d'une contre réaction d'état

Selon la position du commutateur, le vecteur d'état x est mis en contre réaction d'état soit par –k1 soit par –k2 .ceci se fait à l'aide de loi de commutation s(x).

$$u = \begin{cases} -k_1^T(x) \;\; si \;\; s(x) > 0 \\ -k_2^T\;(x) \; si \;\; s(x) < 0 \end{cases} \tag{II.1}$$

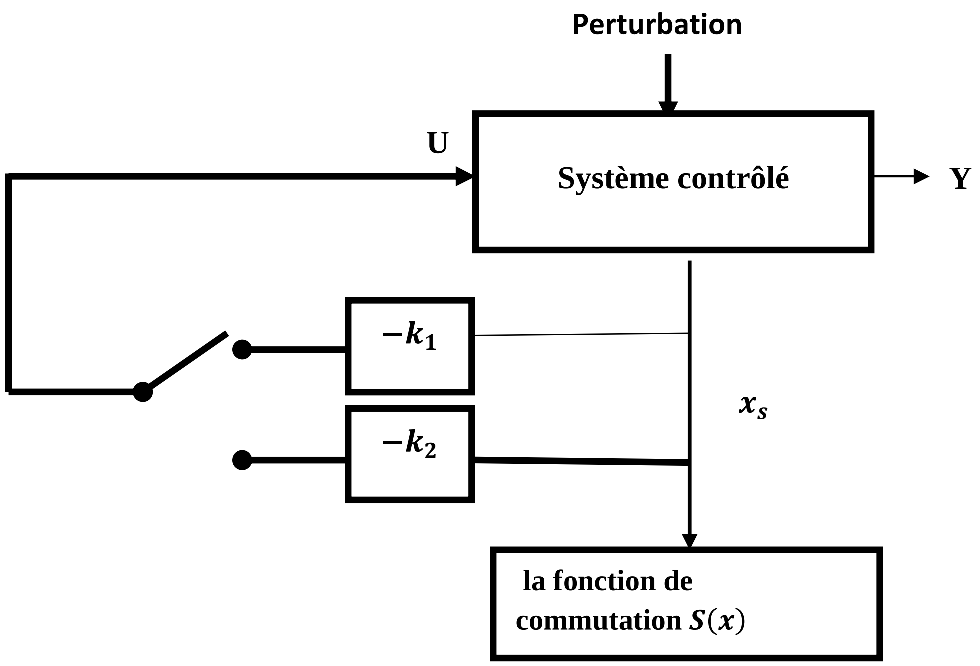


Figure [II.1] Structure par commutation d'une contre réaction d'état

U : Grandeur de commande

x_s : Vecteur d'état

Y : sortie du système

$-k_1$,$-k_2$: Vecteurs lignes du retour d'état

$\boldsymbol{S(x)}$ **:**loi de commutation

Avec une loi de commutation adéquate, 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 condition la commutation se fait à une fréquence très élevée (théoriquement infinie).le système travail alors en mode de glissement .le comportement du système est alors déterminé par la condition suivante :

$$S(x)=0 \qquad \text{(II.2)}$$

II.2.2 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande

Une autre configuration, ou le changement de la structure se fait par commutation au niveau de l'organe de commande, est représentée à la figure suivante :

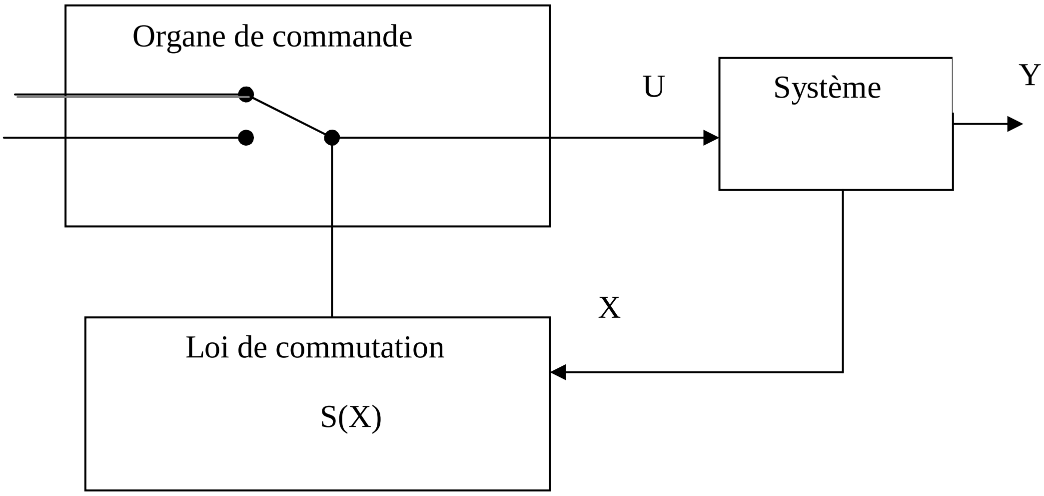


Figure [II.2] : structure par commutation au niveau de l'organe de commande

Dans ce cas, l'organe de commande doit être conçu de sortie que la commutation ne prenne que deux valeurs constantes u_{max} ou u_{min}.la commutation entre ces deux valeurs est impose par la loi de commutation selon :

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

En mode de glissement, la dynamique du système est donnée par :

$$S(x) = 0$$

II.2.3 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande équivalente.

L'ajout de la commande équivalente permet de pré-positionner le système dans un état désiré stable et de réduire le phénomène de réticence.

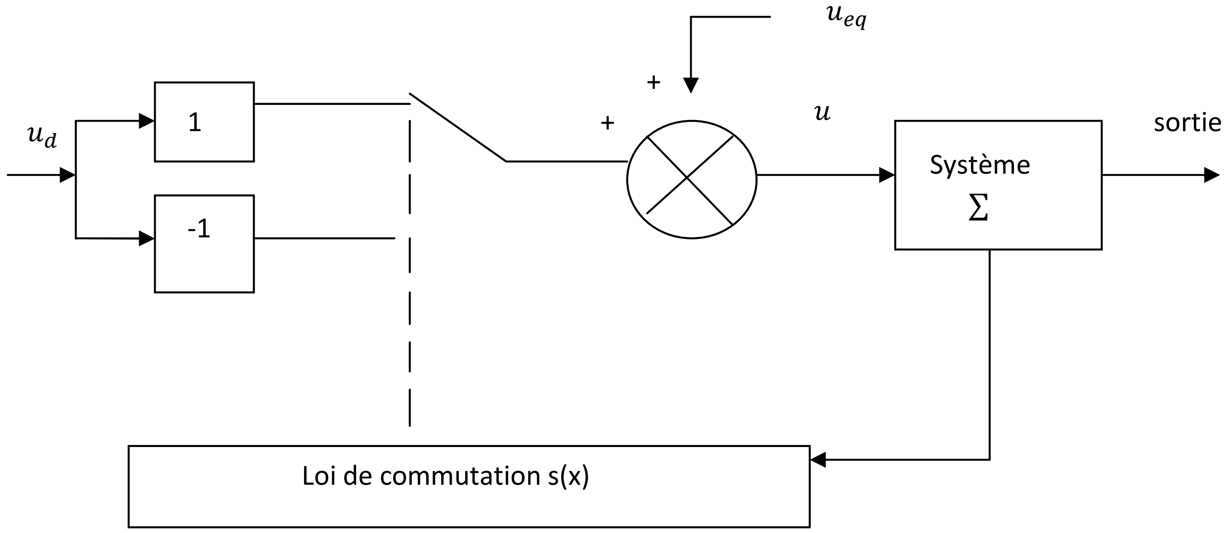


Figure [II.3] Structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande équivalente

La loi de commutation est donnée par :

$$u = \begin{cases} u_{eq} + u_d & \text{si} \quad s(x) > 0 \\ u_{eq} - u_d & \text{si} \quad s(x) < 0 \end{cases} \tag{II.4}$$

Pour la suite de notre travail, nous avons adopté cette dernière structure.

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 temps fini une surface (dans l'espace d'état) 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 dépond 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, moyennant qu'elles puissent effectivement être rejetées par la commande.

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

- **Le mode de convergence (MC) :** c'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase et tend vers la surface de commutation $\boldsymbol{s}(\boldsymbol{x}) = 0$. 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 $\boldsymbol{s}(\boldsymbol{x}) = 0$.

- **Le mode du régime permanent (MRP) : c**e 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.

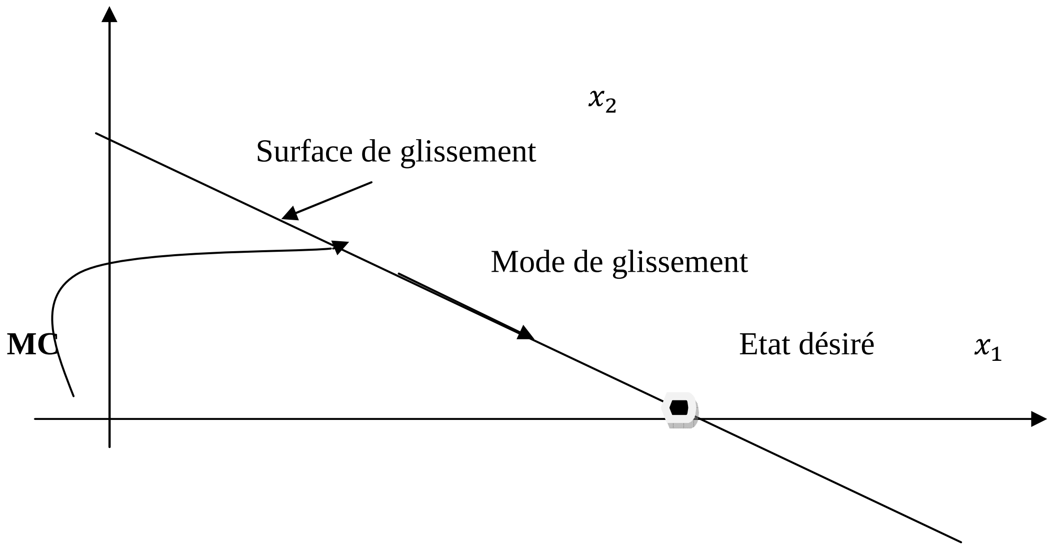


Figure [II.4]. Différents modes des trajectoires d'état.

II.4 Conception de la commande par mode de glissement

La conception des régulateurs par les modes glissants prend en charge les problèmes de stabilité et des performances désirées d'une façon systématique. La mise en œuvre de cette méthode de commande nécessite principalement trois étapes :

1. Le choix de la surface.

2. L'établissement des conditions d'existence de la convergence.

3. La détermination de la loi de commande.

II.4.1 Choix des surfaces de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces mais également leur forme, en fonction de l'application et de l'objectif visé.

En général, pour un système défini par l'équation d'état suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \qquad (II.5)$$

Il faut choisir « m » surfaces de glissement, pour un vecteur [U] de dimension « m ».Pour ce qui est de la forme de la surface. Nous propose une forme d'équation générale pour déterminer la surface de disc

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{dt} + \lambda_x\right)^{r-1} e(x) \qquad (II.6)$$

Avec :

$$e(x) = y(x) - y_{ref}(x) \qquad (II.7)$$

λ_x : Constante positive.

r : Degré relatif, égale au nombre de fois qu'il fait dériver la sortie pour faire apparaître la commande, c'est a dire le plus petit entier positif tel que : $\frac{\partial s(x)}{\partial u(x)} \neq 0$

Pour :

- **r =1 :** $S(x) = e(x)$
- **r =2 :** $S(x) = \lambda_x e(x) + \dot{e}(x)$
- **r =3 :** $S(x) = \lambda_x^{\,2}\, e(x) + 2\lambda_x \dot{e}(x) + \ddot{e}(x)$

Pour r >1, S(x)=0 est une équation différentielle linéaire dont la réponse $e(x)$ tend vers zéro pour un choix correct du gain λ_x.

En d'autres termes, la difficulté revient à un problème de poursuite de trajectoire dont l'objectif est de garder *S(x)* à zéro. Ceci est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart tout en respectant une condition de convergence**.**

II.4.2 Condition d'existence et de convergence

Cette condition est en fait la condition sous laquelle le mode de glissement existe et la trajectoire d'état va effectivement atteindre la surface de glissement en un temps fini.

II.4.2.1 La loi de commutation directe

C'est la première condition de convergence .elle a été proposée par **Emelyanov [3]** et **Utkin [11]** et elle est donnée par :

$$S(x).\dot{S}(x) < 0 \qquad \text{(II.8)}$$

II.4.2.2 La fonction de LYAPUNOV

Il s'agit de formuler une fonction scalaire positive $(V(x) > 0)$ pour les variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui fera décroitre cette fonction.

$(\dot{V}(x) < 0)$.

La fonction de Lyapunov est donnée comme suit :

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

Sa dérivée sera :

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

Pour que la surface s(x) = 0 soit attractive sur tout le domaine de fonctionnement, il suffit que :

$$\dot{V}(x) = S(x).\dot{S}(x) < 0 \qquad \text{(II.11)}$$

II.3 Calcul de la commande

Une fois la surface de glissement est choisie et la condition de convergence est vérifiée, on construit une loi de commande pour assurer l'attraction des trajectoires d'état vers la surface de glissement s(x)=0.

La loi de commande en mode de glissement est composée de deux grandeurs :

- ✓ La commande équivalente u_{eq}
- ✓ La commande discontinue u_d

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

$$u = u_{eq} + u_d \tag{II.12}$$

II.3.1 La commande équivalente

La commande équivalente est une fonction linéaire, peut être interprétée comme étant la valeur moyenne (continue) que peut prendre la commande u lors de la commutation rapide entre u^+ et u^- comme le montre la **figure 2**.

Elle est déterminée en résolvant l'équation du comportement dynamique du système durant le mode de glissement :

$$\dot{S}(x) = 0 \tag{II.13}$$

$$\dot{s} = \frac{\partial s}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial t} = 0 \tag{II.14}$$

Alors $\dot{s}$(x) s'écrit par :

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial x}\left(f(x) + g(x)u_{eq}\right) = 0 \tag{II.15}$$

On tire l'équation de u_{eq} à partir de l'équation (II.15) :

$$u_{eq} = -\left(\frac{\partial s}{\partial x}\, g(x)\right)^{-1} \frac{\partial s}{\partial x} f(x) \tag{II.16}$$

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

L'équation du régime glissant idéal est obtenue en remplaçant l'expression de u_{eq} dans (5) :$\dot{x} = f(x) - g(x)\left(\frac{\partial s}{\partial x}\, g(x)\right)^{-1}\frac{\partial s}{\partial x} f(x)$

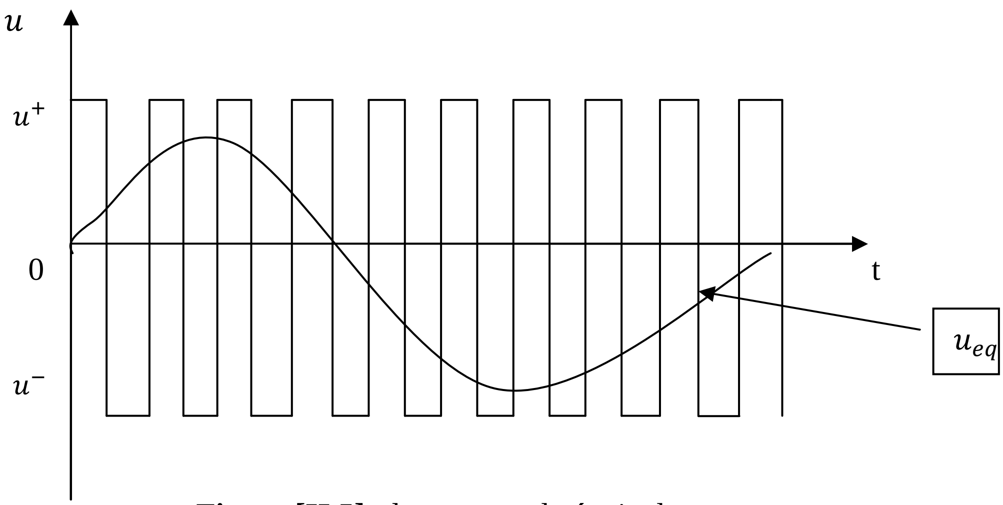


Figure [II.5] : la commande équivalente

II.3.3.2 La commande discontinue

La loi da commande discontinue est déterminée pour satisfaire les conditions de convergence. Cette commande force les dynamiques à converger vers la surface et assure l'insensibilité du système vis-à-vis des incertitudes et perturbations par exemple pour des paramètres mal connus, le système ne glisse pas parfaitement sur la surface il quitte celle-ci, mais le terme discontinu l'y ramène car la surface est attractive .c'est pour cette raison que la commande par modes glissants est dite robuste.

En remplaçant l'expression de u_{eq} dans (II.12), on obtient :

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

En remplaçant l'expression de u dans $\dot{s}$(x), on obtient :

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial x}\left(f(x) - g(x)\left(\frac{\partial s}{\partial x}\, g(x)\right)^{-1}\frac{\partial s}{\partial x} f(x) + g(x)u_d\right) \qquad \text{(II.18)}$$

Apres un bref calcul on aura ; $\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} g(x) + u_d$

Pour assurer la condition de l'attractivité :

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

Il suffit que u_d soit de signe opposé à $s(x)\frac{\partial s}{\partial x}g(x)$

Pour le terme u_d , différentes formes sont proposées dans la littérature **[5].**

Toutes les formes proposées donnent un terme discontinu. La forme simple qui est généralement utilisée est : $u_d = -k\ signe(s)$ ou k est une constante positive et signe est la fonction signe classique.

$$signe(s) = \begin{cases} +1 & si \quad s(x) > 0 \\ 0 & si \quad s(x) = 0 \\ -1 & si \quad s(x) < 0 \end{cases} \tag{II.20}$$

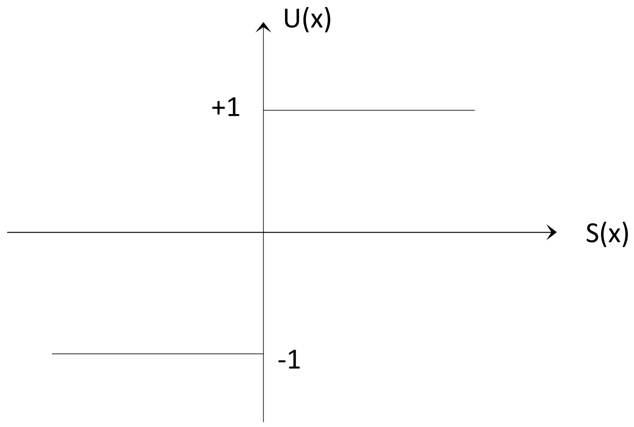


Figure [II.6].la fonction signe

Le choix de la constante K est très influant, car si la constante K est très petite le temps de réponse est trop long et si elle est trop grande, le « Chattering » apparaît.

II.5 Le phénomène du CHATTERING (réticence)

En pratique, la commande discontinue peut exciter les dynamiques de hautes fréquences non modélisées ,entrainant l'apparition de ce qu'on appelle la réticence ou broutement connu en anglais sous le nom de Chattering et se caractérise par de fortes oscillations autour de la surface .

Ce phénomène de réticence apparait car la commutation de la commande ne se fait pas à une fréquence infinie a cause des imperfections physiques (les retards, limitation physique) des actionneurs …etc.

Pendant les premières années de son apparition , la commande par modes glissants a été entravée par ce phénomène qui peut provoquer une détérioration anticipée de l'organe de commande , augmenter la consommation de l'énergie et voire engendrer l'instabilité du système en excitant les dynamiques hautes fréquences non considérées dans la modélisation

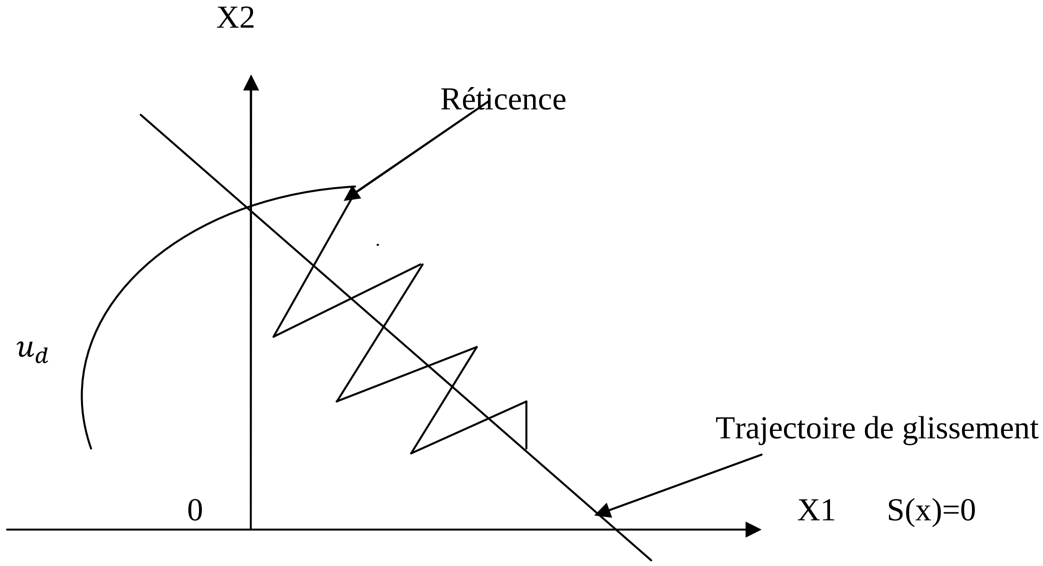


Figure [II.7].phénomène de réticence

Afin d'éliminer ou au mois réduire le phénomène de réticence on peut procéder par :

- Remplacer la fonction $signe(s(x))$ par des fonctions sigmoïdes qui sont lisse (douce, smooth en anglais) telle que les fonctions $\frac{2}{\pi} arctg\left(\frac{s}{w}\right), \frac{s}{|s|+w}$ ……etc.
- Remplacer la fonction $signe(s(x))$ par la fonction saturation représenté par la **figure [II.8].**

$$sat\left(\frac{s}{w}\right) = \begin{cases} \frac{s}{w} & si \quad |s| \leq w \\ signe(s) & si \quad |s| > w \end{cases} \qquad \text{(II.21)}$$

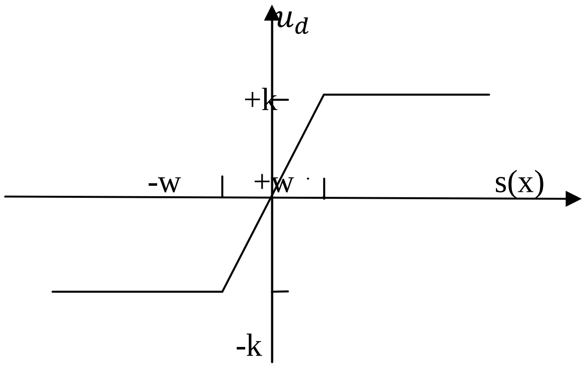


Figure [II.8] : la fonction saturation

Avec w représente l'épaisseur du voisinage de la surface dans lequel les composantes hautes fréquences sont filtrées**.**

- utiliser des commandes à gain décroissant définies par $u = -k|s|^{\alpha}\, signe(s)$ ou la commande diminue en amplitude à mesure que l'on s'approche de la surface de glissement.
- les modes glissants d'ordre supérieur (higher order sliding en anglais) :

Cette méthode récente a été introduite dans les années 80 par **Levantovsky** et **Emelyanov [3]** consiste à introduire de nouvelles dynamiques dans la commande ainsi le problème de discontinuité dû à l'éliment de commutation est déplacé sur les dérivées d'ordre supérieur de la commande.

Dans ce cas on contraint le système à évoluer sur la surface $s(x) = 0$ et maintenir ses $(p-1)$ premières dérivées successives$\left(s = \dot{s} = \ddot{s} = \cdots s^{(p-1)}\right)$ où p désigne l'ordre du mode glissant et il fixe le dégrée de douceur du système, il est choisi supérieur ou égal au degré relatif du système.

Cette technique très efficace présente les avantages suivants :

- préservation des caractéristiques de robustesse, de précision vues dans la loi de commande glissante d'ordre un.
- Elimination de la réticence.
- Amélioration des performances de la commande.

Cependant l'inconvénient majeur pour l'implémentation des algorithmes p- glissants est que le nombre d'informations nécessaires augmente avec l'ordre du régime glissant.

II.6 Propriété de robustesse

La plupart des techniques de commande robuste sont basées sur des méthodes adaptatives, reposant aussi bien sur l'identification que sur l'observation. Ces techniques conduisent souvent à des lois de commande relativement compliquées dont l'implantation se révèle lourdes en matière de calculs et de matériels .par contre, les techniques des modes glissants permettent d'associer les qualités de robustesse et de réalisation relativement simple.

Considérant le système perturbé suivant :

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u + p(x,t) \qquad \text{(II.22)}$$

Où $p(x,t)$ représente l'effet des incertitudes paramétriques sur le modèle ou des perturbations externes.

Sur la surface de glissement la robustesse du régime glissant vis-à-vis des perturbations et donnés par le théorème suivant :

Théorème [9] :

Le régime sur $s(x)$, du système perturbé (II.22), est invariant vis –à –vis de $p(x,t)$, si et seulement si le vecteur de perturbation $p(x,t)$ est engendré par $g(x)$.cette condition est appelée condition de recouvrement ou **matching condition**.

On dit que le vecteur $p(x,t)$ est engendré par $g(x)$ si :

$$p(x,t) \in span\{\, g(x)\}.$$

Notons que le système est insensible à de telles perturbations seulement au régime glissant.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué une présentation générale des concepts de la théorie des systèmes à structure variable, la caractéristique principale de ces systèmes est que leurs lois de commande se modifient d'une manière discontinue selon une logique determinée.les commutations de la commande s'effectuent en fonction des variables d'état utilisées pour créer une variété ou hyper surface dite de glissement dont le but est de forcer la dynamique du système à correspondre avec celle définie par l'équation de l'hyper surface.

Nous avons aussi présenté les étapes principales du calcul de loi de commande par mode glissant ainsi que les solutions proposées pour éliminer ou réduire le phénomène de réticence.

III.1 Introduction

- **Apparition de la logique floue**

Le terme d'ensemble flou apparaît pour la première fois en 1965 lorsque le professeur Lotfi A. Zadeh, de l'université de Berkeley aux USA, publie un article intitulé « Ensembles flous » (Fuzzy sets). Il a réalisé depuis, de nombreuses avancées théoriques majeures dans le domaine et a été rapidement accompagné par de nombreux chercheurs développant des travaux théoriques.

- **Premières applications**

Parallèlement, certains chercheurs se sont penchés sur la résolution par logique floue de problèmes réputés difficiles. Ainsi en 1975, le professeur Mamdani à Londres développe une stratégie pour le contrôle des procédés et présente des résultats très encourageants qu'il a obtenus sur la conduite d'un moteur à vapeur. En 1978, la société danoise F.L.Smith réalise le contrôle d'un four à ciment. C'est là la première véritable application industrielle de la logique floue.

- **Essor**

C'est au Japon, où la recherche n'est pas seulement théorique mais également très applicative, que la logique floue connaît son véritable essor. A la fin des années 1980, c'est d'un véritable boum qu'il faut parler. Les produits grand public, machines à laver, appareils photographiques et autres caméscopes estampillés « fuzzy logic » ne se comptent plus. Dans l'industrie, le traitement des eaux, les grues portuaires, les métros, les systèmes de ventilation et de climatisation sont touchés. Enfin, des applications existent dans des domaines très différents tels que la finance ou le diagnostic médical. A partir de 1990, c'est en Allemagne que des applications apparaissent en grand nombre ainsi qu'à une moindre échelle aux USA.

Enfin en France, la logique floue devient aujourd'hui une réalité **[10].**

III.2 Définitions :

III.2.1 La logique floue :

La logique floue est une extension de la logique booléenne créée par Lotfi Zadeh en 1965 en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. En introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition, permettant ainsi à une condition d'être dans un autre état que vrai ou faux, la logique floue confère une flexibilité très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes.

III.2.2 Variable floue (linguistique):

Une variable linguistique (floue) représente un état dans le système à régler ou une variable de réglage dans un contrôleur floue.sa valeur est définie dans des termes linguistiques qui peuvent être des mots ou des phrases d'un langage naturel.

III.2.3 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).

III.2.3.1 Forme de la fonction d'appartenance

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

- Triangulaire :

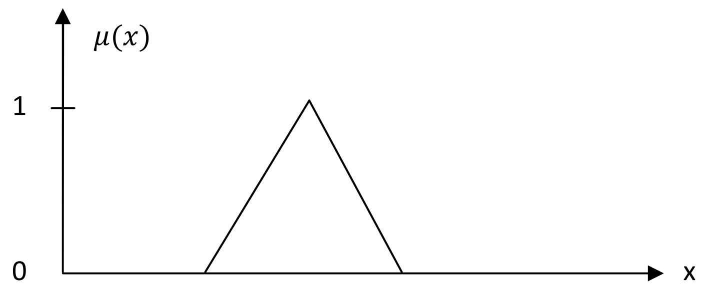


Figure [III.1] fonction d'appartenance triangulaire

- Trapézoïdale :

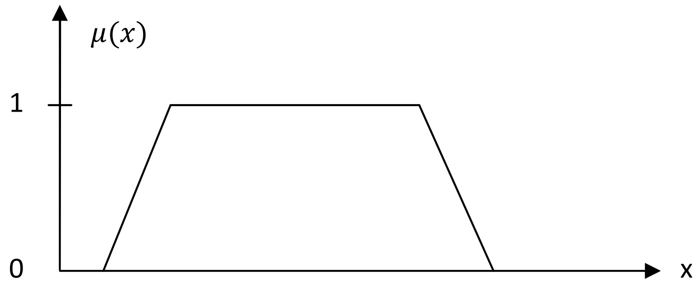


Figure [III.2] : fonction d'appartenance Trapézoïdale

- Gaussienne :

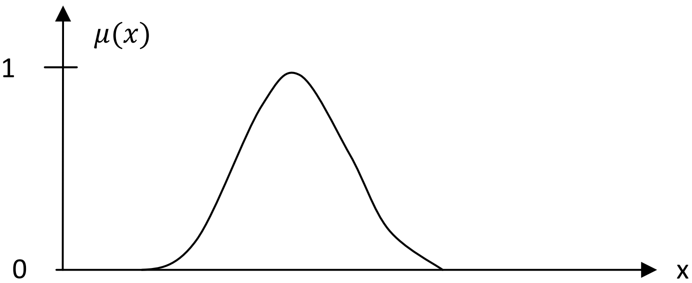


Figure [III.3] : fonction d'appartenance Gaussienne

III.2.3.2 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.

III.2.4 Les règles linguistiques

L'idée principale des systèmes basés sur la logique floue est d'exprimer la connaissance humaine sous la forme de règles linguistiques de forme

Si…………alors……..

Chaque règle a deux parties :

- Partie antécédente (prémisse ou condition) exprimée par « Si »
- Partie conséquente (conclusion ou implication) exprimée par « Alors »

Exemple :

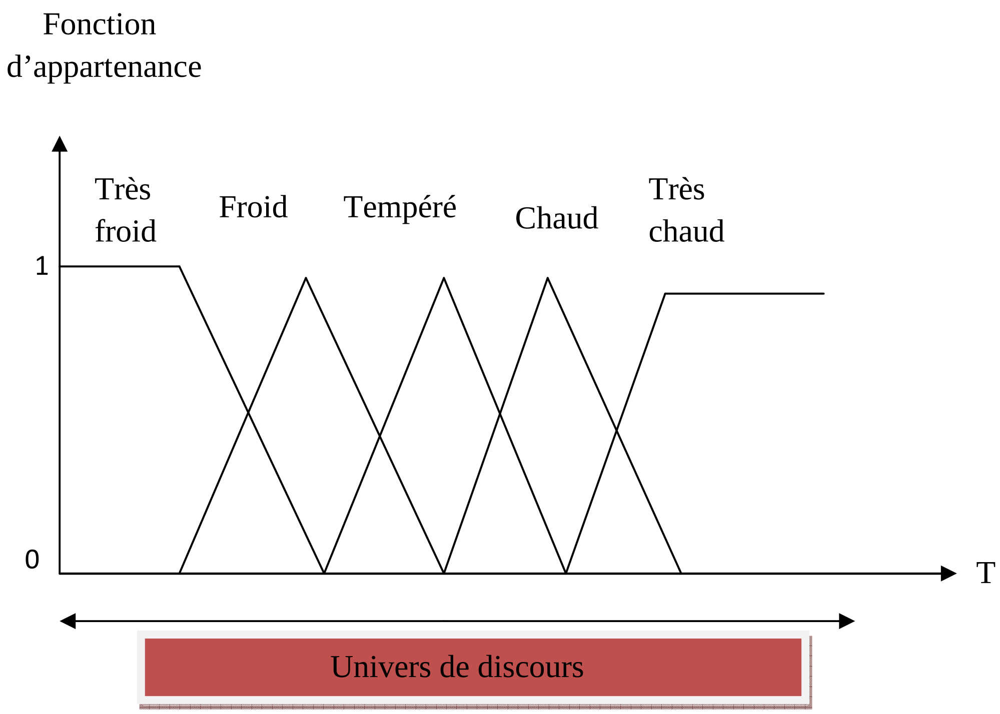


Figure [III.4] : fonction d'appartenance

Univers de discours : gamme de température T

Variable linguistique : température T

Valeurs linguistiques : très froid, froid, tempéré, chaud, très chaud

III.2.5 Les operateurs flous

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

Opérateur	Opération 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 variables par rapport aux autres.

Quant aux opérations « produit » et « valeur moyenne », elles sont les plus complexes à calculer mais produisent un résultat qui tient compte des valeurs de l'ensemble des variables **[8].**

III.3 Structure interne d'un système d'inférence flou

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.

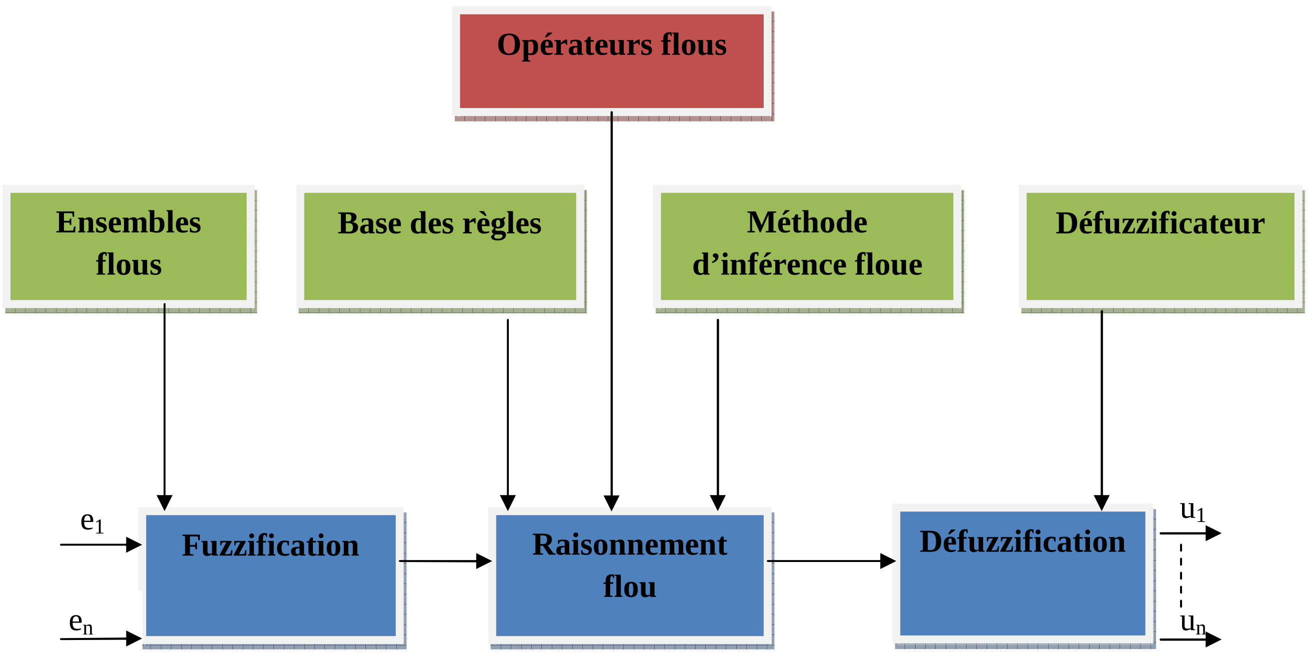


Figure [III.5]: Architecture de base d'un système flou

III.4 Procédure de raisonnement flou

III.4.1 Fuzzification

La fuzzification est l'étape de passage du domaine numérique au domaine linguistique, cette étape est nécessaire dés lors que l'on veut manipuler, à l'aide de la théorie des ensembles flous, des grandeurs physiques mesurables. 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 (digitale), puis on procède à la fuzzification. L'attribution du degré d'appartenance à chaque valeur d'entrée est un passage des grandeurs physiques en variables linguistiques qui sont définies par leur valeurs linguistiques En général, les fonctions d'appartenance les plus utilisées sont : triangulaire, trapézoïdale, gaussienne, sigmoïde, etc.

III.4.2 Inférence

Les inférences lient les grandeurs mesurées (fuzzifiées) et les variables de sorties par des règles linguistiques, ces règles sont combinées en utilisant les connections ET et OU.

A partir de la base de règles donnée par l'expert et des sous ensembles flous correspondants à la fuzzification des entrées, le mécanisme d'inférence calcule le sous ensemble flou Y relatif à la commande du système. La base de règles floues est constituée par une collection des règles linguistiques de la forme :

R(i) : SI x1 est F1 et x2 est F2 ···et xn est Fn, ALORS Y est G(i), i = 1, ···, M

où : (x1, x2, ···, xn) est le vecteur des variables des entrées, Y est la commande, M est le nombre de règles, n est le nombre de variables floues, (F1, F2,··· Fn) sont les ensembles flous.

III.4.2.1 Activation de règles linguistiques

Dans le sens mathématique l'activation de règle est l'application d'une relation pour obtenir le poids d'activation de chaque règle. D'habitude on applique l'operateur min ou le produit sur les valeurs d'appartenance. Le poids w_i obtenu de la i^{eme} règle est : w_i=$\mu_{AI}(x)$ et $\mu_{BI}(y)$

Ou $\mu_{AI}(x)$ et $\mu_{BI}(y)$ sont les valeurs d'appartenance de X et Y respectivement aux sous-ensembles A_i et B_i. Cela veut dire que la partie conséquence de i^{eme}règle (u=c_i) doit être activé avec un niveau w_i.

III.4.2.2 Méthodes d'inférence

a) Méthode de min-max

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 operateur 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),

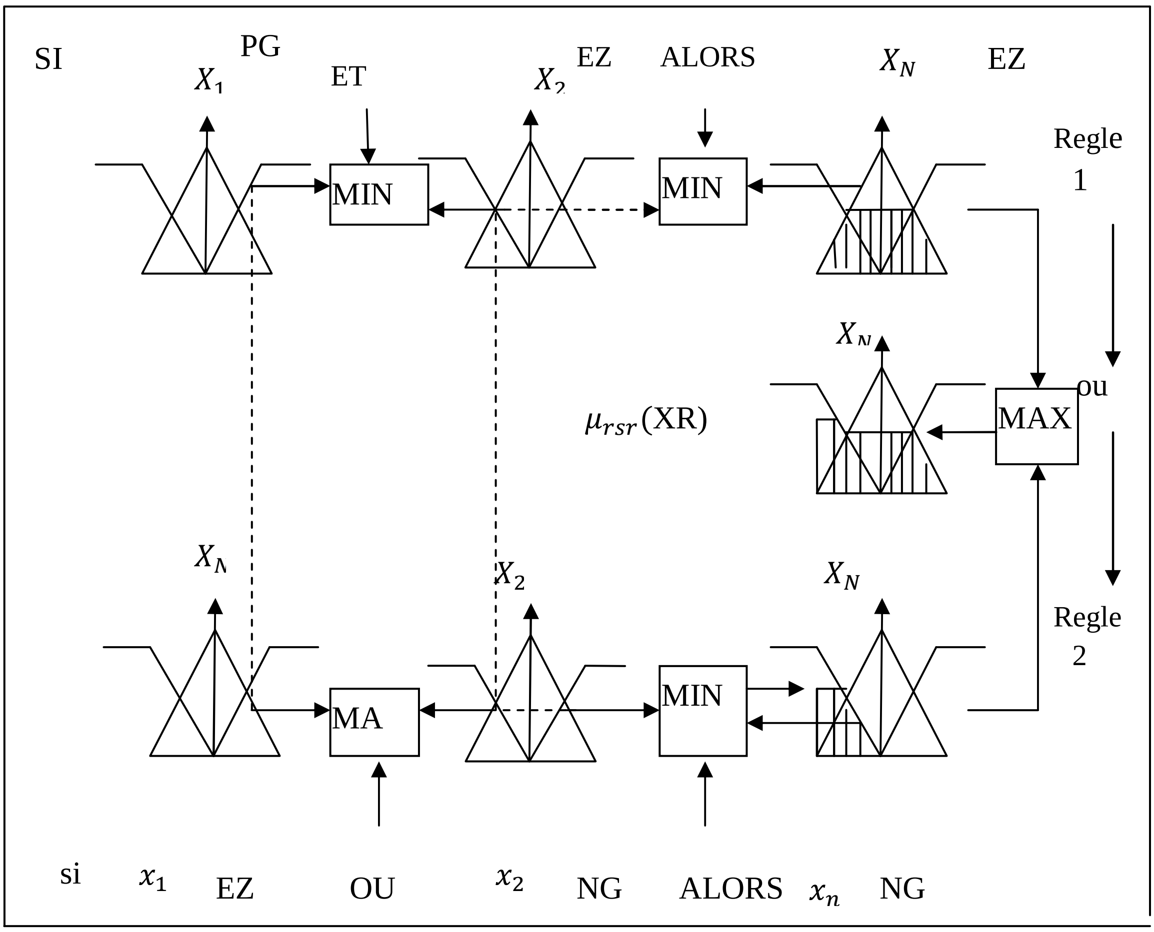


Figure [III.6] Méthode d'inférence min-max pour deux variables d'entrée et deux règles

b) Méthode de max-prod

Cette méthode utilise les représentations standards pour les sous-ensembles d'entrées et de sortie, le poids d'activation d'une règle est utilisé pour manipuler la fonction d'appartenance de sous-ensemble de sortie imposé par cette règle. L'action globale ou la valeur de commande est l'union des actions produites par chaque sous-ensemble.

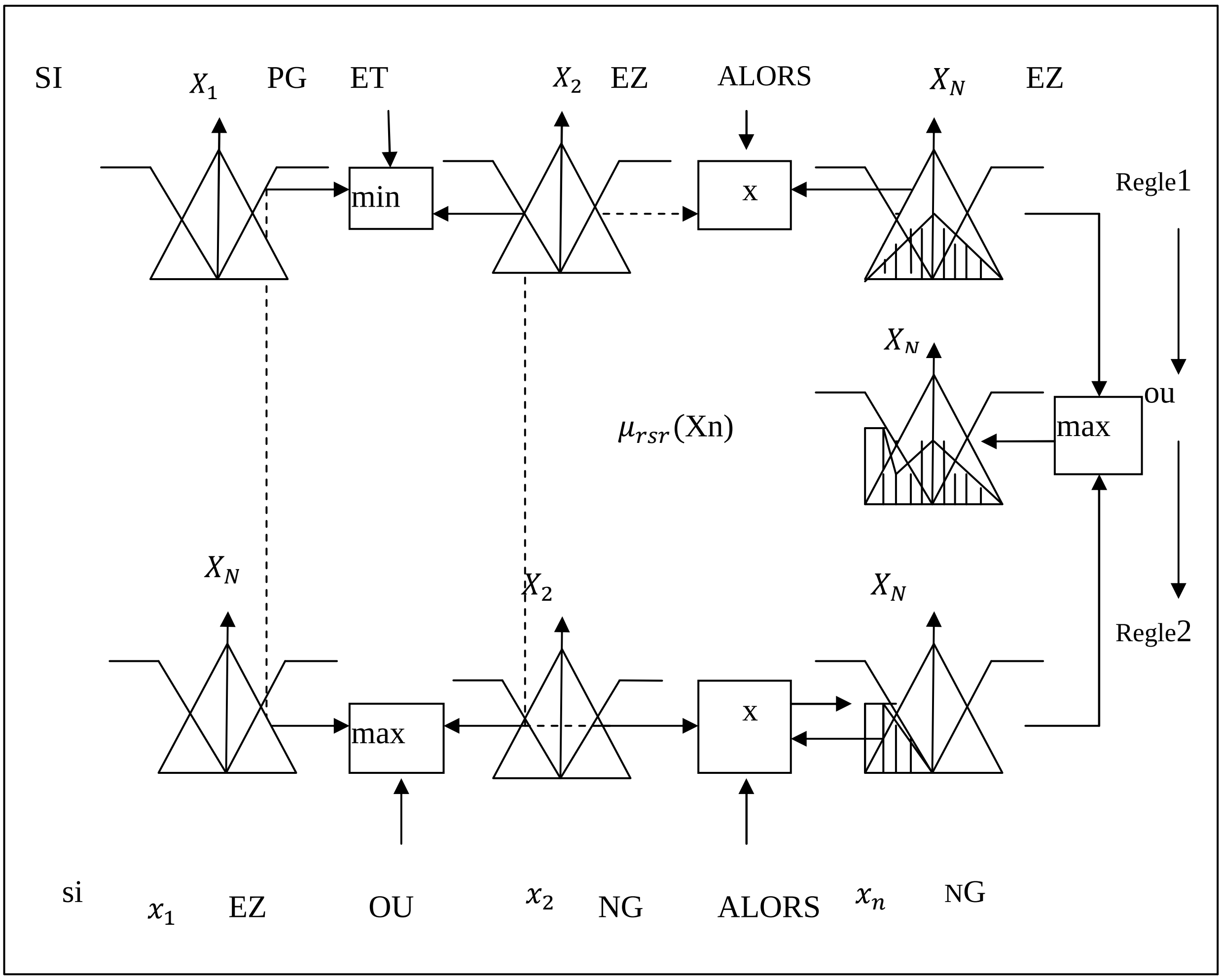


Figure [III.7] Méthode d'inférence max-pro pou deux variables d'entrée et deux règle

c) Méthode takagi et sugeno

Chaque fonction d'appartenance de la sortie est une combinaison linaire à des valeurs d'entrées.

La sortie précise est la moyenne pondérée des poids d'activations et des sorties des fonctions d'appartenance.

La méthode de sugeno ou les fonctions d'appartenance sont des valeurs constituent un cas particulier de cette méthode.

III.4.3 Défuzzification

La défuzzification est une interface linguistique –numérique qui transforme la partie floue issue du raisonnement flou en valeurs numériques directement exploitables par le processus. Plusieurs méthodes de défuzzification existent en logique floue, les plus utilisées sont les suivantes :

III.4.3.1 La méthode du centre de gravité (CG)

La méthode de défuzzification par centre de gravité, la plus utilisée, consiste à calculer l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance en utilisant la forme générale suivante :

$$u^* = \frac{\int_{-1}^{+1} u\, \mu_{res}(u)\, du}{\int_{-1}^{+1} \mu_{res}(u)\, du}$$

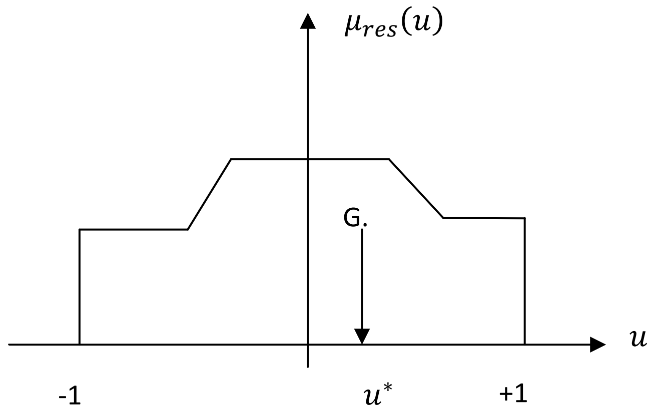


Figure [III.8] La méthode du centre de gravité

Dans le cas discret : $$u^* = \frac{\sum_{i=1}^{n} u_i\, \mu_{res}(u_i)}{\sum_{i=1}^{n} \mu_{res}(u_i)}$$

Avec :

n : le nombre de niveau de quantification

u_i : la valeur de sortie de niveau i et $\mu_{res}(u_i)$ sa valeur d'appartenance

III.4.3.2 Méthode de moyenne des maximums

Celle-ci dérive d'une autre méthode encore plus simple, la méthode du maximum. Pour cette dernière, la valeur de la sortie est simplement l'abscisse du maximum de la fonction d'appartenance résultante. Si cette fonction présente plusieurs fois le même maximum, il y a indécision. La méthode de la moyenne des maximums lève cette ambigüité en prenant la moyenne de ces maximums. Rapide à calculer, elle présente néanmoins un inconvénient majeur en effet, la valeur de la sortie peut présenter des sauts très importants pour des variations d'entrées très faibles.

$$\boldsymbol{u}^* = \sum_{\boldsymbol{i}=1}^{\boldsymbol{n}} \frac{\boldsymbol{\mu_i}}{\boldsymbol{n}}$$

n : le nombre de niveau de quantification

u_i la valeur d'appartenance pour lesquelles est maximale

III.4.3.3 La méthode des hauteurs pondérées ou méthode de Takagi -Sugeno

Cette méthode est utilisée lorsque les sortie sone difinies comme fonction linéairement dépendandes d'entrées.

En géneral la partie conséquente de la régle u=f(x,y)=ax+by+c

Si w_i est le poids d'activation de la règle, la valeur précise de la commande est :

$$\boldsymbol{u}^* = \frac{\sum_{\boldsymbol{i}=1}^{\boldsymbol{n}} \boldsymbol{w_i f(x_i\ , y_i\ )}}{\sum_{\boldsymbol{i}=1}^{\boldsymbol{n}} \boldsymbol{w_i}}$$

Avec ; n est le nombre de règles activées

III.5 Différents types de régulateurs flous

III.5.1 Régulateur flou 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 maitrise 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 conclusions symboliques, l'inférence max-min et la défuzzification par centre de gravité.

Apres, Mocvicar et Whelan ont observé que les bases de règles proposées par King et Mamdani étaient incomplètes. Ils ont fait analyse détaillée sur ces bases de règles et proposé une matrice de règles (voir le **tableau III.2**) qui possède deux entrées, l'erreur et sa variation, en se basant sur les deux principes suivants :

- Si la sortie est égale à la valeur désirée et la variation de l'erreur est nulle, la commande sera maintenue.
- Si la sortie diverge de la valeur désirée, l'action sera dépendante du signe de la valeur de l'erreur et de sa variation.

Si les conditions telles que l'erreur peut être corrigé par elle-même, alors la commande sera maintenue. Dans le cas contraire, la commande sera changée pour avoir des résultats satisfaisants.

Δe \ e	NG	NP	Z	PP	PG
NG	NG	NG	NG	NP	Z
NP	NG	NG	NP	Z	PP
Z	NG	NP	Z	PP	PG
PP	NP	Z	PP	PG	PG
PG	Z	PP	PG	PG	PG

Tableau III.2 Matrice de Mocvicar-Whelan

Avec :

$\boldsymbol{e}$ **:** L'erreur entre la consigne et sortie du système

$\Delta\boldsymbol{e}$ **:** Variation de l'erreur

NG: Négatif grand

NP: Négatif petit

Z : Zéro

PP: Positif petit

PG : Positif grand

III.5.2 Régulateur flou de type Sugeno

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

$b^i = f(x_1, k, x_n)$, les prémisses étant symboliques.

Ou $f(.)$ est généralement une fonction polynomiale.

La sortie du régulateur est donnée par :

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

Ou les α_i sont les valeurs de vérité de chaque règle pour i=1…n.

Notons que la sortie donnée par le régulateur est la variation du signal de commande.

III.6 Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue

Certainement, la commande par la logique floue comporte un certain nombre d'avantage et d'inconvénients.

- **Les avantages :**

✓ La non-nécessite d'une modélisation du processus à commander, ainsi que d'une analyse mathématique profonde.

✓ La possibilité de bénéficier et d'implémenter des connaissances et des expertises humaines sur le système à commander.

✓ La maitrise du système à commander avec un comportement complexe (fortement non linaire et difficile à modifier), aussi, cette approche offre la possibilité d'utiliser des processeurs spécialisés (dit processus floue), afin d'augmenter la précision et la vitesse du calcul.

-
- **Les inconvénients :**

✓ Le manque de méthodes systématiques précises pour la conception et la synthèse d'une commande par la logique floue (par exemple dans le choix des grandeurs à mesurer, dans la détermination des facteurs de normalisation, dans le choix de la stratégie, soit de fuzzification, les interfaces et la défuzzification,…).

- ✓ L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de commande en toute généralité.
- ✓ La cohérence des interfaces non garantie a priori (possibilité d'apparition de règles d'inférences contradictoires)

III.6 Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté la théorie de commande par la logique floue ainsi que la principale démarche pour la conception d'un régulateur flou, ensuite les bases nécessaires à la compréhension des méthodes de base 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. En général les règles sont proposées par un expert, ensuite le domaine de chaque variable linguistique en un ensemble de fonctions d'appartenance qui expriment les valeurs linguistiques de façon approximative par exemple : petit, moyen, grand.

Nous avons aussi présenté les deux régulateurs flous les plus utilisés à savoir le régulateur flou de type Mamdani et le régulateur flou de type Sugeno

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats de simulation en mode de régulation et de poursuite de trajectoire des différentes commandes appliquées au modèle dynamique du bras manipulateur à 2 ddl développé dans le chapitre I.

Dans un premier temps, nous donnerons les résultats de simulation de quelques lois de commande classique, à savoir la commande proportionnelle dérivée avec compensation de l'effet de gravité (point à point) avec un objectif de régulation, et la loi de commande du couple calculée (computed torque control) ayant pour objectif la poursuite de trajectoire. Ensuite, nous présenterons les résultats de simulation avec application de la commande par modes glissants, d'une part et avec remplacement de la fonction discontinue par un système flou, d'autre part.

Enfin nous procèderons à un test de robustesse en introduisant des perturbations et des incertitudes paramétriques sur le modèle avec la dernière technique de commande appliquée.

IV.2. Modèle dynamique du robot

Le modèle du robot manipulateur didactique à 2 degrés de liberté (voir Figure I.6) est donné par l'équation (I.9) développée dans le chapitre I :

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

Les matrices M(q), $C(q,\dot{q})$ et G(q) donnée par (I.17) de notre système sont :

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

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

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

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 mettre en évidence 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.20) dont le schéma bloc et représenté par la figure **[I.7]** sont :

- ✓ Le gain de position : $Kp = \begin{bmatrix} 630 & 0 \\ 0 & 480 \end{bmatrix}$
- ✓ Le gain de vitesse : $Kv = \begin{bmatrix} 135 & 0 \\ 0 & 63 \end{bmatrix}$

Les positions désirées sont : $qd = \begin{bmatrix} 1.5 \\ 1.6 \end{bmatrix}$

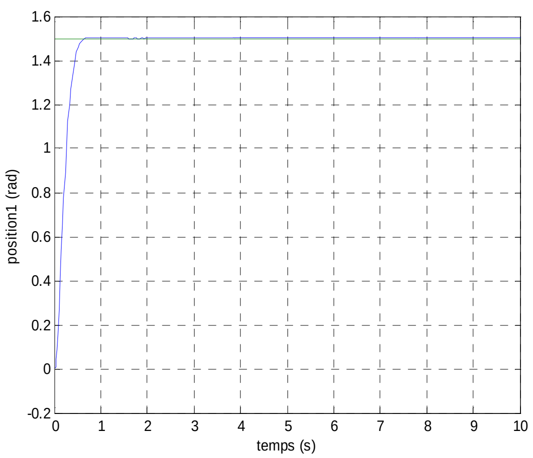


Figure IV.3.1.a : allure de la position 1 avec la commande point à point

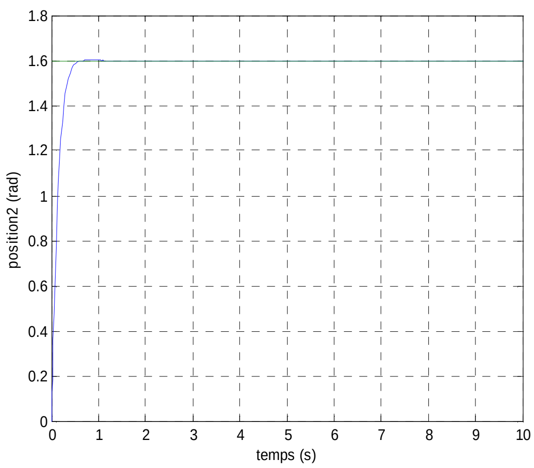


Figure IV.3.1.b : allure de la Position 2 avec la commande point à point

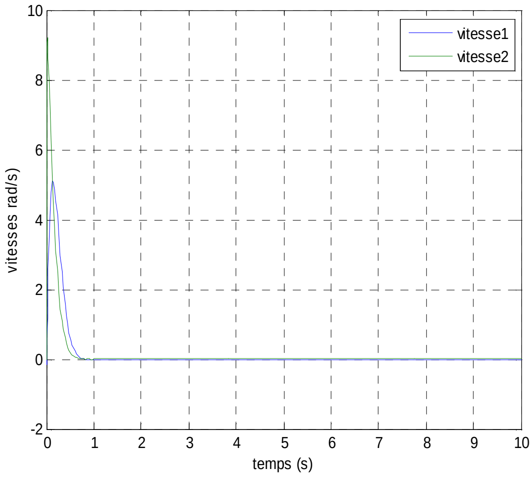


Figure IV.3.1.c : allures des vitesses avec la commande point à point

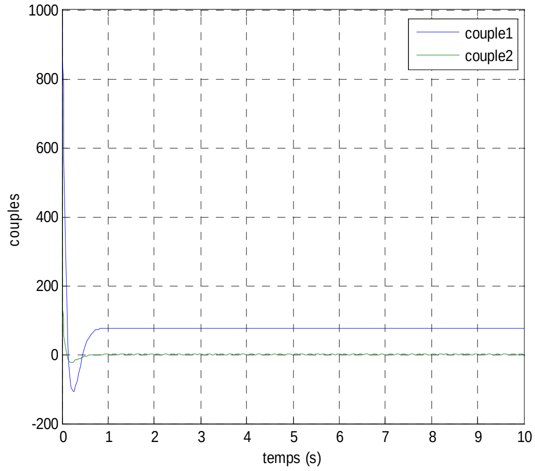


Figure IV.3.1.d : allures des couples avec la commande point à point

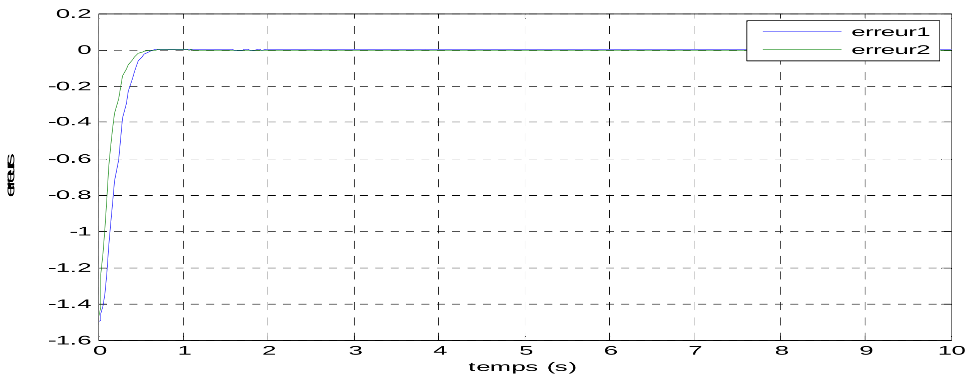


Figure IV.3.1.e : allures des erreurs de position 1 et 2

- **Interprétation des résultats**

D'après les figures **IV.3.1.a** et **IV.3.1.b,** nous remarquons que les deux articulations 1 et 2 atteignent les valeurs désirées 1.5 rad et 1.6 rad avec des temps de réponse de 0.46s et de 0.37s respectivement.

Nous remarquons également, d'après la figure **IV.3.1.d,** 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

Dans cette partie de notre travail, nous allons mettre en évidence la loi de commande donnée par formule (I.36), représenté par la figure **[I.12].** Il est à noter que les trajectoires désirées sont générées en utilisant le polynôme d'interpolation de degré 5 illustré par la figure **[I.10]**

Pour **:** $Kp = \begin{bmatrix} 600 & 0 \\ 0 & 550 \end{bmatrix}$ et $Kv = \begin{bmatrix} 80 & 0 \\ 0 & 35 \end{bmatrix}$, nous avons les résultats suivants :

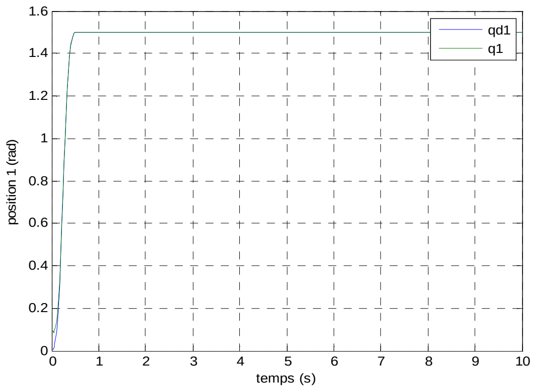


Figure IV.3.2.a : allure de la position 1 avec la commande du couple calculé

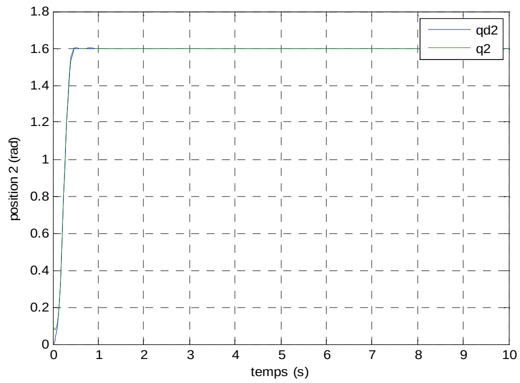


Figure IV.3.2.b : allure de la position 2 avec la commande du couple calculé

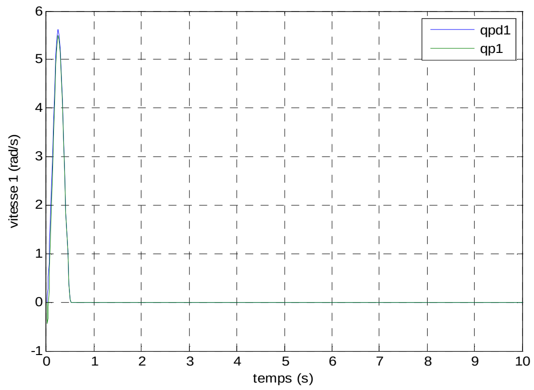


Figure IV.3.2.c : allure de la vitesse 1 avec la commande du couple calculé

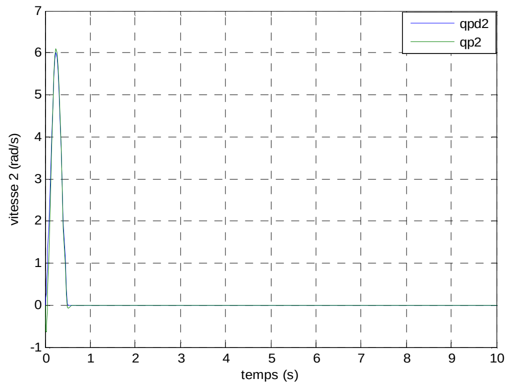


Figure IV.3.2.d : allure de la vitesse 2 avec la commande du couple calculé

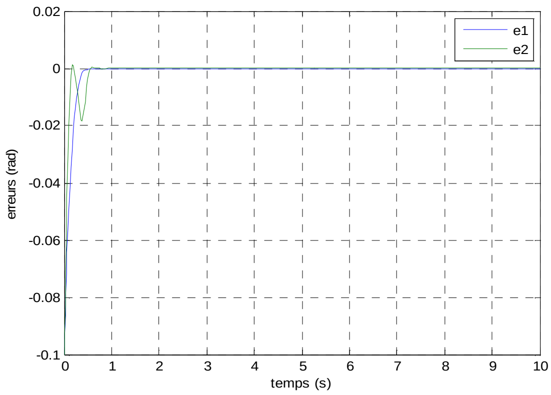


Figure IV.3.2.e : allures des erreurs de position avec la commande du couple calculé

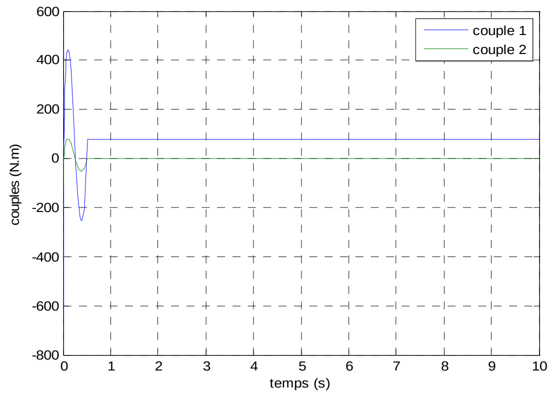


Figure IV.3.2.f : allures des couples avec la commande du couple calculé

- **Interprétation des résultats**

D'après les figures précédentes, nous remarquons que nous avons une bonne poursuite des trajectoires désirées en position et en vitesse et 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, donnée par la formule (II.12), par modes glissants du bras manipulateur dont le modèle dynamique est donné par l'équation (I.9), est donnée comme suit :

On a donc d'une part :

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

Et d'autre part :

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

Calcul de la loi de commande équivalente u_{eq}

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

- **Calcul du degré relatif**

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

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

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

Calcul du modèle d'état de notre système

On pose :

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

$$h(x) = q = x_1$$

Après un bref calcul mathématique, on trouve :

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

Avec

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

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

Pour i=0

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

Pour i=1

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

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 :

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

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

Au régime glissant

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

Donc

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

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

De (IV.1) et (IV.2), on a :

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

D'où :

$$u_{eq} = C(q)\dot{q} + G(q)] + M^{-1}[\ddot{q}_d - \lambda\left(\dot{q} - \dot{q}_d\right)] \qquad \text{(IV.9)}$$

La commande discontinue est donnée par

$$u_d = -Ksign(s(e))$$

Donc la commande globale est donnée comme suit :

$$u = C(q)\dot{q} + G(q) + M^{-1}[\ddot{q}_d - \lambda(\dot{q} - \dot{q}_d)] - Ksign(s(e)) \qquad \text{(IV.10)}$$

Pour les deux modes de commande (régulation et poursuite de trajectoire), nous allons d'abord implanter cette loi de commande (IV.10) sous MATLAB/SIMULINK. Puis nous allons remplacer la fonction signe par la fonction saturation. Enfin, nous remplacerons la commande discontinue par un système flou (fuzzy system).

Le schéma de simulation suivant représente la commande par modes glissants

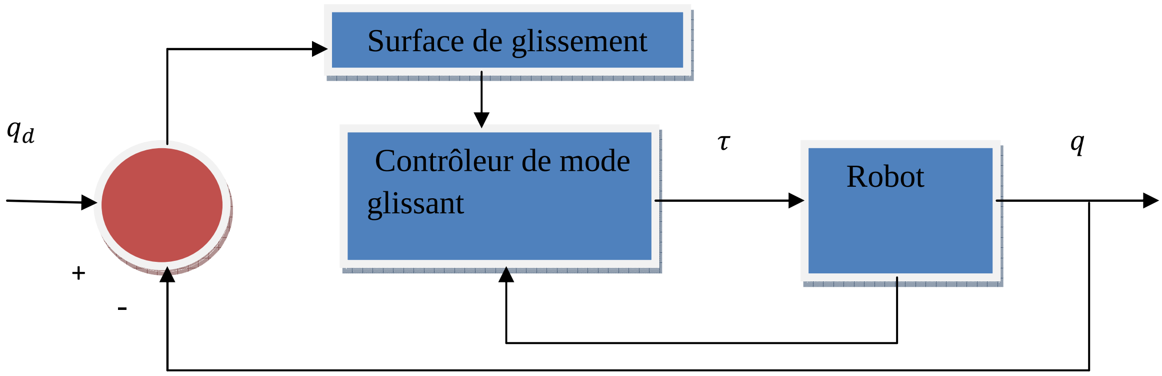


Figure [IV.1] Schéma bloc de la commande par modes glissants

IV.4.1.1 Résultats des simulations en mode de régulation

Dans ce passage, nous présenterons les résultats de simulation de notre système, en mode régulation, commandé par le contrôleur à modes glissants.

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

Pour les gains suivants : K1=510, K2=82.

Et λ=12

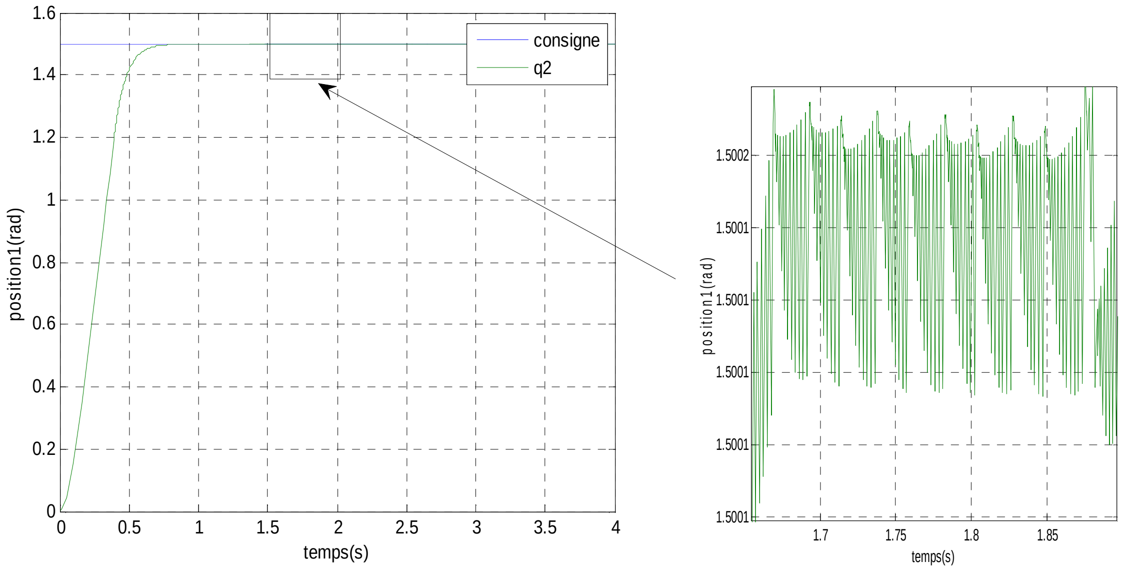


Figure IV.4.1.1.a : Allure de la position 1 et illustration du phénomène de Chattering avec la commande par modes glissants

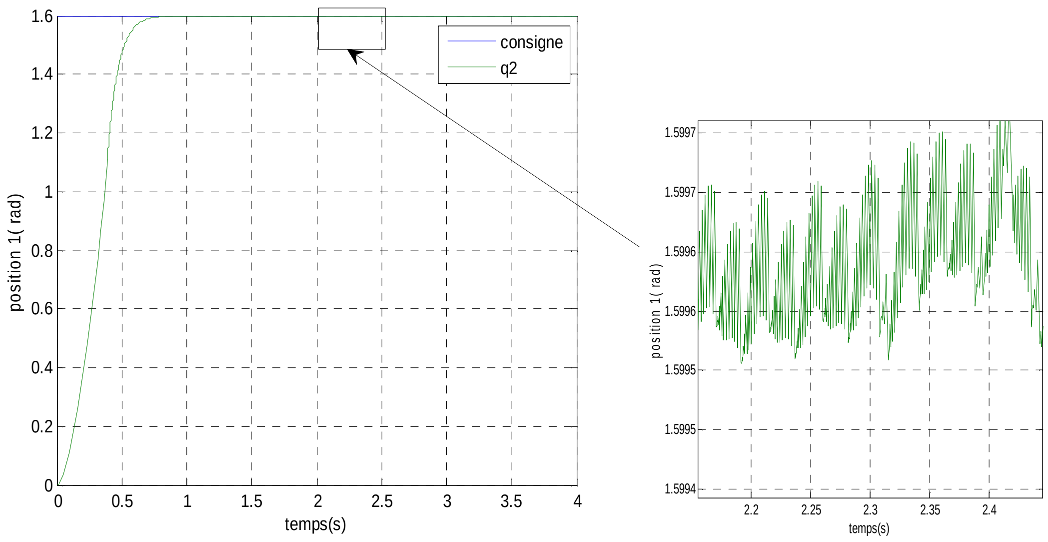


Figure IV.4.1.1.b : Allure de la position 2 et illustration du phénomène de Chattering avec la commande par modes glissants

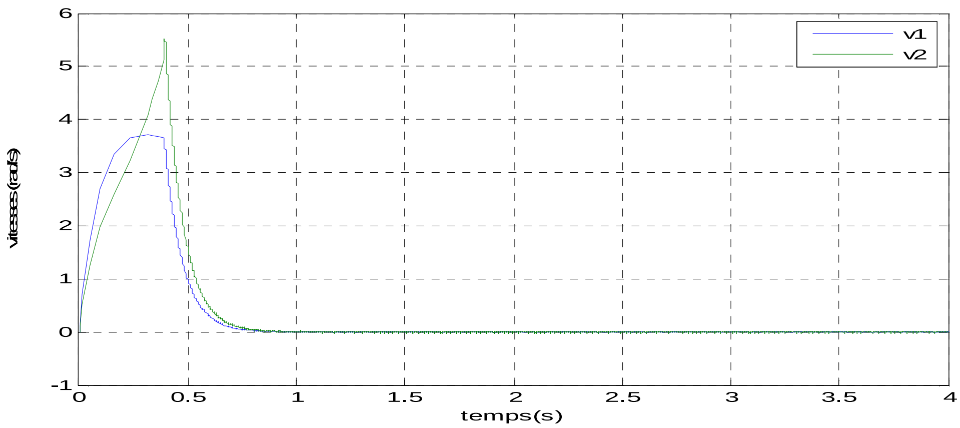


Figure IV.4.1.1.c : Allures des vitesses angulaires avec la commande par modes glissants

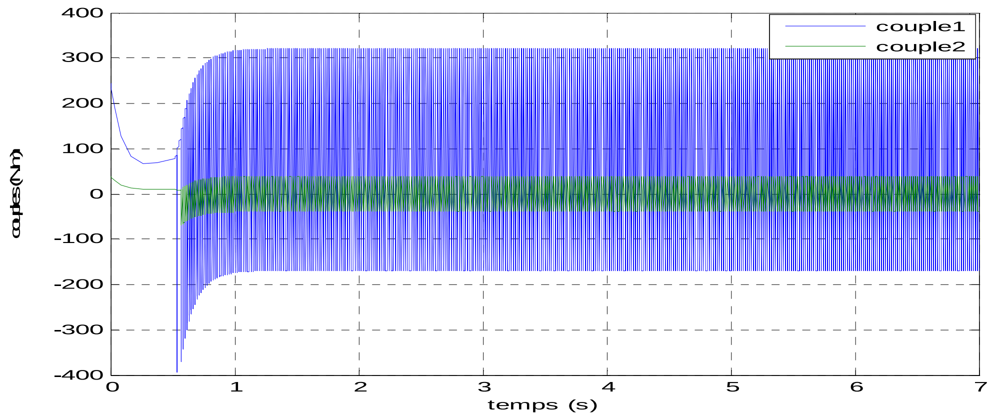


Figure IV.4.1.1.d : Allures des couples avec la commande par modes glissants

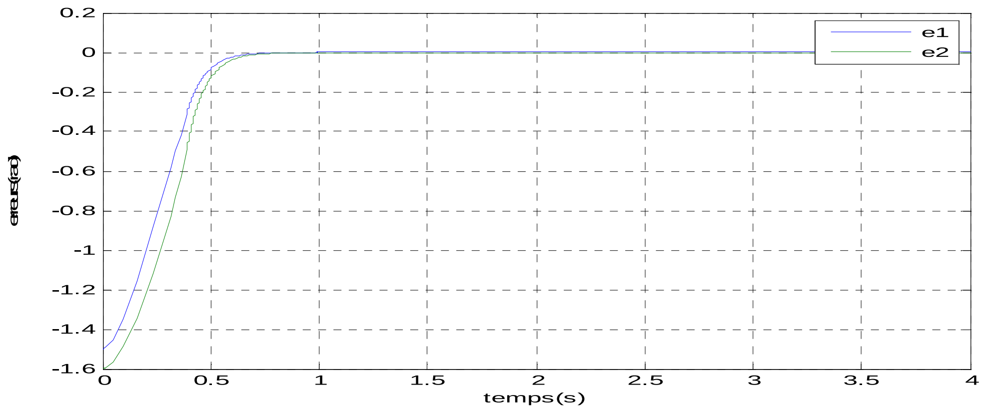
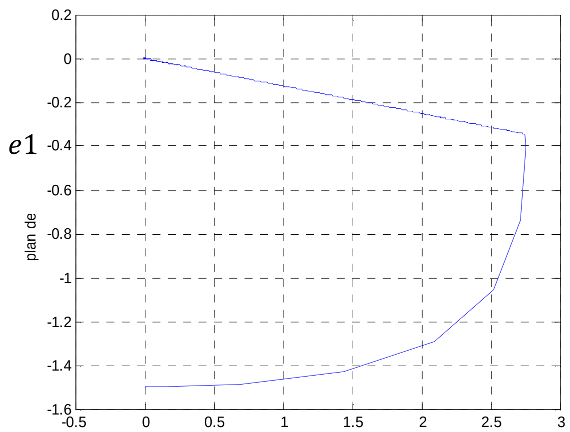


Figure IV.4.1.1.e: Allures des erreurs de position avec la commande par modes glissants



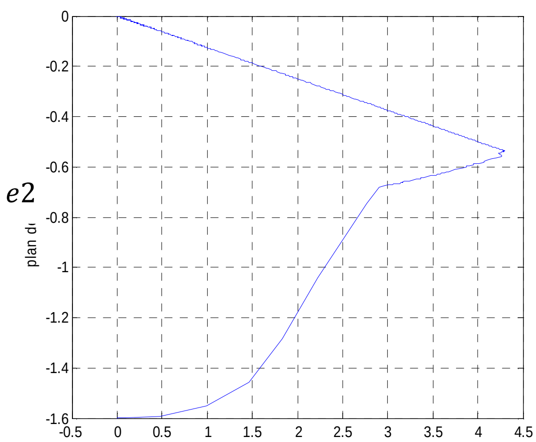


Figure IV.4.1.1.f : plan de phase de la première articulation

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

- **Interprétation des résultats**

D'après les figures **IV.4.1.1.a** et **IV.4.1.1.b**, nous remarquons que les deux articulations 1 et 2 atteignent les valeurs désirées avec des temps de réponse de 0.5s et 0.56s respectivement mais avec apparition du phénomène de réticence (Chattering en anglais) qui est dû à la fonction signe.

Les erreurs de position convergent vers zéro, tel qu'il est montré dans la figure **IV.4.1.1.e.**

- ✓ Pour éliminer le phénomène de réticence, nous avons remplacé la fonction signe par une autre fonction dite de saturation. Les résultats de simulation sont illustrés par les figures suivantes :

Nous avons utilisé les mêmes paramètres que précédemment : k1=510, k2=82 et λ=12.

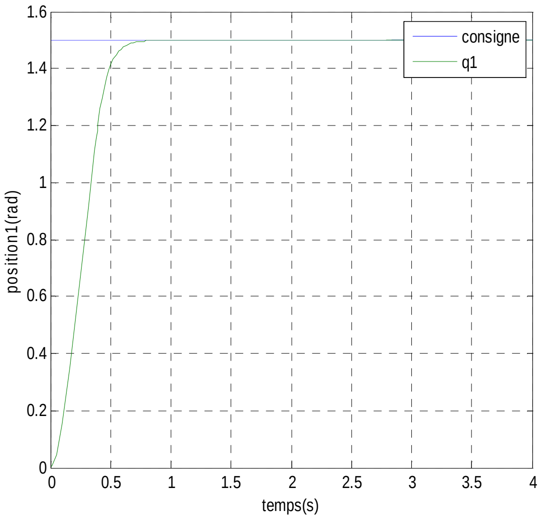


Figure IV.4.1.1.h: Allure de la position 1 avec la commande par mode glissant (avec la fonction sat)

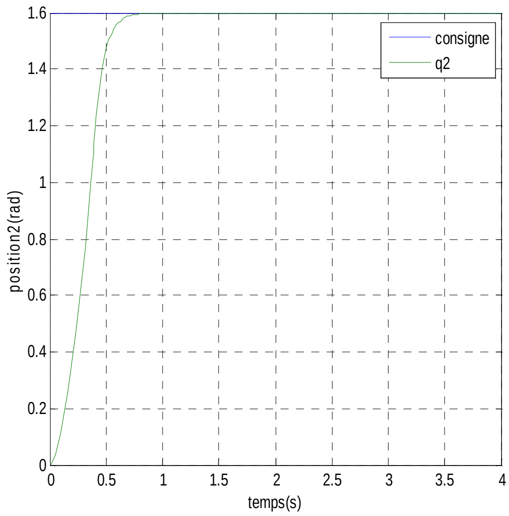


Figure IV.4.1.1.i: Allure de la position 2 avec la commande par mode glissant (avec la fonction sat)

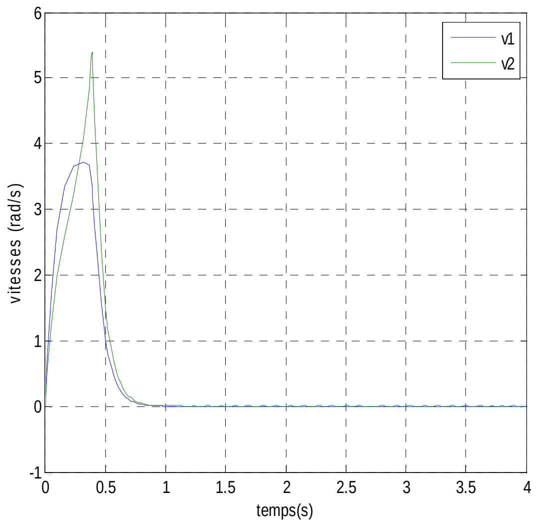


Figure IV.4.1.1.j : Allures des vitesses avec la commande par modes glissants (avec la fonction sat)

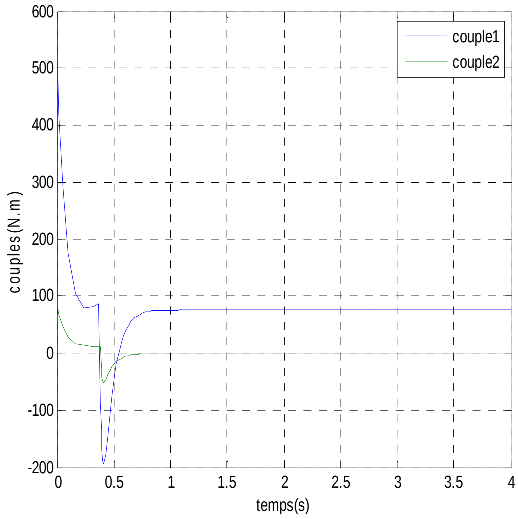


Figure IV.4.1.1.k : Allures des couples avec la commande par modes glissants (avec la fonction sat)

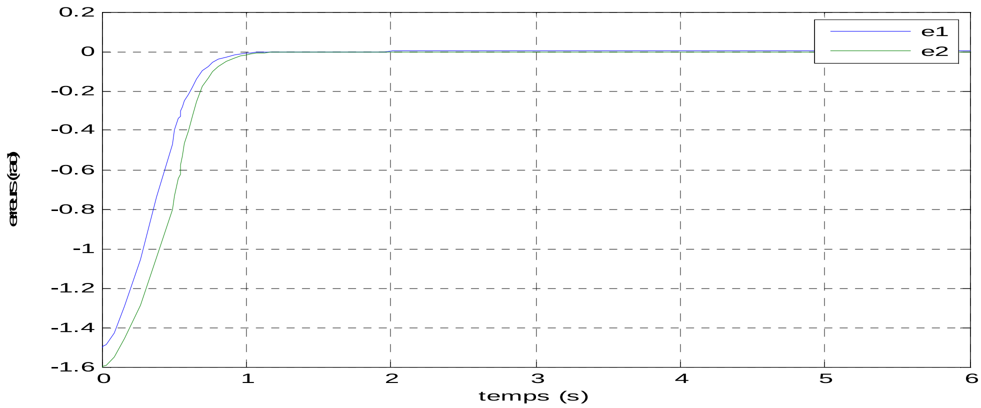


Figure IV.4.1.1.l: Allures des erreurs de position avec la commande par modes glissants (avec la fonction sat)

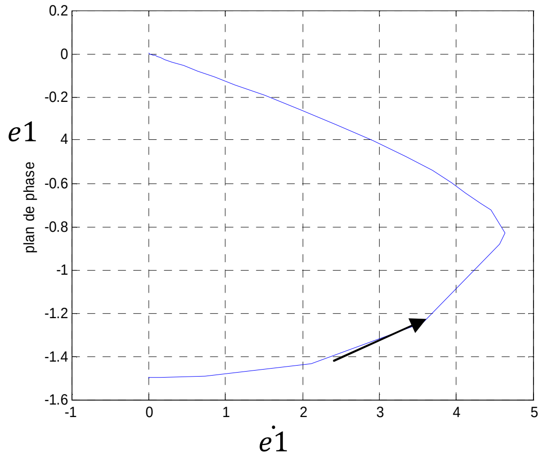


Figure IV.4.1.1.m: plan de phase 1 avec la commande par modes glissants (avec la fonction sat)

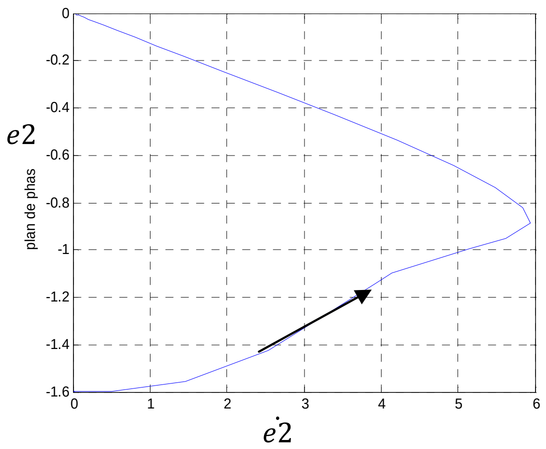


Figure IV.4.1.1.n : plan de phase 2 avec la commande par modes glissants (avec la fonction sat)

- **Interprétation des résultats**

A partir des figures **IV.4.1.1.h** et **IV.4.1.1.i** nous constatons que la fonction saturation a éliminé le phénomène de réticence sans pour autant modifier les performances du système.

IV.4.1.2 Résultats des simulations en mode poursuite de trajectoire

Dans ce passage, nous présenterons les résultats de simulation de notre système, en mode poursuite de trajectoire, commandé par les modes glissants.

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

Avec : $\lambda = 13, K1 = 34, K2 = 8$

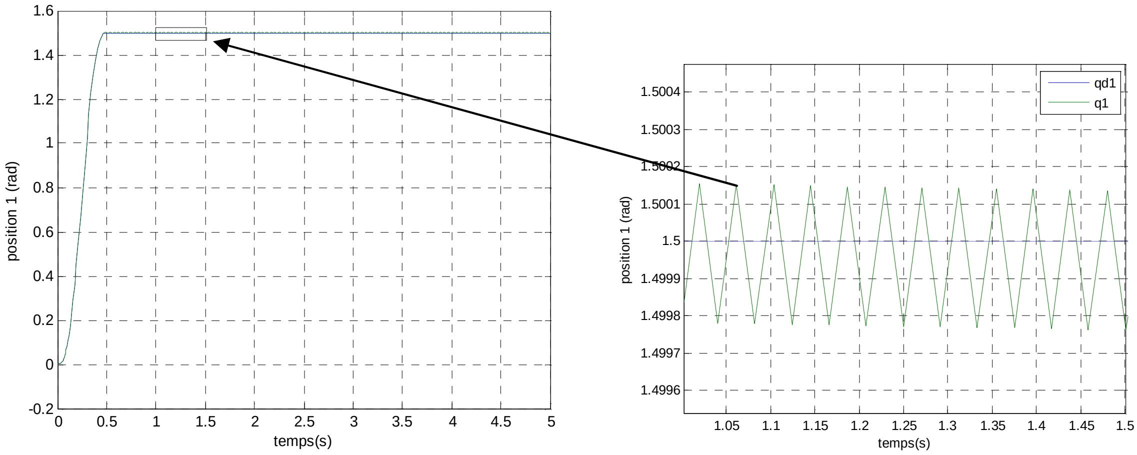


Figure IV.4.1.2.a : allure de la position angulaire 1 et illustration du phénomène de Chattering avec la commande par modes glissants

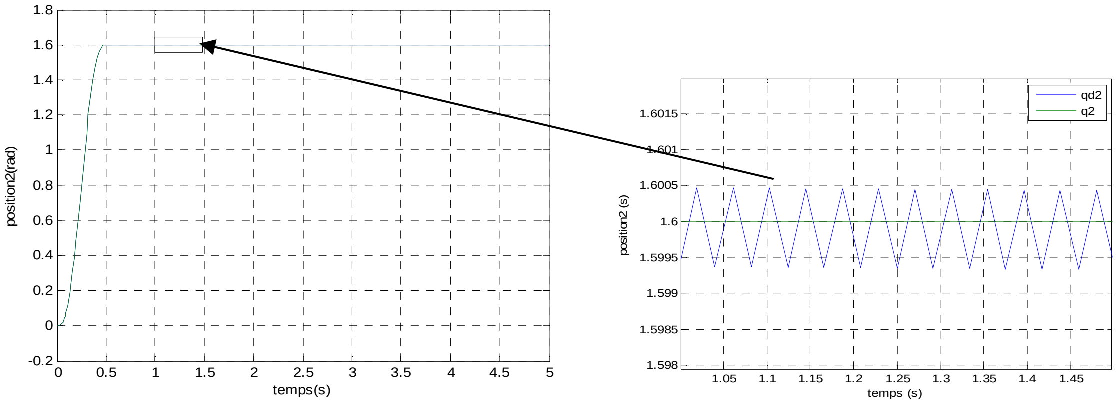


Figure IV.4.1.2.b: allure de la position angulaire 2 et illustration du phénomène de Chattering avec la commande par modes glissants

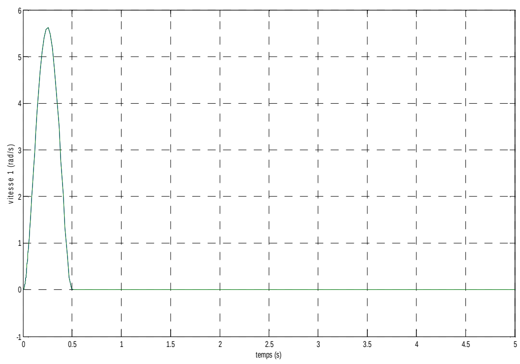


Figure IV.4.1.2.c : allure de la vitesse 1 avec la commande par modes glissants

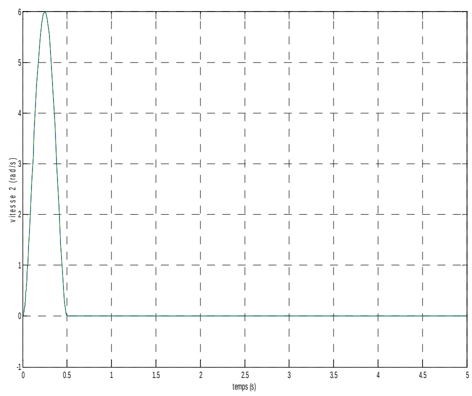


Figure IV.4.1.2.d : allure de la vitesse 2 avec la commande par modes glissants

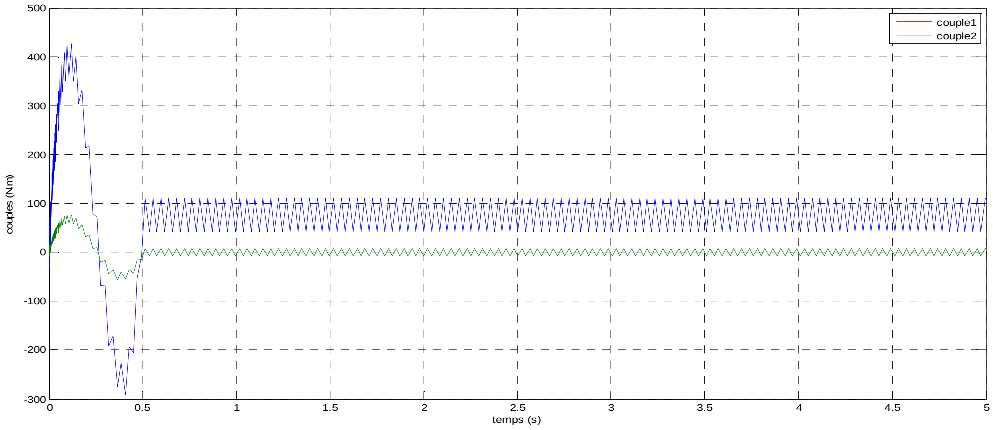


Figure IV.4.1.2.e : allures des couples de commande 1 et 2 avec la commande par modes glissants

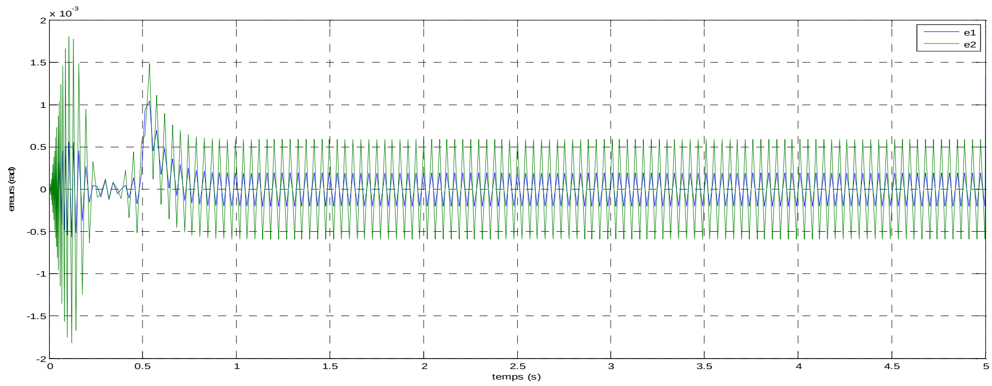


Figure IV.4.1.2.f : allures des erreurs de la position angulaire 1 et 2 avec la commande par modes glissants

- **Interprétation des résultats de simulation**

Nous remarquons, d'après les figues **IV.4.1.2.a**, **IV.4.1.2.b**, **IV.4.1.2.c** et **IV.4.1.2.d**, que les deux articulations 1 et 2 poursuivent les trajectoires désirées en position et en vitesse angulaire mais avec apparition claire du phénomène de Chattering. La figure **IV.4.1.2.e** montre que les couples maximum qu'il faut appliquer sont de l'ordre de 420 N.m et de 85 N.m pour l'articulation 1 et 2 respectivement. Les erreurs de position des deux articulations, illustrées par la figure **IV.4.1.2.f**, oscillent autour de zéro.

- Pour remédier au phénomène de Chattering, nous avons remplacé la fonction signe de la commande discontinue par la fonction saturation. Les résultats de simulation sont illustrés par les figures suivantes :

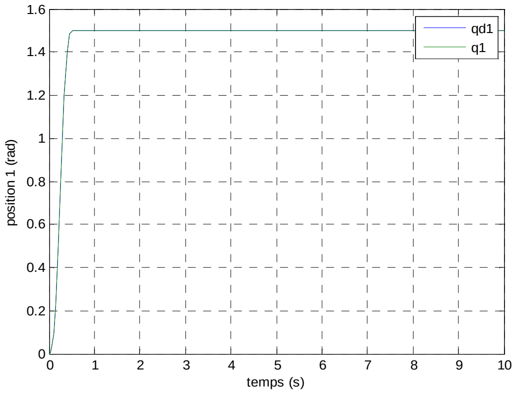


Figure IV.4.1.2.g : allure de la position 1 avec la commande par MG en remplaçant la fonction signe par la fonction saturation

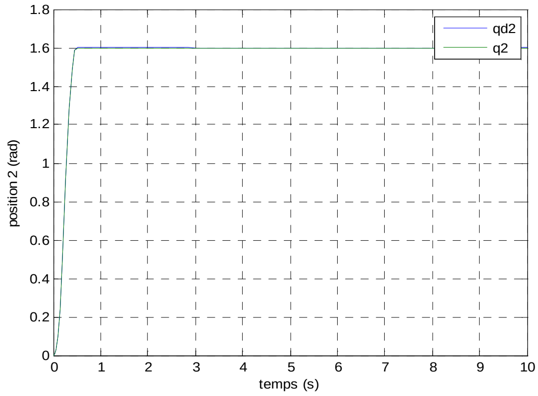


Figure IV. .4.1.2.h : allure de la position 2 avec la commande par MG en remplaçant la fonction signe par la fonction saturation

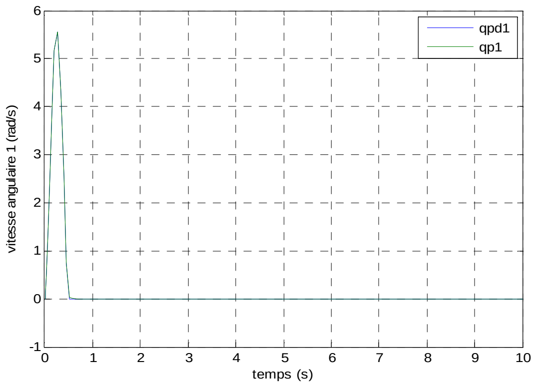


Figure IV .4.1.2.i : allure de la vitesse 1 avec la commande par MG en remplaçant la fonction signe par la fonction saturation

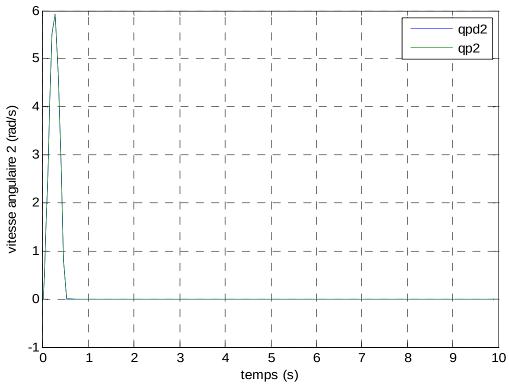


Figure IV. 4.1.2.j : allure de la vitesse 2 avec la commande par MG en remplaçant la fonction signe par la fonction saturation

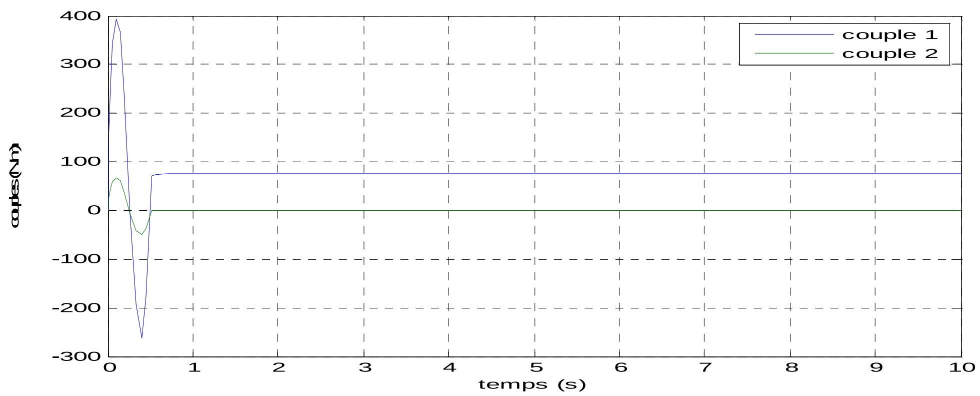


Figure IV.4.1.2.k: allures des couples de commande 1 et 2 avec la commande par MG en remplaçant la fonction signe par la fonction saturation

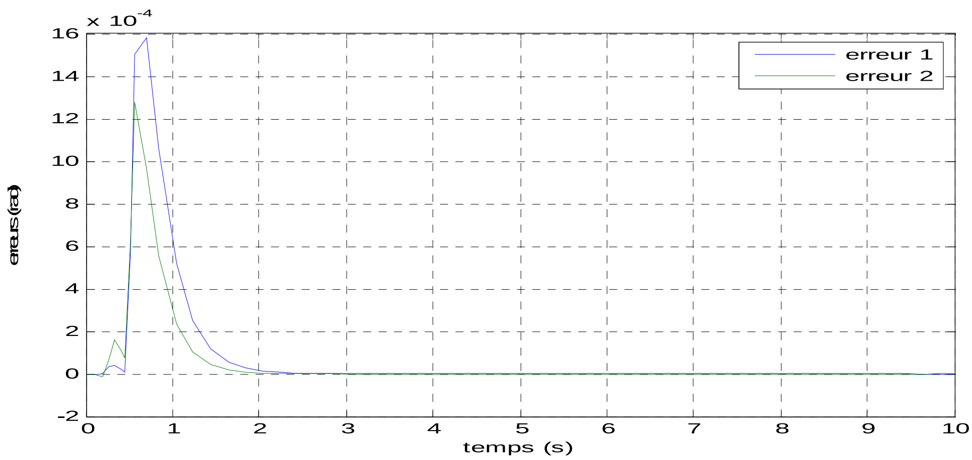


Figure IV.4.1.2.l : allures des erreurs de position 1 et 2 avec la commande par MG en remplaçant la fonction signe par la fonction saturation

➢ Interprétation des résultats de simulation

Nous remarquons, d'après les figues **IV.4.1.2.g**, **IV.4.1.2.h**, **IV.4.1.2.i** et **IV.4.1.2.j**, que d'une part les deux articulations 1 et 2 poursuivent les trajectoires désirées en position et en vitesse angulaire et d'autre part l'élimination du phénomène de Chattering. La figure **IV.4.1.2.k** montre que les couples maximum qu'il faut appliquer sont de l'ordre de 393 N.m et de 68 N.m pour l'articulation 1 et 2 respectivement. Les erreurs de position des deux articulations, illustrées par la figure **IV.4.1.2.l**, convergent vers des valeurs proches de zéro (de l'ordre de 10^{-4} rad) après un pic qui est dû à un petit dépassement.

IV.4.2 Commande par modes glissants flous

- **Conception du régulateur flou**

Notre régulateur flou est de type Mamdani comportant deux entrées qui sont l'erreur de position (e) et sa dérivé (Δe), la variable de sortie du contrôleur est la commande discontinue du mode glissant.

- La **figure IV.4.2.1** montre le choix de la forme des fonctions d'appartenance pour deux entrées et une sortie, répartis sur l'univers de discours normalisé [-1,1] .

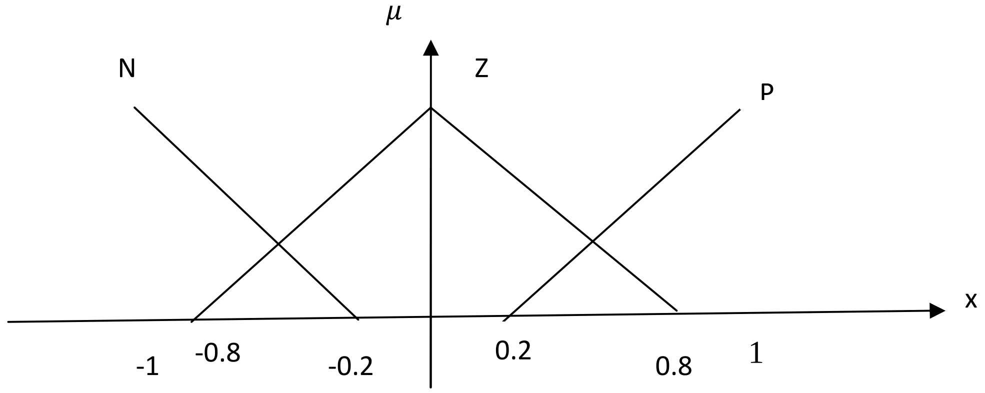


Figure [IV.4.2.1] fonctions d'appartenances

Avec :

N : Négatif

Z : Zéro

P : Positif

- les règles d'inférence :

la base des règles floues utilisée lors de la phase de raisonnement flou est résumée dans le tableau suivant :

Δe \ e	N	Z	P
N	N	N	P
Z	N	Z	P
P	N	P	P

Tableau IV.1 Base de règle du contrôleur flou

- pour le mécanisme d'inférence, nous avons opté pour l'inférence max-min.
- la méthode de défuzzification utilisée dans notre travail est la méthode du centre de gravité
- le choix des facteurs d'échelle résulte après différents essais de simulation afin d'avoir les meilleurs résultats.
- Le bloc de simulation est donné comme suit :

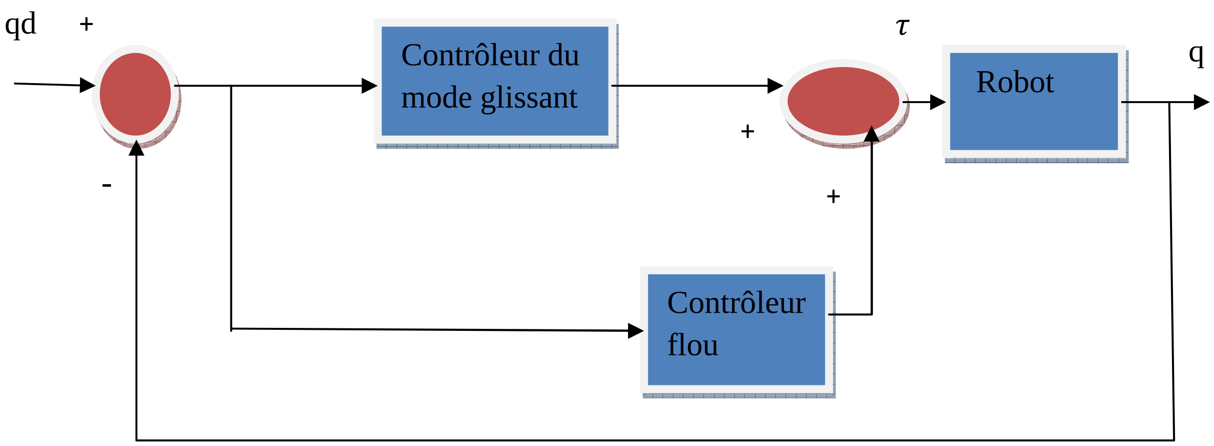


Figure [IV.4.2.2] Schéma bloc de la commande par mode glissant et logique floue

IV.4.2.1 Résultats des simulations en mode de régulation

Dans cette partie de notre travail, nous allons présenter les résultats de simulation après remplacement de la commande discontinue des modes glissants par un système flou.

Les gains de normalisation (ou facteurs d'échelle) sont donnés comme suit :

Ke1= 1.2, kep1= 0.215, ks1=832

Ke2=1.12, kep2=0.183, ks2=144

$\boldsymbol{\lambda}$=8.5

Où :

Ke1 et Ke2 : gains de l'erreur.

Kep1 et Kep2 : gains de la dérivée de l'erreur.

Ks1 et Ks2 : gains de la commande.

λ : est une constante positive (la pente de la surface de glissement).

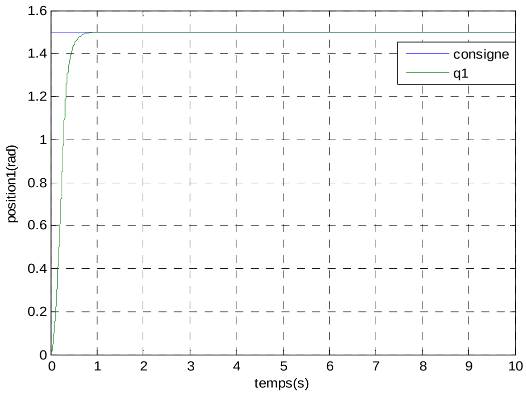


Figure IV.4.2.1.a : allure de position 1 avec la commande par modes glissants flous

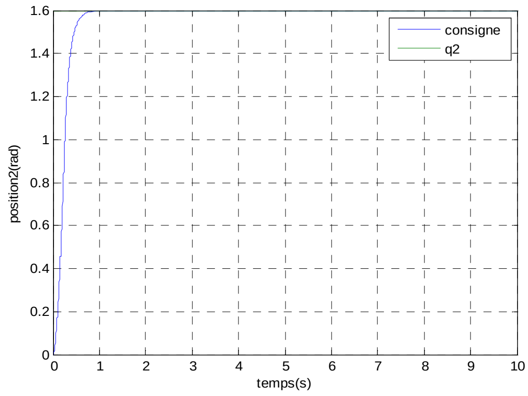


Figure IV.4.2.1.b : allure de position 2 avec la commande par modes glissants flous

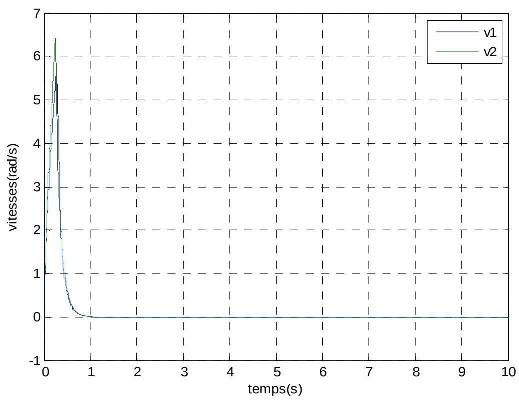


Figure IV.4.2.1.c : allures de vitesses avec la commande par modes glissants flous

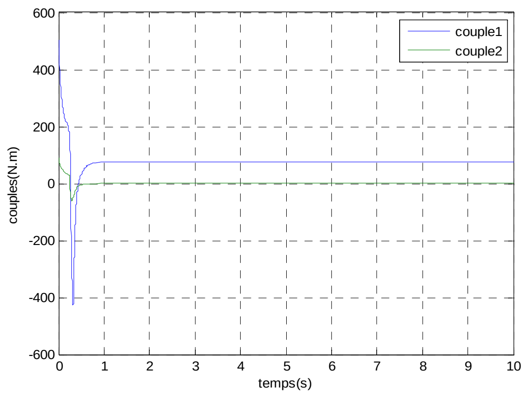


Figure IV.4.2.1.d : allures des couples avec la commande par modes glissants flous

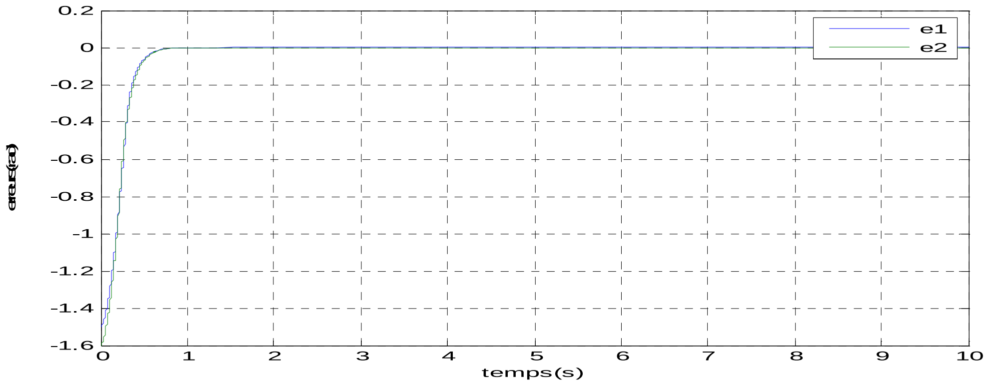


Figure IV.4.2.1.e : allures des erreurs avec la commande par modes glissants flous

- **Interprétation des résultats**

D'après les figures **IV.4.2.1.a** et **IV.4.2.1.b,** nous constatons que, non seulement le phénomène de Chattering est éliminé mais aussi les deux articulations atteignent les valeurs désirées 1.5 rad et 1.6 rad avec des temps de réponse de 0.44s et de 0.46s respectivement.

La figure **IV.4.2.1.e** montre que les erreurs de positions convergentes vers zéro

- **Test de robustesse**
- **Introduction d' incertitudes parametriques C0 et M0 :**

Dans ce passage, nous allons introduire aux deux matrices d'inertie et de coriolis des incertitudes paramétriques M0 et C0 .Les figures suivantes représentent les résultats de simulation **:**

Avec

$C0=\begin{bmatrix} 0.04 & 0.03 \\ 0.02 & 0.01 \end{bmatrix}$ et $M0=\begin{bmatrix} 0.07 & 0.03 \\ 0.02 & 0.04 \end{bmatrix}$

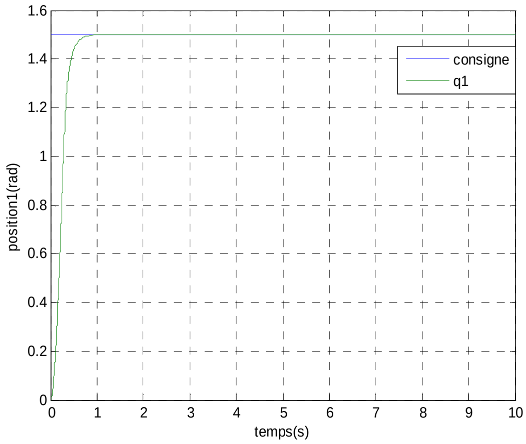


Figure A.1 : allure de la position 1 avec incertitudes

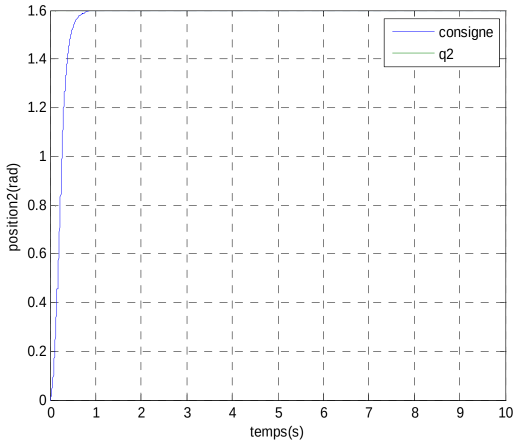


figure A.2 : allure de la position 2 avec incertitudes

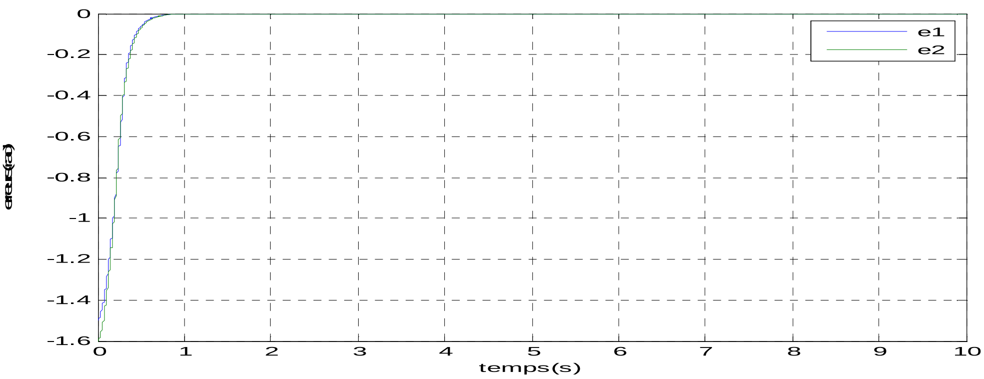


Figure A.3 : allure des erreurs de position avec incertitudes

- **Interprétation des résultats :**

D'après les figures précédentes, nous constatons que le comportement du système est insensible aux incertitudes paramétriques.

- **Introduction de perturbations** :

Les perturbations que nous avons introduit dans le modele sont sous forme d'un vecteur. p=[0.004 ;0.008]

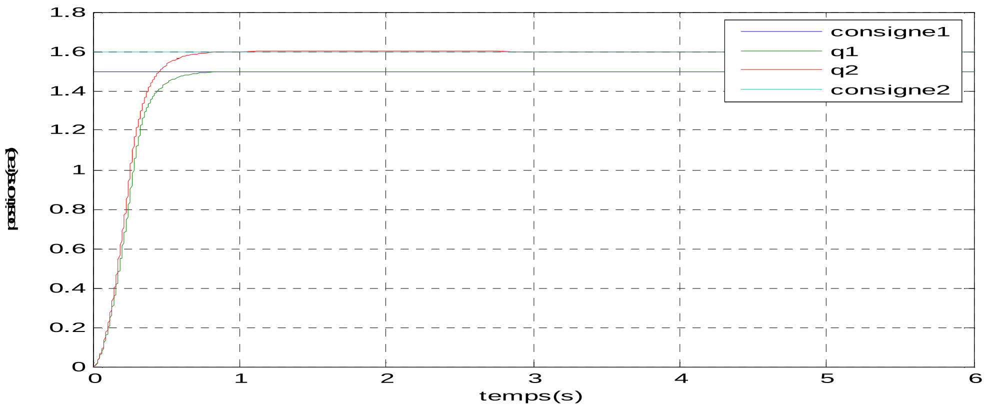


Figure A.4 : allures de la position 1 et de la position 2 avec perturbations

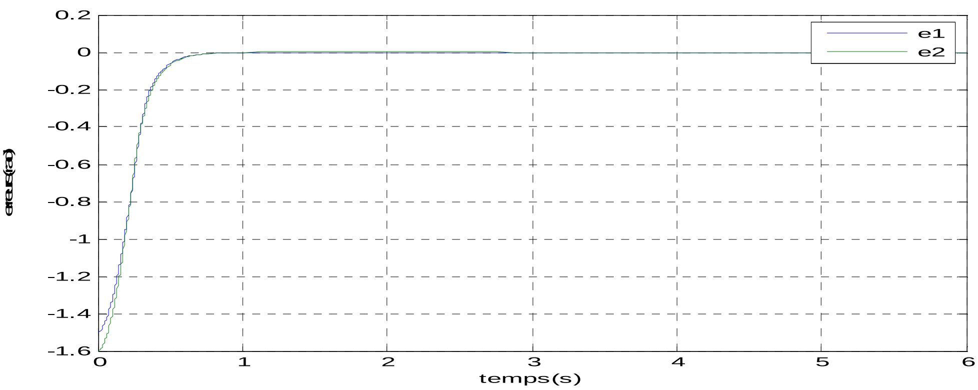


Figure A.5: allures des erreurs de positions avec perturbations

- **Interprétation des résultats**

Nous constatons, d'après les figures **A.4** et **A.5,** que articulations atteignent les valeurs désirées sans retard ni dépassement, alors le comportement du système insensible aux perturbations.

IV.4.2.2 Résultats des simulations en mode poursuite de trajectoire

Dans ce passage, nous allons présenter les résultats de simulation de notre système commandé par le contrôleur conçu en remplacement la fonction discontinue des modes glissants par un système flou (fuzzy system).les facteurs d'échelle sont choisis comme suit :

Ke1= 1.17, kep1= 0.218, ks1=187

Ke2=1.117, kep2=0.127, ks2=74.5 **λ**=8.5

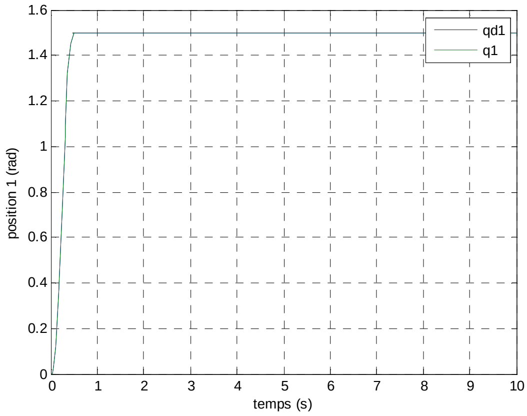


Figure IV.4.2.2.a : allure de la position 1 avec la commande par mode glissant flou

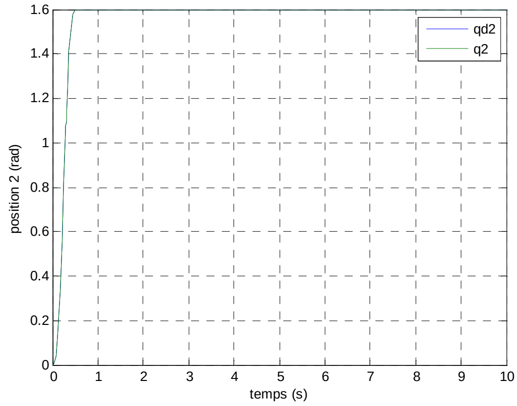


Figure IV .4.2.2.b : allure de la position 2 avec la commande par mode glissant flou

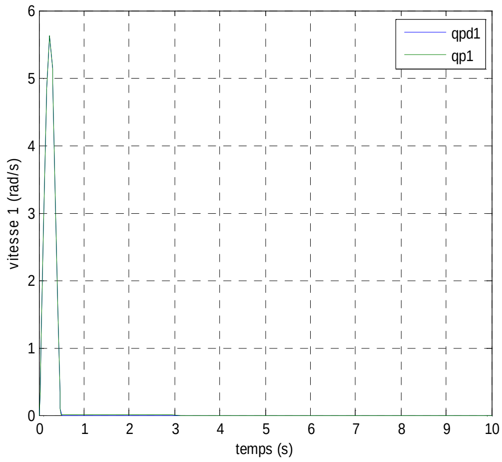


Figure IV.4.2.2.c : allure de la vitesse 1 avec la commande par mode glissant flou

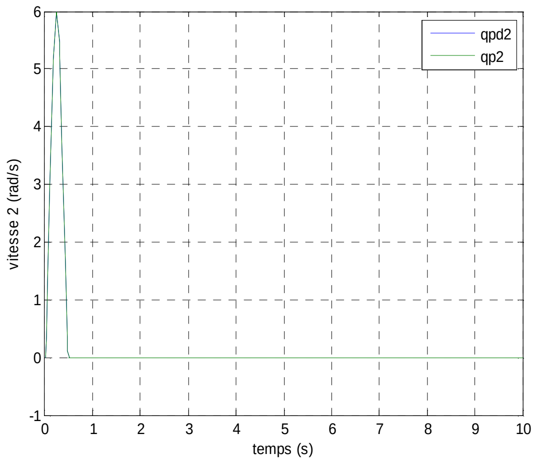


Figure IV.4.2.2.d : allure de la vitesse 2 avec la commande par mode glissant flou

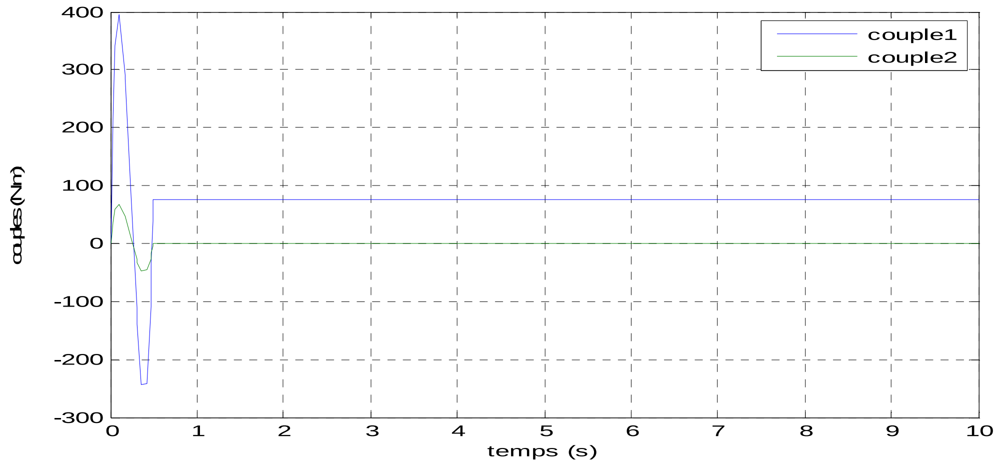


Figure IV.4.2.2.e : allures des couples de commande 1 et 2 avec la commande par mode glissant flou

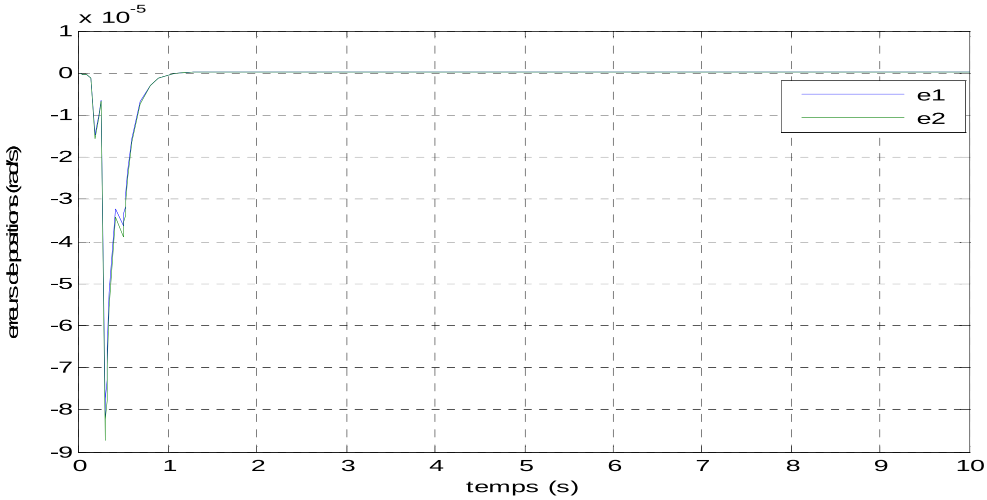


Figure IV.4.2.2.f : allures des erreurs de position 1 et 2 avec la commande par mode glissant flou

- **Interprétation des résultats de simulation**

Nous constatons, après implantation du système flou, que les erreurs de position des deux articulations, illustrées par la figure **IV.4.2.2.f**, convergent vers zéro

❖ **Test de robustesse**

✓ **Introduction de perturbations**

Les perturbations que nous avons introduit dans le modèle sont sous forme d'un vecteur. p=[0.01 ;0.003]

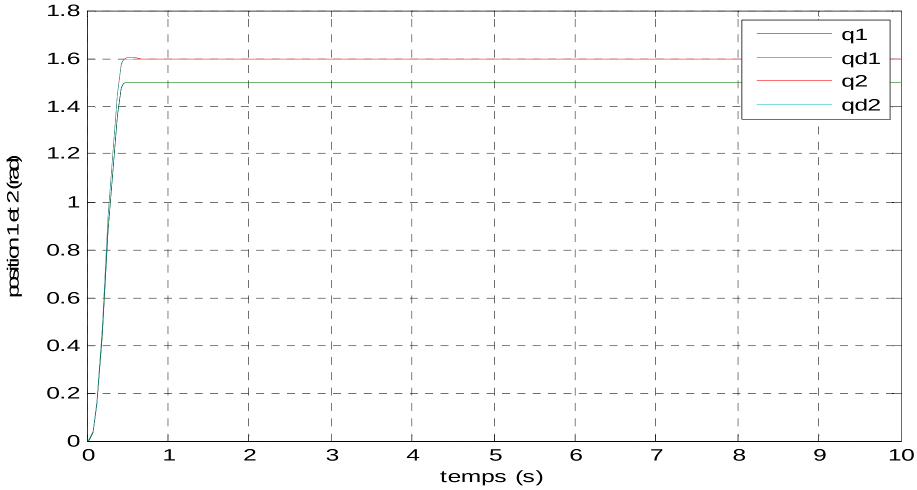


Figure B.1 : allure des positions 1 et 2 avec perturbations

✓ **Introduction des incertitudes paramétriques**

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 representé par la figure suivante :

Avec :

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

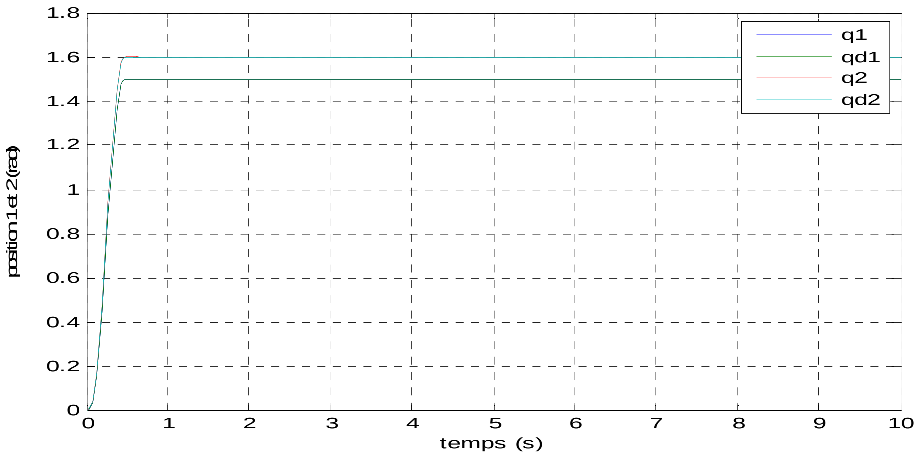


Figure B.2 : allure des positions 1 et 2 avec incertitudes

- **Interprétation des résultats de simulation :**

D'après les figures **B.1** et **B.2**, nous constatons que notre comportement du système est insensible aux perturbations et aux incertitudes paramétriques pour les valeurs données.

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons, d'abord, mis en évidence les lois de commande classique appliquées au bras manipulateur. Après simulation, nous avons remarqué que les résultats sont in suffisant.

Ensuite, nous avons conçu une commande par modes glissants où nous avons constaté l'apparition du phénomène de Chattering. Pour remédier à ce phénomène, nous avons remplacé la fonction de signe de la commande discontinue des modes glissants par une fonction saturation.

Enfin, nous avons proposé de remplacer la commande discontinue par un contrôleur flou. Les résultats de simulation s'avèrent très satisfaisants. Les améliorations apportées sont essentiellement l'élimination du phénomène de broutement et l'amélioration du temps de réponse en mode régulation, ainsi la commande montre une bonne poursuite du système aux trajectoires désirées.

Conclusion générale et perspectives

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

Les commandes classiques des robots manipulateurs sont d'une importance non négligeable. En effet, nous avons, dans un premier temps, mis en évidence la loi de commande point à point pour but de régulation et la loi de commande de couple calculé pour but de poursuite de trajectoire. Après simulation, nous constatons que ces deux lois présentent des insuffisances: temps de réponse élevé, délicatesse du choix de Kp et Kv.

Ensuite, nous avons conçu une commande par modes glissants qui nous à permis d'améliorer les performances de notre système mais avec apparition du phénomène de Chattering par conséquent des fluctuations des couples de commande. Pour éliminer ce dernier, nous avons remplacé la fonction signe par une fonction douce (saturation) que nous constatons après simulation sans pour autant améliorer les performances de notre système.

Enfin, nous avons remplacé la commande discontinue des modes glissants par un système flou (fuzzy system). Après simulation, nous remarquons que, non seulement le Chattering est éliminé mais aussi les performances du système sont nettement améliorées. Des tests de robustesse nous ont confirmé que le système est insensible aux perturbations et aux incertitudes paramétriques.

Les perspectives que nous pouvons envisager sont :

- Application de la commande par modes glissants flous à d'autres types de systèmes.
- La commande floue adaptative.
- Les algorithmes génétiques pour calculer les facteurs d'échelle.
- Remplacement de la commande équivalente par un système flou.
- Réalisation expérimentale.

Références bibliographique

[1] DJELOUAH HAKIM, vibrations et ondes mécanique, cours et exercices 2011-2012

[2] ETIENNE DOMBRE, WISSAMA KHALIL. Modélisation et commande des robots 1^{ere} édition HERMES SCIENCE PUBLICATION PARIS, 1988

[3] EMELYANOV. LEVANTOVSKY. Drift algorithm in control of uncertain processes.1986

[4] EMELYANOV. Variable structure control systems. Moscow Nauka. 1967

[5] FILIPOV, Differential equations with discontinuous right-hand side. Amer. Math, soc trans. 1960

[6] GANGLOFF. Cours de robotique ENSPS photonique, image.2002

[7] REIGNIER, "Pilotage réactif d'un robot mobile étude du lien entre la perception et l'action", Thèse Doctorat, Institut National polytechnique de Grenoble, France, 1994

[8] SCHNEIDER, la logique floue, cahier technique n°191.1998

[9] SIRA-RAMIREZ. Differential geometric methods in variable structure control.Int.J of control. 1988.

[10] SLOTINE applied no linear control, practice hall USA 1988

[11] UTKIN. Sliding mode and their application in variable structure. MOUSCOU, 1978

[12] WISSAMA KHALIL, ETIENNE DOMBRE, Modélisation identification et commande des robots 2^{eme} édition Hermès science publication PARIS, 1988