

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

Université Mouloud MAMMERRI de Tizi-Ouzou



Faculté de Génie électrique et D'informatique
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

**Mémoire de Fin d'Etudes
de MASTER ACADEMIQUE**
Spécialité : **Commande des systèmes**

Présenté par
Nassim BELBRAHEM
Zhor CHAOUI

Mémoire dirigé par M^f Said DJENNOUNE
Co-direction: M^f Amar REZOUG

Thème

**Etude de deux commandes robustes à
modes glissants et à retard (TDC) :
application à la commande d'un bras
manipulateur**

Mémoire soutenu publiquement le 03 juillet 2014 devant le jury composé de:

M Prénom NOM
MELLAH Rabah

M Prénom NOM
SI AMMOUR Amar

M Prénom NOM
HAMACHE Amar

Remerciements

« On remercie Dieu, le tout Puissant, qui nous a donné l'opportunité de mener à bien ce travail. »

Au terme de ce travail, on voudrait adresser nos sincères remerciements à tous ceux qui de près ou de loin, ont participé à l'élaboration de ce mémoire.

Notamment :

A notre promoteur Monsieur, S.DJENNOUNE, nous avons eu le plaisir de travailler avec lui et d'apprécier ses qualités et ces valeurs, son sérieux, sa compétence, et son sens du devoir nous ont énormément marqués, on lui transmet par le biais de ce mémoire l'expression de notre respectueuse considération et notre profonde admiration pour toutes ses qualités scientifiques et humaines.

A Monsieur, A.HAMACHE, qui a toujours réservé le meilleur accueil, malgré ses obligations professionnelles, nous saisissons cette occasion pour lui exprimer notre profonde gratitude tout en lui témoignant notre respect.

A Monsieur, A. REZOUG, de nous avoir accueillis au sein de centre de recherche CDTA, pour l'aide qu'il nous a apportée.

A Monsieur R.MELLAH, on le remercie pour son estimable participation dans l'élaboration de ce travail, à travers ce travail on lui accorde l'expression de notre estime et notre considération.

Nos remerciements vont également aux membres de jury qui nous ont honorés par leurs présences.

Nos remerciements à tous les enseignants du département Automatique à l'UMMTO.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- ✓ A la mémoire de mon père que dieu l'accueille dans son vaste paradis
- ✓ A l'être qui la plus chère au monde ; ma mère qui m'a tant donné.
- ✓ à Mon cher frère et mes deux sœurs
- ✓ A ma très chère fiancée qui ne m'a jamais oublié et m'a toujours encouragé.
- ✓ A ma binôme Zhor et toute sa famille.
- ✓ A tous mes proches et mes amis.
- ✓ Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce Projet soit possible, je vous dis merci.

B.Nassim

Dédicaces

A mon très cher père, aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, L'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour lui. Rien au monde ne vaut les efforts fournis pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de ses sacrifices qui a Consentis pour mon éducation et ma formation.

A ma très chère mère, Affable, honorable, aimable, elle représente pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi, je lui dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu le tout puissant, la préserve et lui accorde santé, langue vie et bonheur.

A mes chers frères Farid, Samir et Amirouche, présents dans tous mes moments difficiles par leurs soutiens moraux et leurs perpétuelles présences je leurs souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité, je leurs exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternités et d'amour.

A ma très chère tante GHENIMA que je considère comme une sœur inexistante, en témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour elle , je la remercie pour son hospitalité sans égal et son affection si sincère, je lui dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

A ma tante Ouardia, et ma grand-mère AINI , les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour elles , mes fidèles compagnons dans les moments les plus délicats de cette vie mystérieuse, je leurs dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, et de santé.

A mon binôme Nassim et toute sa famille.

A tous mes amis

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce Projet soit possible, je vous dis merci.

C.Zhor

Sommaire

Sommaire

| | |
|-----------------------------------|----------|
| Introduction générale..... | 1 |
|-----------------------------------|----------|

Chapitre1 : Modélisation et commande d'un bras manipulateur

| | |
|--|----|
| 1. Introduction..... | 3 |
| 2. Quelques notions de base sur la robotique..... | 3 |
| 2.1. Définition générale d'un robot..... | 3 |
| 2.2. Constituants d'un robot..... | 4 |
| 2.3. Degrés de libertés | 5 |
| 2.4. Articulations | 5 |
| 2.5. Coordonnées homogènes..... | 6 |
| 2.6. Transformations homogènes..... | 7 |
| 3. Différents modèles du robot..... | 11 |
| 3.1. Modèle géométrique..... | 11 |
| 3.2. Modèle cinématique..... | 13 |
| 3.3. Modèle dynamique..... | 14 |
| 3.3.1. Formalisme de Lagrange..... | 15 |
| 3.3.2. Modélisation dynamique d'un bras manipulateur à 2ddl..... | 16 |
| 4. Conclusion..... | 19 |

Chapitre2 : Commande par mode de glissement

| | |
|--|----|
| 1. Introduction..... | 20 |
| 2. Théorie de la commande par mode de glissement | 20 |
| 3. Conception de la commande par mode de glissement..... | 21 |
| 3.1. Choix de la surface de glissement | 22 |
| 3.2. Condition de convergence et d'existence..... | 23 |
| 3.3. Calcul de la commande..... | 25 |
| 4. Le phénomène de chattering..... | 27 |
| 5. Avantages et inconvénients de la commande par mode de glissement d'un bras manipulateur..... | 27 |
| 6. Conclusion..... | 28 |

Chapitre3 : Commande à retard (TDC)

| | |
|--|----|
| 1. Introduction..... | 29 |
| 2. Loi de commande TDC en utilisant une convolution..... | 30 |
| 2.1. Loi de commande..... | 30 |
| 2.2.Estimation de la dynamique inconnue en utilisant la convolution..... | 32 |
| 3. Avantages et inconvénients de la commande TDC d'un bras manipulateur..... | 34 |
| 4. Conclusion..... | 34 |

Chapitre4 : Résultat de simulation

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 35 |
| 2. Modèle dynamique du bras manipulateur | 35 |
| 2.1. Modèle..... | 35 |
| 2.2.Objectif de la commande | 37 |
| 3. commande par modes glissant..... | 37 |
| 3.1.synthèse de la loi de commande | 37 |
| 3.2.Résultats de simulations..... | 39 |
| 3.2.1. résultats de simulations sans erreurs paramétriques..... | 39 |
| 3.2.2. Test de robustes..... | 44 |
| a. variations paramétrique | 44 |
| b. présence des signaux perturbateurs | 46 |
| 3.3.Interprétations des résultats de simulations | 49 |
| 4. Commande TDC | 49 |
| 4.1. Synthèse de la loi de commande | 49 |
| 4.2.Résultats de simulations..... | 50 |
| 4.2.1. Résultats de simulations sans erreurs paramétrique..... | 50 |
| 4.2.2. Test de robustesse (présence des signaux perturbateurs)..... | 53 |
| 4.3. Interprétation des résultats..... | 55 |

5. Conclusion.....56

Conclusion générale.....57

Références bibliographiques

Introduction générale

Introduction générale :

A travers l'histoire de l'humanité, l'innovation vient souvent de la nécessité de l'homme à améliorer ses conditions de vie. Par exemple créer des machines intelligentes capables d'effectuer des tâches à sa place. Ainsi, les humains auraient plus de possibilité de consacrer leur temps pour leurs loisirs, ou prendraient moins de risques pour effectuer des tâches dangereuses. Or créer une machine pouvant réaliser des tâches que seuls les humains sont normalement capables de faire n'est pas aussi simple qu'on pourrait le penser. En effet, sans toujours y penser, les tâches les plus élémentaires de la vie quotidienne d'un humain peuvent devenir extrêmement complexes lorsqu'on les analyse de plus près. En dépit de cette complexité, on a pu monter une machine qui permet de réaliser de manière automatique des tâches complexes, cette machine automatique est le robot. De ce fait, le robot permet à l'homme une grande facilité de manipuler ces tâches qui lui sont pénibles, des fois impossible d'y accéder par exemple mesurer la température au sein d'un réacteur, ou effectuer une intervention chirurgicale, etc.....

Comme pour tous autres systèmes, pour l'élaboration d'une commande d'un bras manipulateur, il faut a priori avoir son modèle mathématique, plusieurs niveaux de modélisation sont possibles selon les objectifs à atteindre et les contraintes de tâche et performances recherchées à savoir les modèles : géométrique, cinématique et dynamique.

Pour qu'un robot accomplisse la tâche qu'on lui assigne, il faut concevoir une commande bien adaptée. La commande choisie doit être capable de surmonter les variations paramétriques et les perturbations engendrées par la forte dynamique du robot. C'est dans ce cadre que nous allons aborder la problématique de notre projet de fin d'étude en introduisant la notion de la commande par mode glissant et la commande à retard TDC (time delay control).

La commande par mode glissant est une technique de commande non linéaire. Elle est caractérisée par sa robustesse vis-à-vis des incertitudes paramétriques du modèle, et certaines perturbations extérieures.

La commande TDC introduite dans les années 90 est aussi une technique de commande non linéaire robuste. Le principe de la commande à retard repose sur la possibilité d'estimer les incertitudes présents dans le système par des informations passées et mesurées. L'estimation des incertitudes utilise la convolution. Cette estimation est ensuite exploitée par la commande afin d'imposer au système de suivre un modèle de référence.

L'objectif de notre travail est d'étudier et de comparer les deux techniques de commande. Cette étude et cette comparaison sont effectuées sur un exemple d'application qui est celui de la commande d'un bras manipulateur.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres qui se résument comme suit :

Le premier chapitre aura pour objectif de donner une initiation générale et quelques définitions de base relatives à la robotique et aussi il est consacré à la modélisation du manipulateur en donnant d'une manière explicite les modèles : géométrique, cinématique et dynamique.

Le deuxième chapitre sera dédié à la présentation de la théorie de la commande par mode de glissement d'ordre un.

Le troisième chapitre sera dédié à la présentation de la théorie de la commande TDC.

Le quatrième et dernier chapitre est consacré sur les résultats de simulation des deux commandes, pour finir avec une comparaison.

Le mémoire se termine par une conclusion générale sur le travail réalisé avec quelques perspectives.

Chapitre 1

Modélisation et commande d'un bras manipulateur

1. Introduction :

Depuis quelques décennies, la recherche dans la robotique s'est concentrée presque entièrement sur la commande des robots manipulateurs, sur la synthèse d'une commande.

Pour 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 sont :

- Les modèles géométriques directs et inverses qui expriment les positions de l'organe terminal en fonction des variables articulaires et inversement
- Les modèles cinématiques directs et inverses qui expriment 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, vitesse, accélérations des articulations. [1]

L'obtention de ces différents modèles n'est pas aisée. La difficulté varie selon la complexité de la cinématique de la chaîne articulée. Entrent en ligne de compte, le nombre de degrés de liberté, le type des articulations mais aussi le fait que la chaîne peut être ouverte simple, arborescente ou fermée.

2. Quelques notions de base sur la robotique :

2.1. Définition générale d'un robot :

C'est un appareil automatique capable de manipuler des objets, ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe ou modifiable. En fait l'image que chacun s'en fait est généralement vague, souvent un robot est défini comme un manipulateur automatique à cycle programmable. Un robot est un système mécanique poly-articulé muni par des actionneurs et commandé par un calculateur qui est destiné à effectuer une grande variété de tâches.

Il existe une panoplie de robots selon la structure, entre autres : la chaîne ouverte simple, la chaîne fermée, la structure arborescente et la structure parallèle.

La figure ci-après illustre deux exemples des robots industriels [2] :



(a): robot EPSON. (b): robot SAMSUNG.

Figure 1.1 : robots industriels de type SCARA.

2.2. Constituants d'un robot :

Les robots manipulateurs se présentent en général sous forme de structure mécanique poly-articulée, se terminant par un organe terminal, comme le montre la figure suivante [3] :

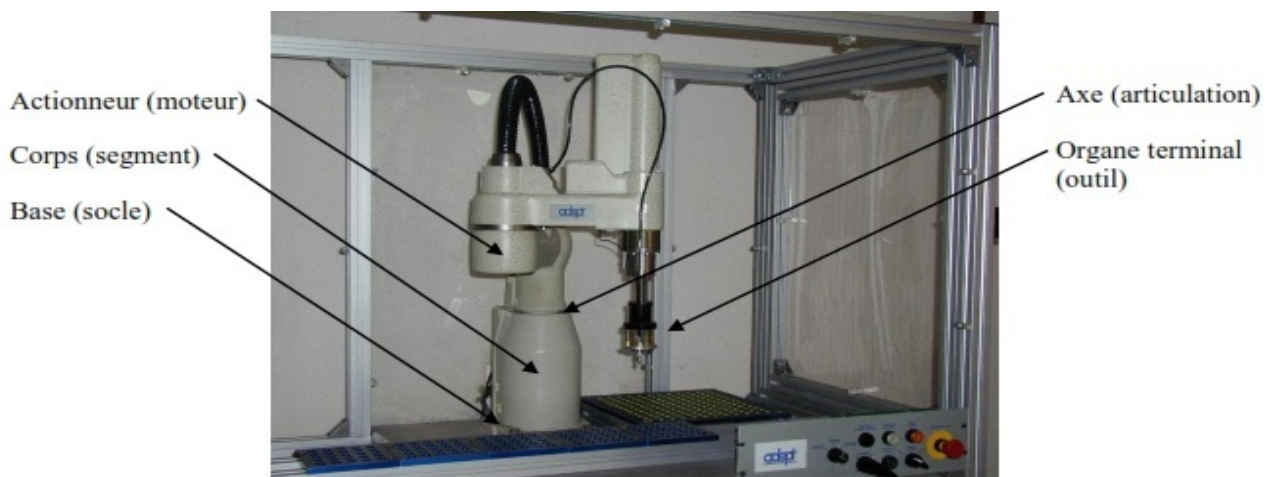


Figure 1.2 : Exemple d'image réel d'un robot manipulateur du type SCARA.

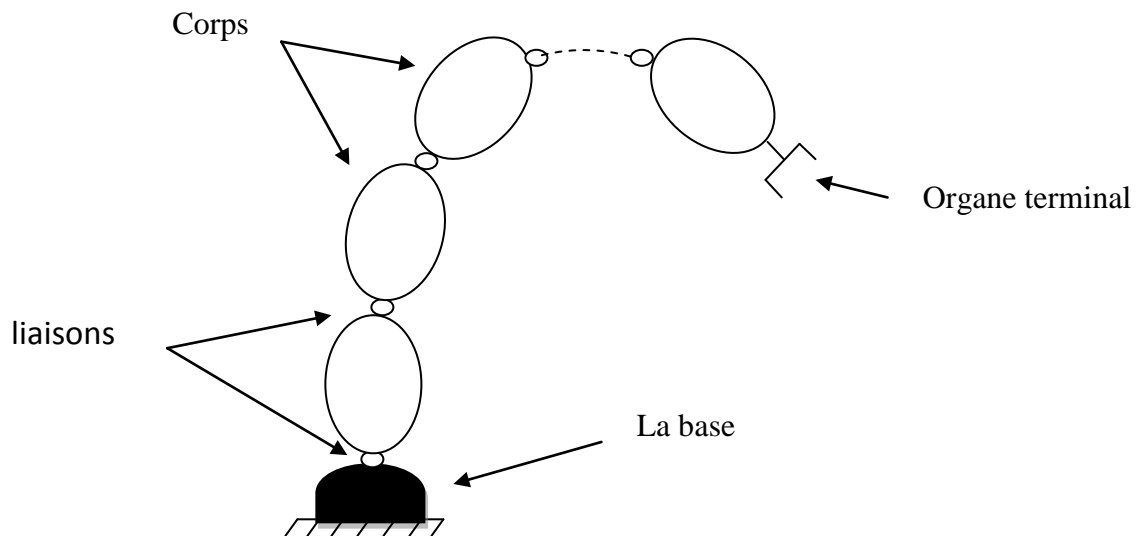


Figure 1.3 : morphologie générale d'un bras manipulateur.

2.3. Degré de liberté (d.d.l) :

On appelle degré de liberté dans une liaison, le nombre de mouvement relatif indépendant d'un solide par rapport à l'autre autorisé par cette liaison.

2.4. Articulation :

Une articulation lie deux corps successifs en limitant le nombre de degré de liberté de l'un par rapport à l'autre, [4].

- **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 (voir la figure suivante qui présente des différentes zones de vue) :



Figure 1.4 : Représentation d'une articulation rotoïde.

- **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 (voir la figure suivante qui présente des différentes zones de vue) :



Figure 1.5 : Représentation d'une articulation prismatique.

2.5. Coordonnées homogènes :

- **Représentation d'un point :**

Soit P un point de coordonnées cartésiennes P_x, P_y, P_z . On appelle coordonnées homogènes du point P les termes $w.P_x, w.P_y, w.P_z$ et w où w est un facteur d'échelle, égal à 1 en robotique. On représente alors les coordonnées homogènes d'un point par le vecteur :

$$P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix}$$

- **Représentation d'une direction :**

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

$$U = \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \\ 0 \end{bmatrix}$$

▪ **Représentation d'un plan :**

Le plan $\alpha x + \beta y + \gamma z + \delta = 0$ est représenté par un vecteur ligne Q :

$$Q = [\alpha \beta \gamma \delta] \quad (1.1)$$

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

$$QP = [\alpha \beta \gamma \delta] \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (1.2)$$

2.6. Transformation homogène :

▪ **Transformation des repères :**

Faisons subir une transformation quelconque, de translation et/ou de rotation, au repère R_i , transformation qui l'amène sur le repère R_j , Cette transformation est définie par la matrice ${}^i T_j$, appelée matrice de transformation homogène, de dimension (4×4) , telle que :

$${}^i T_j = \begin{bmatrix} s_x n_x a_x P_x & & & \\ s_y n_y a_y & P_y & & \\ s_z n_z a_z & P_z & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

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 , ${}^i P_j$ est le vecteur exprimant l'origine du repère R_j dans le repère R_i , [4].

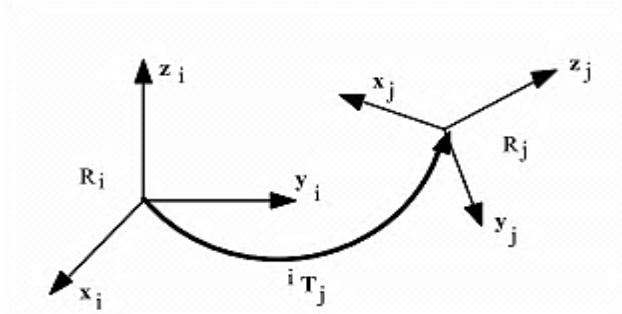


Figure 1.6 : Transformation des repères.

On dit également que la matrice ${}^i T_j$ définit le repère R_j dans le repère R_i . par la suite, on notera souvent la matrice de transformation (1.3) sous forme d'une matrice partitionnée :

$${}^i T_j = \begin{bmatrix} {}^i A_j & {}^i P_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^i s_j & {}^i n_j & {}^i a_j & {}^i P_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

Avec :

${}^i A_j$ est la matrice de rotation ou d'orientation du repère R_j par rapport à R_i .

${}^i P_j$ est le vecteur de translation représente la translation du repère R_j par rapport à R_i .

Remarque :

- Pour une transformation de translation, ${}^i A_j = I_3$ (I_3 représente la matrice unité d'ordre 3), tandis que pour une transformation de rotation ${}^i P_j = 0$.

- La matrice iA_j est orthogonale, c'est-à-dire que la matrice inverse est égale à la matrice transposée.

- **Transformation des vecteurs :**

Soit un vecteur jP_1 définissant le point P_1 dans le repère R_j , On calcule les coordonnées homogènes du point P_1 dans le repère R_i grâce à l'équation suivante :

$${}^iP_1 = {}^i s_j \quad {}^jP_{1x} + {}^i n_j \quad {}^jP_{1y} + {}^i a_j \quad {}^jP_{1z} + {}^i P_j = {}^iT_j \quad {}^jP_1 \quad (1.5)$$

La matrice iT_j permet donc d'exprimer dans le repère R_i les coordonnées d'un point dans le repère R_j .

- **Transformation des plans :**

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

$${}^jQ \quad {}^jP = {}^iQ \quad {}^iP = {}^iQ \quad {}^iT_j \quad {}^jP \quad (1.6)$$

Il s'ensuit que :

$${}^jQ = {}^iQ \quad {}^iT_j$$

- **Matrice de translation :**

Soit $\text{Trans}(a, b, c)$ une transformation qui désigne la translation a , b et c le long des axes x , y et z respectivement.

On note $\text{Trans}(x, a)$ la matrice de transformation homogène correspondant à une translation de a selon l'axe x .

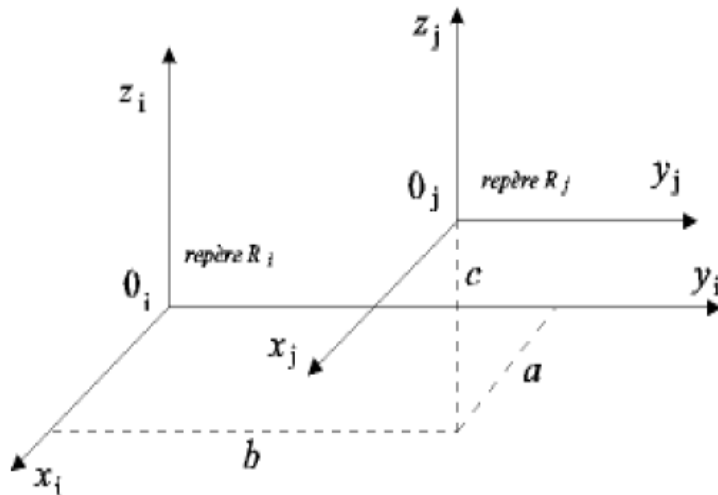


Figure 1.7: Transformation de translation.

La transformation dans ce cas s'exprime par :

$${}^i T_j = \text{Trans}(a, b, c) = \text{Trans}(x_i, a) \times \text{Trans}(y_i, b) \times \text{Trans}(z_i, c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

▪ **Matrice de rotation :**

Les trois matrices de rotation sont définies comme suit :[5]

On définit $\text{Rot}(x, \theta)$ la transformation homogène qui s'exprime par :

$${}^i T_j = \text{Rot}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta & -s\theta & 0 \\ 0 & s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

Rot (x, θ) désigne la rotation ou l'orientation de repère R_i d'un angle θ autour de l'axe x du repère R_j

De la même façon on définit la rotation autour de y par:

$${}^i T_j = \text{Rot}(y, \theta) = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Et la rotation autour de z par :

$${}^i T_j = \text{Rot}(z, \theta) = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

3. Différents modèles du robot :

Pour exécuter une tâche en un point donné de l'espace, le système articulaire combine ses performances matérielles et logicielles, pour que son organe terminal puisse prendre une succession de configuration (position, orientation, mouvement de l'outil) nécessaires à l'exécution de cette tâche.

A fin de contrôler et commander correctement les actionneurs, il est impératif de faire une bonne modélisation qui consiste à représenter le comportement de la structure mécanique articulé par des équations algébriques, soit du point de vue des positions, c'est le modèle géométrique, soit du point de vue des vitesses, c'est le modèle cinématique, soit en considérant les effort mis en jeux, c'est le modèle dynamique.

3.1. Modèle géométrique :

La modélisation géométrique permet d'exprimer la situation de l'organe terminal en fonction de la configuration du mécanisme et inversement[4]. On distingue deux modèles :

▪ Modèle géométrique direct (MGD) :

Le modèle géométrique direct (MGD) est l'ensemble des relations qui permettent d'exprimer la situation de l'organe terminal, c'est-à-dire les coordonnées opérationnelles du robot, en fonction de ses coordonnées articulaires.

Ce modèle peut se représenter par la relation :

$$X = F(q) \quad (1.11)$$

Où :

X est le vecteur des coordonnées opérationnelles de dimension P ,

q est le vecteur des positions articulaires de dimension n ,

F est une fonction vectorielle non linéaire,

Avec :

P est le nombre de variables géométriques,

n est le nombre de degrés de liberté du robot,

La modélisation des robots de façon systématique et automatique exige une méthode adéquate pour la description de leur morphologie. Plusieurs méthodes et notations ont été proposées (méthode de Denavit-Hartenberg, Khalil Oussama...)

Mais la plus répandue est celle de Denavit-Hartenberg[4].

Les étapes à suivre :

- 1- Placer les repères
- 2- Définir les variables articulaires et les paramètres géométriques
- 3- Définir les matrices de transformations homogènes
- 4- Multiplier ces matrices

Ses principaux avantages sont :

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

▪ Modèle géométrique inverse (MGI) :

Ce modèle permet le calcul des variables articulaires en fonction des variables géométriques (la position de l'effecteur imposée par la tâche).

Ce modèle peut se représenter par la relation :

$$q = F^{-1}(X) \quad (1.12)$$

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 ces 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.

3.2. Modèle cinématique :

Le modèle cinématique est littéralement un modèle des vitesses. Il exprime les relations entre les vitesses articulaires de chaque joint et les vitesses cartésiennes d'un point de la chaîne cinématique, généralement l'organe terminal. Ce modèle est donc un modèle par accroissements infinitésimaux : chaque variation élémentaire de la valeur d'une articulation implique une variation de position de l'organe terminal, et inversement. Lorsque ces variations infinitésimales sont exprimées par rapport au temps, on peut les considérer comme des vitesses [3]. On distingue deux modèles :

▪ Modèle cinématique direct (MCD) :

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

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\partial F}{\partial q} \frac{dq}{dt} \quad (1.13)$$

Avec :

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

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

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

▪ Modèle cinématique inverse (MCI) :

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

$$\dot{q} = J^{-1}(q) \quad (1.14)$$

Le modèle cinématique permet donc non seulement de compléter éventuellement le modèle géométrique en tenant compte des vitesses, mais aussi de remplacer le modèle géométrique : en agissant par accroissements successifs. On peut se déplacer d'un point donné à un autre.

3.3. Modèle dynamique :

Le modèle dynamique d'un bras manipulateur est décrit par un ensemble d'équations mathématiques portant sur les informations dynamiques de ce robot. Ces équations peuvent être intégrées afin de simuler le comportement du robot pour une loi de commande sur un ordinateur et ce pour analyser les réponses et les performances ainsi que les objectifs de commande à atteindre. L'établissement de ces équations dynamiques peut se faire par l'application des lois de la mécanique classique entre autres les lois d'Euler-Lagrange et de Newton-Euler. Le modèle dynamique établit ainsi la relation entre les couples et/ou force développés par les actionneurs, d'une part, et les positions, vitesse et accélération articulaires d'autre part [4]. Pour un bras manipulateur à n degrés de liberté (nddl) sa relation a souvent la forme ci-après :

$$\tau = f(q, \dot{q}, \ddot{q})$$

Où :

$\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T$ est le vecteur des couples/forces des actionneurs, selon que l'articulation est rotatoire (mouvement de rotation) ou prismatique (mouvement de translation).

$q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ est le vecteur des positions articulaire.

\dot{q} est le vecteur des vitesses articulaires ($\dot{q} = \frac{dq}{dt}$).

\ddot{q} est le vecteur des accélérations articulaires ($\ddot{q} = \frac{d^2q}{dt^2}$).

f est une fonction vectorielle multivariable fortement non linéaire.

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

- 1- Le formalisme de Lagrange.
- 2- Le formalisme de Newton-Euler.

On va se consacrer sur le premier formalisme car c'est la méthode la plus simple compte tenu de ces objectifs. [6]

3.3.1. Formalisme de Lagrange :

Le formalisme de Lagrange décrit les équations du mouvement en termes de travail et d'énergie du système, ce qui se traduit, lorsque l'effort extérieur sur l'organe terminal est supposé nul, par l'équation suivante :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad (1.15)$$

$$i = 1, \dots, n.$$

Avec :

n = nombre de degré de liberté;

L = lagrangien du système égal à $E_c - E_p$;

E_c = énergie cinétique totale du système ;

E_p = énergie potentielle totale du système ;

L'énergie cinétique du système est une fonction quadratique des vitesses articulaires [4], elle est donnée par :

$$E_c = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} m_i v_{Gi}^2 + \frac{1}{2} I_{Gi} \dot{q}_i^2 \right)$$

Où :

m_i , I_{Gi} et v_{Gi} représentent pour le $i^{\text{ème}}$ corps du robot, la masse, le moment d'inertie par rapport au centre de gravité et la vitesse de translation du centre de gravité, respectivement.

Quand à l'énergie potentielle, elle est donnée par :

$$E_p = \sum_{i=1}^n (-m_i g^T p_{Gi})$$

Où :

g , p_{Gi} représentent respectivement, les vecteurs de gravité et de position du centre de gravité du $i^{\text{ème}}$ corps du robot, projetés dans le repère de la base.

Après avoir appliqué le formalisme de Lagrange, les équations obtenues (constituant le modèle dynamique du robot) peuvent se mettre sous la forme compacte suivante :

$$\tau = M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) \quad (1.16)$$

Avec :

$$V(q, \dot{q}) = V_m(q, \dot{q})\dot{q}$$

Où :

$M(q)$ est une matrice de dimension $n \times n$ symétrique définie positive, appelée matrice d'inertie (inertia matrix),

$V_m(q, \dot{q})$ est le vecteur de dimension $(n \times 1)$ représentant les couples/force de coriolis et des forces centrifuges,

$G(q)$ est un vecteur de dimension n des couples de gravitation ou couple de maintien,

3.3.2. Modélisation dynamique d'un bras manipulateur à 2ddl :

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

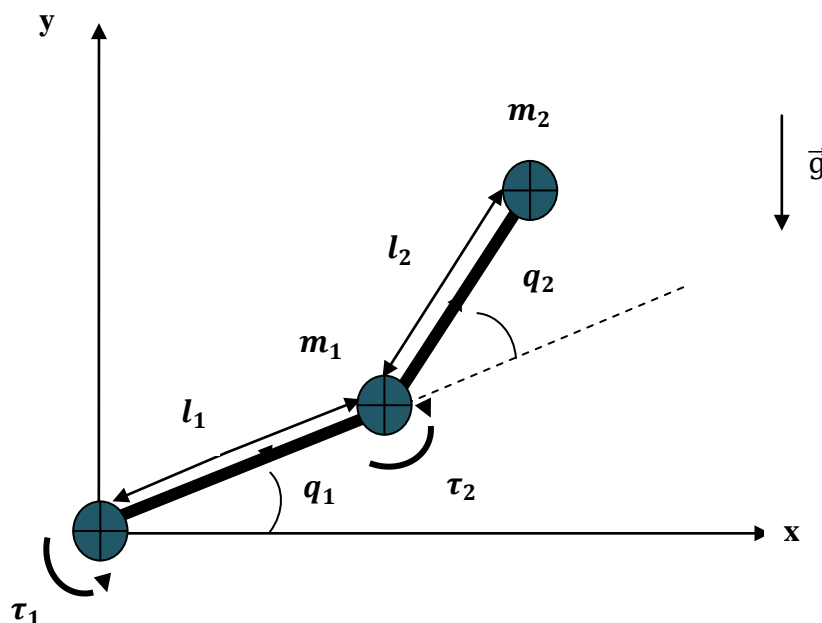


Figure 1.8: Robot manipulateur à 2ddl.

- q_i : L'angle adjoint à chaque bras avec l'axe des abscisses.

- m_i : La masse située au niveau de l'extrémité de chaque axe.
- l_i : Longueur du chaque axe.
- τ_i : Les couples.
- \vec{g} : la force de gravité.

Les coordonnées cartésiennes sont :

$$\text{A la 1}^{\text{ère}} \text{ extrémité : } \begin{cases} x_1 = l_1 \cos q_1 \\ y_1 = l_1 \sin q_1 \end{cases}$$

$$\text{à la 2}^{\text{ème}} \text{ extrémité : } \begin{cases} x_2 = x_1 + l_2 \cos (q_1 + q_2) \\ y_2 = y_1 + l_2 \sin (q_1 + q_2) \end{cases}$$

Les expressions des paramètres de (1.15) après le développement sont :

- **Energie cinétique :**

L'énergie cinétique du bras manipulateur à 2ddl (figure 1.8) est donnée comme suit :

$$E_c = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) l_1^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_2^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 + m_2 l_1 l_2 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos \theta_{q_2} \quad (1.17)$$

- **Energie potentielle :**

La seule source d'énergie potentielle est la gravitation. L'énergie potentielle du bras Manipulateur à 2ddl (figure 1.8) est donnée comme suit :

$$E_p = (m_1 + m_2) g l_1 \sin q_1 + m_2 g l_2 \sin(q_1 + q_2) \quad (1.18)$$

- **Lagrangien du système :**

$$L = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) l_1^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_2^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 + m_2 l_1 l_2 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos q_2 \\ + [(m_1 + m_2) g l_1 \sin q_1 + m_2 g l_2 \sin(q_1 + q_2)] \quad (1.19)$$

L'application de formalisme de Lagrange (1.15) sur le système (1.19) amène à l'équation suivante :

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

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

- $[(m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2 \cos q_2]\ddot{q}_1 + [m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos q_2]\ddot{q}_2 - [m_2l_1l_2\dot{q}_2 \sin q_2]\dot{q}_1 - [m_2l_1l_2(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin q_2]\dot{q}_2 + (m_1 + m_2)l_1 g \cos q_2 + m_2l_2g \cos(q_1 + q_2) = \tau_1$
- $[m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos q_2]\ddot{q}_1 + m_2l_2^2\ddot{q}_2 + m_2l_1l_2\dot{q}_1^2 \sin q_2 + m_2l_2g \cos(q_1 + q_2) = \tau_2$

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

$$\begin{bmatrix} M_{11}(q_2) & M_{12}(q_2) \\ M_{12}(q_2) & M_{22}(q_2) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -V_{m_{12}}(q_2)\dot{q}_2 & -V_{m_{12}}(q_2)(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ V_{m_{12}}(q_2)\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} G_1(q_1, q_2)g \\ G_2(q_1, q_2)g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

Avec :

$$M_{11}(q_2) = (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2 \cos q_2$$

$$M_{12}(q_2) = m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos q_2$$

$$M_{22}(q_2) = m_2l_2^2$$

$$V_{m_{12}}(q_2) = m_2l_1l_2 \sin q_2$$

$$G_1(q_1, q_2) = (m_1 + m_2)l_1 \cos q_2 + m_2l_2 \cos(q_1 + q_2)$$

$$G_2(q_1, q_2) = m_2l_2 \cos(q_1 + q_2)$$

4. Conclusion :

Le début de ce chapitre constitue les notions de bases de la modélisation des robots manipulateurs, au cours de ce chapitre on a également détaillé le sujet de ce mémoire qui est la modélisation d'un robot manipulateur à 2 degrés de libertés. A cet effet, nous avons présenté son modèle dynamique qui sera exploité par les commandes étudiées.

Chapitre 2

Commande par mode glissant

1. Introduction

La commande par mode de glissement est un mode de fonctionnement à structure variable. La théorie de la commande par mode de glissement est une technique de commande non linéaire. Elle est caractérisée par la discontinuité de la commande au passage par une surface de commutation appelée surface de glissement.

La technique des modes glissants consiste à amener la trajectoire d'un état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une commutation appropriée autour de celle-ci et de maintenir la trajectoire à glisser sur la surface jusqu'au point d'équilibre, d'où le phénomène de glissement.

L'avantage de cette commande est qu'elle est robuste vis à vis des incertitudes de modélisation et à différentes perturbations. Dans cette partie, nous présenterons le concept général de la commande par mode de glissement.

2. Théorie de la commande par mode de glissement ([7],[8],[9])

Un système à structure variable est un système dont la structure change pendant son fonctionnement. Il est caractérisé par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à une à tout instant. De plus, un tel système peut avoir de nouvelles propriétés qui n'existent pas dans chaque structure.

Dans la commande par mode de glissement, la trajectoire d'état est amenée vers une surface. Puis à l'aide de la loi de commutation, elle est forcée à rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est appelée surface de glissement et le mouvement le long de laquelle se produit est appelé mouvement de glissement.

La trajectoire dans l'espace 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 l'espace de phase, et tend vers la surface de commutation $s(x,y)=0$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le 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 de l'espace de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $s(x,y)=0$.

- Le mode du régime permanent (MRP) : Ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine de l'espace de phase), il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande.

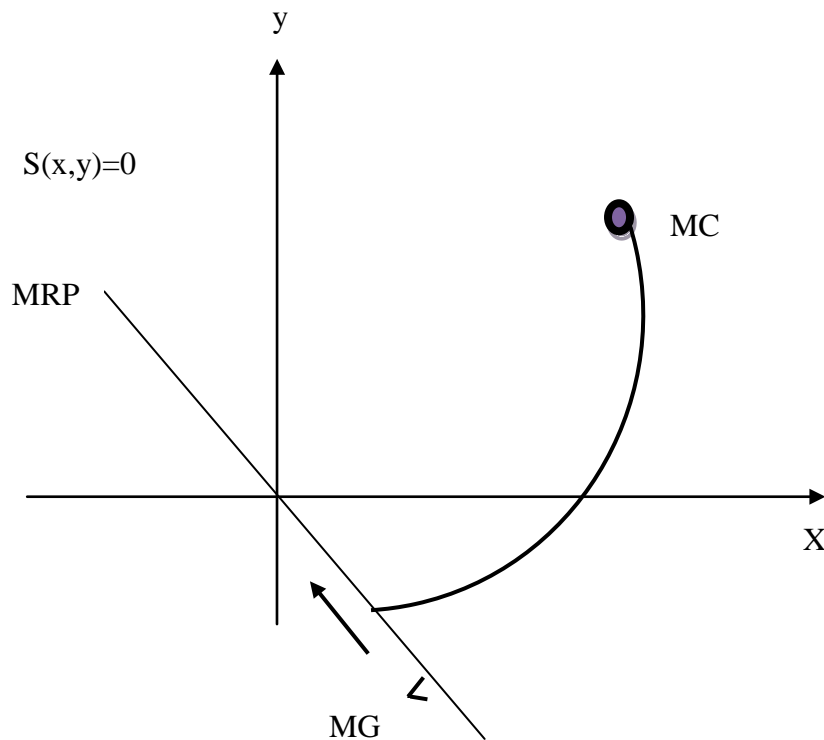


Figure 2.1: Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase.

3. Conception de la commande par mode glissant : ([7],[8],[10],[12])

Les avantages de la commande par mode glissant sont importantes et multiples ; la haute précision, la bonne stabilité, la simplicité, l'invariance, la robustesse.....etc. Ceci lui permet d'être particulièrement adapté pour les systèmes ayant un modèle imprécis.

Dans ce cas, la structure d'un contrôleur comporte deux parties : une partie continue représentant la dynamique du système durant le mode glissant et une autre discontinue représentant la dynamique du système durant le mode de convergence. Cette dernière est importante dans la commande non linéaire car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécisions et des perturbations sur le modèle.

Pour illustrer la méthode de conception de la commande par mode glissant d'ordre un, nous considérons le cas d'un système non linéaire, définie par :

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (2.1)$$

Ou :

$x \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état,

$u \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur de commande

La conception de la commande peut être effectuée en trois étapes principales dépendantes l'une de l'autre.

- Choix de la surface de glissement.
- L'établissement des conditions d'existence
- Détermination de la loi de commande

3.1. Choix de la surface de glissement :

La surface de glissement détermine le comportement dynamique désiré du système en boucle fermée. Elle peut être choisie linéaire ou non linéaire.

Le choix de la surface de glissement concerne le nombre et la forme des fonctions nécessaires. Ces deux facteurs dépendent de l'application et de l'objectif visé.

Dans le cas d'une seule entrée la surface de glissement est une fonction scalaire telle que la variable à régler glisse sur cette surface et tend vers l'origine du plan de phase (assurer la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de consigne x_d).

Une forme d'équation générale pour déterminer la surface du glissement a été proposée par [10].

Son expression est donnée par :

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right)^{r-1} e(x) \quad (2.2)$$

Avec :

$e(x) = x_i - x_{id}$: est l'écart entre la variable à régler et sa référence.

λ : est une constante positive.

r : est un degré relatif, il présente le nombre de fois qu'il faut dériver la sur surface (sortie du système) pour faire apparaître la commande explicitement.

- **Détermination de degré relatif : [11]**

Considérons le système non linéaire :

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

Le système possède un degré relatif égale à r en $x = x_0$ ssi

$$l_g l_f^k h(x) = 0 \text{ pour tout } k < r - 1, \forall x \in \text{voisinage de } x_0$$

$$l_g l_f^{r-1} h(x) \neq 0 \text{ en } x = x_0$$

Avec :

f et g sont des champs de vecteur,

ils sont donnés par :

$$l_f = \sum_{i=1}^n f_i \frac{\partial}{\partial x_i}$$

$$l_g = \sum_{i=1}^n g_i \frac{\partial}{\partial g_i}$$

On appelle dérivée de lie de $h(x)$ le long de $f(x)$ évaluée au point $x = x_0$, le nouveau champ de vecteur noté

$$l_f h(x) \text{ défini par : } l_f h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} f(x)$$

Ou une autre forme de la surface est celle-ci :

$$S(x) = \sum_{i=1}^n c_i (x_i - x_{id}) \quad (2.3)$$

La dynamique de convergence est assurée par le choix des coefficients c_j .

L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro, dont l'unique solution est $e(x) = 0$ pour un choix convenable des paramètres, ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire.

3.2. Conditions de Convergence et d'Existence :

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement. Il existe deux conditions pour assurer le mode de convergence.

- **La fonction discrète de commutation :**

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

Il s'agit de donner à la surface une dynamique de convergence vers zéro, Elle est donnée par :

- $\dot{s}(x) > 0$ si $s(x) < 0$
- $\dot{s}(x) < 0$ si $s(x) > 0$ (2.4)

Cette condition peut être formulée comme suit :

$$s'(x) s(x) < 0 \quad (2.5)$$

- **La fonction de Lyapunov :**

La fonction candidate de LYAPUNOV est une fonction scalaire positive ($V(x) > 0$)

$\forall x \neq 0$ et $V(0) = 0$ pour les variables d'état du système.

La loi de commande doit faire décroître cette fonction (c'est à dire garantir $\dot{V}(x) < 0$).

L'idée est de choisir une fonction scalaire $s(x)$ pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence et de concevoir une commande u tel que le carré de la surface correspond à une fonction de Lyapunov.

Nous définissons la fonction de LYAPUNOV comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} s^2(x) \quad (2.6)$$

La dérivée de cette fonction est :

$$\dot{V}(x) = \dot{s}(x) s(x) \quad (2.7)$$

Pour que la fonction $V(x)$ puisse décroître, il suffit d'assurer que sa dérivée soit négative. Ceci n'est vérifié que si la condition (2.5) est vérifiée.

La relation (2.6) explique que le carré de la distance entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement exprimé par $s^2(x)$ diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface à partir des deux cotés de cette dernière. Cette condition suppose un régime glissant idéal ou la fréquence de commutation est infinie.

3.3. Calcul de la commande : ([8],[12])

La forme de la commande par mode de glissement est constituée de deux parties: la commande équivalente (u_{eq}) et la commande discontinue (u_n).

D'où :

$$u = u_{eq} + u_n \quad (2.8)$$

u_{eq} :corresponde donc a la commande proposée par UTKIN , elle sert à maintenir la dynamique du système commandé sur la surface de glissement $s(x) = 0$.

Elle est synthétisée en considérant que la dérivée de la surface de glissement soit nulle

$$\dot{s}(x) = 0.$$

u_n :est déterminé pour vérifier la condition de convergence.

Pour mettre en évidence le développement précédent, nous considérons un système défini dans l'espace d'état par l'équation (2.3). Il s'agit de trouver l'expression analogique de la commande u .

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial s}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (2.9)$$

En remplaçant(2.1) et (2.8)dans (2.9), nous trouvons :

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} (f(x) + g(x) u_{eq}) + \frac{\partial s}{\partial x} g(x) u_n \quad (2.10)$$

Avec:

$$u_n = -K \text{sign} (s(x, t))$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle, et par conséquent, sa dérivée ($\dot{s}(x) = 0$) et la partie discontinue sont aussi nulles ($u_n = 0$). D'où nous déduisons l'expression de la commande équivalente :

$$u_{eq} = - \left(\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right)^{-1} \frac{\partial s}{\partial x} f(x) \quad (2.11)$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que

$$\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \neq 0$$

Durant le mode de convergence, et en remplaçant la commande équivalent par son expression dans (2.10) , nous trouvons la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$\dot{s}(x, t) = \frac{\partial s}{\partial x} g(x) u_n \quad (2.12)$$

et la condition d'attractivité exprimée par (2.5) devient :

$$s(x, t) \frac{\partial s}{\partial x} g(x) u_n < 0 \quad (2.13)$$

afin de satisfaire cette condition, le signe de u_n doit être opposé à celui de

$$s(x, t) \frac{\partial s}{\partial x} g(x).$$

La forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'un relais de la figure 10.

$$u_n = -K \text{sign}(s(x, t)) \quad (2.14)$$

Le signe de K doit être différent de celui de $\frac{\partial s}{\partial x} g(x)$

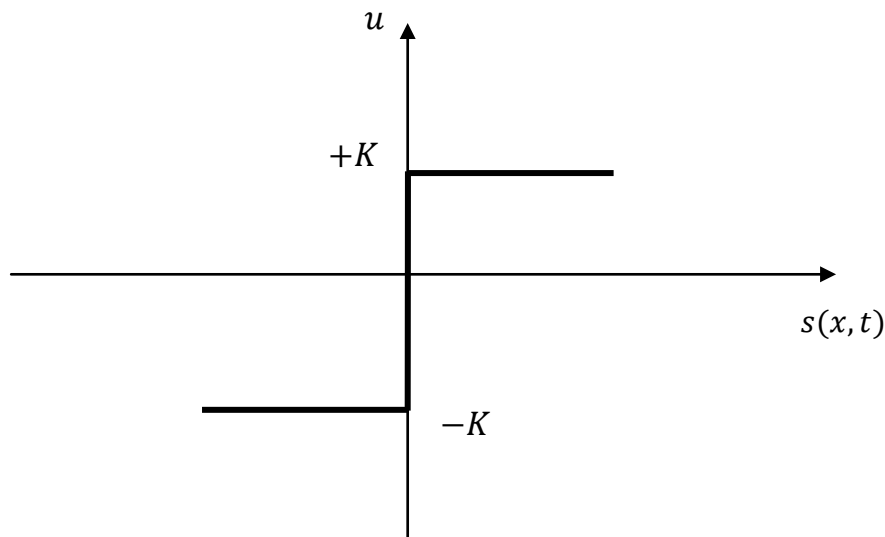


Figure 2.2 : Représentation de la commande discontinue.

4. Le phénomène de chattering :

Durant le régime glissant, les discontinuités issues de la commande peuvent entraîner des oscillations haute fréquence de la trajectoire du système autour de la surface de glissement, ce phénomène est appelé phénomène de broutement ou chattering en anglais[13]. Ce phénomène est le principal désavantage de la commande par mode glissant d'ordre un, il peut exciter des dynamiques non modélisées conduisant à l'instabilité.

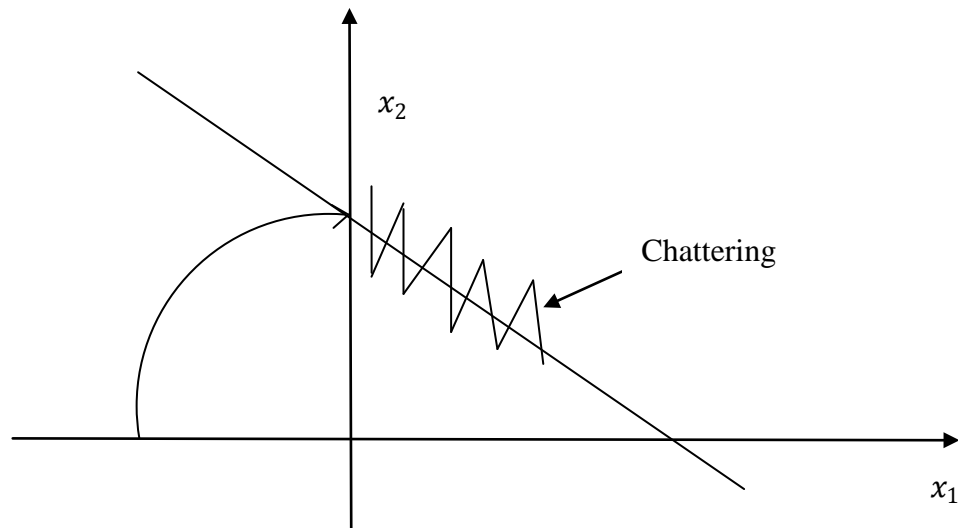


Figure 2.3: Phénomène de chattering.

De nombreuses études ont été effectuées dans le but de réduire ou d'éliminer le phénomène de chattering. L'une d'entre elles est utilisée des fonctions sigmoïde, telle que la fonction \tanh (fonction tangente hyperbolique) ou \arctan (tangente réciproque) ou saturation.

5. Avantages et inconvénients de la commande par mode glissant : [14]

Il est connu que la robustesse vis-à-vis des perturbations et des incertitudes du modèle présente le point fort d'une commande par mode glissant. Contrairement à une loi de commande classique, les performances dynamiques sont maintenues quelles que soient les variations des paramètres et quelles que soient les amplitudes des perturbations appliquées au système.

De plus, la réduction de l'ordre du système constitue un autre point fort de ce type de commande, car elle permet de simplifier la complexité du système.

Cependant, ces performances sont obtenues au prix de certains inconvénients :

Un phénomène de chattering ou broutement provoqué par la partie discontinue de cette commande et qui peut avoir un effet néfaste sur les actionneurs.

Le système est soumis à chaque instant à une commande élevée afin d'assurer sa convergence vers l'état désiré et ceci n'est pas souhaitable. Parmi les solutions proposées à ces

problèmes, on peut citer la commande par modes glissants à bande limite qui consiste à remplacer la fonction de commutation dans la commande par une fonction de saturation (hystérésis, arc tangent, etc.).

6. Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté la notion générale des concepts de la commande par mode de glissement, qui est très utilisée dans les systèmes non linéaires. L'intérêt majeur des approches de cette commande réside dans la simplicité de la mise en œuvre de ces lois.

chapitre 3
commande à retard (TDC)

1. Introduction

Les algorithmes de commandes les plus simples et les plus largement utilisés sont basés sur la théorie classique de commande. Dans beaucoup d'applications, cependant, la dynamique du système peut être non linéaire, temps-variante, et peut être même inconnue. Par exemple, les dynamiques des robots sont inévitablement non linéaires et peuvent ne pas être bien connues. Beaucoup de systèmes sont astreints à fonctionner dans une petite plage de leur véritable domaine de fonctionnement pour assurer relativement une performance linéaire. Par exemple, les servomoteurs doivent fonctionner dans la partie linéaire du domaine de fonctionnement pour une commande précise. Les restrictions sur le fonctionnement des systèmes pour assurer des performances satisfaisantes souvent limitent l'utilité du système. Les restrictions sur la performance ont mené au développement de techniques de commande qui tentent de surmonter de telles difficultés afin d'améliorer la performance globale du système.

Afin de contrecarrer les effets des incertitudes et des perturbations, il faut faire recours aux techniques de commande dites robuste.

La commande en mode glissant présentée dans le chapitre précédent est une commande robuste passive, le choix adéquat du gain K permet d'anticiper sur les effets des erreurs de modélisations et des signaux perturbateurs éventuelles et non connues à priori.

Il existe une autre classe de commande robuste dites adaptative. L'idée est d'ajouter dans la loi de commande un terme qui permet par opposition d'éliminer l'effet des incertitudes et des perturbations. La détermination de ce terme dépend de la connaissance à priori des incertitudes et/ou des perturbations. Or, par nature, celles-ci sont inconnues.

Le principe de la commande TDC repose sur l'estimation des incertitudes à partir des informations passées ou retardées

Pour analyser encore, la TDC, proposée dans les références [16, 17, 18, 19], ne dépendait pas de la connaissance de la dynamique du système, les actions répétitives, les fréquences de commutation infinies, ou la commande discontinue. L'algorithme de commande original exige la mesure ou l'estimation de la dérivée du vecteur d'état afin d'estimer, à travers le retard (Time Delay), les effets courants des dynamiques inconnues et les

perturbations associées au modèle de commande. Le régulateur utilise l'information globale pour supprimer les dynamique inconnues et les perturbations simultanément et insère par la suite les dynamiques désirées dans le modèle de commande. La TDC emploie les observations passées de la réponse du système et les entrées de commande pour modifier directement la commande plutôt que d'ajuster les gains du régulateur. L'algorithme de commande TDC a été appliqué à plusieurs systèmes par simulation et par expérimentation [20,21]. Les résultats ont été généralement favorables avec des performances s'accordant bien avec les performances prédites.

Bien que la commande TDC a connu des développements important [22] nous nous limitons dans notre travail à étudier les principes de bases. Spécifiquement, la dynamique et les perturbations inconnues sont estimées en utilisant des méthodes de convolution. Bien que l'analyse de la stabilité et la linéarisation entrée-sortie avec cette technique de commande aient été discutées dans [20], ce chapitre se concentrera sur des simulations et des expérimentations relatives à un robot manipulateur à 2 degrés de liberté se déplaçant dans un plan horizontal. Les résultats montrent d'excellentes performances du système de commande.

2. Loi de commande TDC en utilisant une convolution

2.1. Loi de commande :

Pour cette partie, le développement de la TDC est explicité dans [22]. Les systèmes concernés sont décrits par l'équation dynamique suivante :

$$\dot{x} = F(x, t) + G(x, u, t) + D(t) \quad (3.1)$$

Où $x \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état du système et $u \in \mathbb{R}^m$ est un vecteur de commande. $F(x, t)$ et $G(x, u, t) \in \mathbb{R}^n$ sont les vecteurs non linéaires représentant respectivement la partie connue et celle inconnue de la dynamique du système et $D(t) \in \mathbb{R}^n$ est un vecteur de perturbation inconnu. La variable t représente le temps. L'équation (3.1) peut être réécrite comme suit:

$$\dot{x} = F(x, t) + H(x, u, t) + Bu(t) + D(t) \quad (3.2)$$

Où le terme $H(x, u, t)$ est défini comme suit :

$$H(x, u, t) = G(x, u, t) - Bu(t)$$

et $B \in \mathbb{R}^{n \times r}$ est une matrice constante connue de rang r et qui peut être choisie par le concepteur. Nous définissons un modèle de référence constant, linéaire temps invariant qui génère une trajectoire désirée :

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m r \quad (3.3)$$

Où $x_m \in \mathbb{R}^n$ est un vecteur d'état du modèle de référence, $A_m \in \mathbb{R}^{n \times n}$ est une matrice constante stable du système, $B_m \in \mathbb{R}^{n \times r}$ est une matrice de commande constante, et $r \in \mathbb{R}^r$ est un vecteur de commande (référence). Le vecteur d'erreur e est défini comme étant la différence entre le vecteur d'état de système et celui du modèle de référence :

$$e = x_m - x \quad (3.4)$$

La dérivée temporelle de l'erreur, est alors :

$$\dot{e} = \dot{x}_m - \dot{x} \quad (3.5)$$

En utilisant les équations (3.1) et (3.3), l'équation ci-dessus devient :

$$\dot{e} = A_m x_m + B_m r - [F(x, t) + H(x, u, t) + Bu(t) + D(t)] \quad (3.6)$$

Nous pouvons ajouter et retrancher le terme $A_m x$ à l'équation ci-dessus, ce qui mène à :

$$\dot{e} = A_m e + [A_m x + B_m r - F(x, t) - \Psi(x, u, t) - Bu] \quad (3.7)$$

Le vecteur Ψ représente les effets de H et de D (incertitudes)

$$\Psi(x, u, t) = H(x, u, t) + D(t) \quad (3.8)$$

Une action de commande peut être choisie de telle sorte que le terme entre crochets dans l'équation (3.7) soit nul à tout instant t . Cela rend la dynamique de l'erreur décroissante à un taux bien déterminé exprimé par la matrice A_m du système de référence. Cela n'est toujours pas pratique, car en général il est souhaitable d'avoir une erreur qui s'atténue beaucoup plus rapidement que la dynamique du modèle de référence. Dans ces conditions, l'état x suivra étroitement la trajectoire x_m du modèle de référence. Nous cherchons une commande v qui permet de forcer l'erreur e à zéro en dépit de la présence d'une dynamique inconnue pour les systèmes et les perturbations imprévisibles. Afin d'ajuster la dynamique de l'erreur, une nouvelle commande v est défini comme suit :

$$v = u + Ke \quad (3.9)$$

Où K est une matrice de gain de retour d'état. La dynamique de l'erreur prend maintenant la forme :

$$\dot{e} = [A_m + BK]e + p \quad (3.10)$$

Où le vecteur p est donné par :

$$p = A_m x + B_m r - F(x, t) - \Psi(x, u, t) - Bv \quad (3.11)$$

La loi de commande est choisie comme suit :

$$v = B^+[A_m x + B_m r - F(x, t) - \hat{\Psi}(x, u, t)] \quad (3.12)$$

Où B^+ est la pseudo-inverse de la matrice B . L'action réelle de commande est calculée à partir de v en utilisant l'équation (3.9). Le terme $\hat{\Psi}(x, u, t)$ est la meilleure estimation des dynamiques inconnues $\Psi(x, u, t)$. La loi de commande proposée par l'équation (3.12) et l'équation (3.9) se compose de quelques termes. Les deux premiers termes de l'équation (3.12) représentent la dynamique désirée. Le troisième terme compense la dynamique connue et le quatrième terme compense la dynamique inconnue. L'expression conduisant à v entraîne une erreur qui dépend du terme Ke .

Dans ce qui suit, nous récapitulons l'algorithme de commande.

Etape 1 :

Estimer le vecteur inconnu Ψ en utilisant des convolutions comme décrit dans la prochaine section. Au cours de la première période d'échantillonnage, cette estimation est mise à zéro car aucune information antérieure n'est disponible à ce moment.

Etape 2 :

Calculer l'action de commande v tels que $p = 0$ en utilisant la meilleure estimation du vecteur inconnu Ψ .

Etape 3 :

Calculer l'action de commande $u = v - Ke$.

Etape 4 :

Répétez à partir de l'étape 1.

La clé de ce problème de commande est d'obtenir une bonne estimation $\hat{\Psi}$, sans l'aide explicite de Ψ . Dans les références [17,18], les informations passées, y compris l'état du système, ont été utilisées.

Dans la section suivante, sans nécessiter une estimation de la dérivée du vecteur d'état, nous allons décrire un moyen d'obtenir cette estimation. Bien entendu, ceci se fera en utilisant la convolution [22].

2.2. Estimation de la dynamique inconnue en utilisant la convolution :

Le comportement dynamique de l'erreur est régi par l'équation(3.10). La réponse temporelle de l'erreur est donnée par :

$$e(t) = e^{(A_m + BK)(t-t_0)}e(t_0) + \int_{t_0}^t e^{(A_m + BK)(t-\tau)} p(\tau)d\tau \forall t \geq t_0 \quad (3.13)$$

Ce qui implique une matrice de transition d'état $\Phi(t, t_0)$,

$$\Phi(t, t_0) = e^{(A_m + BK)(t-t_0)} \forall t \geq t_0 \quad (3.14)$$

L'équation (3.13) est toujours utilisée pour obtenir le temps de réponse $e(t)$ dans l'intervalle $[t_0, t]$. Ceci est possible une fois les matrices A_m , B et K sont spécifiées avec la condition initiale sur l'erreur $e(t_0)$ et l'historique du terme de force p dans l'intervalle $[t_0, t]$. la méthode proposée utilise les équations (3.11) et (3.13) pour obtenir l'estimée $\hat{\Psi}$.

En réarrangeant l'équation (3.13) cela mène à :

$$\begin{aligned} & \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau) \Psi(\tau) d\tau \\ &= -e(t) + \Phi(t, t_0)e(t_0) + \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau) A_m x(\tau) d\tau + \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau) B_m r(\tau) d\tau \\ & - \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau) F(\tau) d\tau - \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau) Bv(\tau) d\tau \quad (3.15) \end{aligned}$$

Supposons que la fonction inconnue Ψ ne varie pas dans l'intervalle $[t_0, t]$, on peut écrire :

$$\int_{t_0}^t \Phi(t, \tau) \Psi(\tau) d\tau \cong \left[\int_{t_0}^t \Phi(t, \tau) d\tau \right] \Psi(\zeta) \quad (3.16)$$

Pour un ζ appartenant à $[t_0, t]$, en supposant que l'entrée de commande v ait été calculée pour la période de temps en question, l'équation (3.15) montre un seul vecteur inconnu Ψ . On peut aussi supposer que les fonctions : x, r, F , et v soient constantes pour un intervalle de temps $[t_0, t]$ suffisamment petit, et on peut écrire :

$$\hat{\Psi}(\xi) = -\Gamma^{-1} e(t) + \Gamma^{-1} \Phi(t, t_0)e(t_0) + A_m x(\epsilon) + B_m r(\epsilon) - F(\zeta) - Bv(\eta) \quad (3.17)$$

Où ξ, ϵ, ζ , et η appartiennent à $[t_0, t]$ et la fonction $\Gamma(t, t_0)$ est donnée par :

$$\Gamma(t, t_0) = \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau) d\tau \quad \forall t \geq t_0 \quad (3.18)$$

Ce développement peut être considéré du point de vue implémentation numérique.

Les variables du système et sa dynamique représentée par le vecteur Ψ dans la réponse temporelle de l'équation (3.15) peuvent être supposée approximativement constantes le long de l'intervalle $[t_0, t]$. Cependant, le calcul de Ψ exige des variables soit connues soit mesurées. Bien que les valeurs exactes des variables x, r, F et v ne soient pas connues aux instants ϵ, ζ , et η , quelques approximations peuvent être faites en utilisant les données actuelles et passées.

L'obtention de l'estimation du vecteur Ψ réside dans la méthode utilisée pour calculer la convolution en équation (3.17) et à évaluer les différentes fonctions à des moments précis dans l'intervalle $[t_0, t]$. La précision dans l'obtention de cette estimation dépend aussi du système d'interpolation / extrapolation utilisé lorsque plus d'une période d'échantillonnage est considérée. Ainsi, l'importance du choix de l'intervalle de temps $[t_0, t]$. Comme le montre la Figure 3.1, si l'on utilise les données d'une période d'échantillonnage dans le passé, le vecteur Ψ peut être estimé par

$$\hat{\Psi} = -\Gamma^{-1} e(t) + \Gamma^{-1} e^{(A_m + BK)(t-t_0)} e(t_0) + A_m x_{moy} + B_m r_{moy} - F_{moy} - Bv(t_0) \quad (3.19)$$

Où $e_{moy}, x_{moy}, r_{moy}, F_{moy}$ sont respectivement les valeurs moyennes de e, x, r, F dans l'intervalle de temps $[t_0, t]$. L'estimation $\hat{\Psi}$ rapproche la dynamique inconnue de système à un temps d'échantillonnage dans le passé en utilisant des données passées et présentes. Dans ce cas précis, les données actuelles correspondent à l'erreur $e(t)$. Les données antérieures

consistent correspondent à l'état initial $e(t_0)$ à l'instant t , l'entrée de commande $v(t_0)$ et les valeurs moyennes mentionnées précédemment.

Une meilleure estimation pourrait être obtenue en utilisant plus d'une période d'échantillonnage dans l'intervalle de temps $[t_0, t]$. Le cas de q périodes d'échantillonnage dans l'intervalle de temps $[t_0, t]$ est choisies dans la figure 3.1 pour $q=3$ et $t = t_q$. D'avantage d'informations peut être trouvé dans [22].

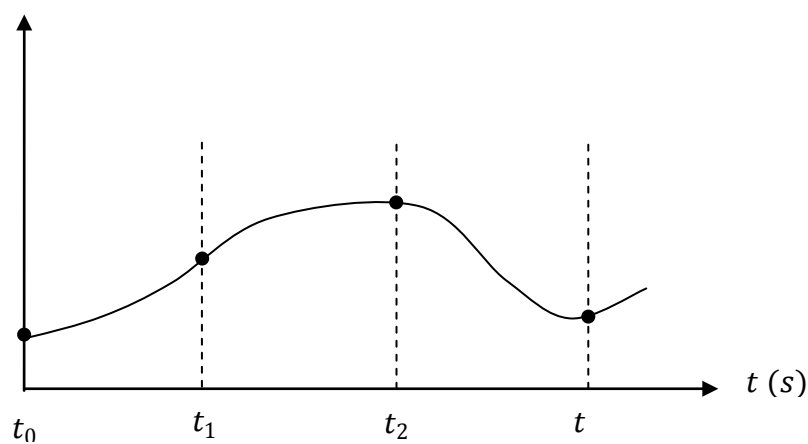


Figure 3.1 : Estimation dynamique en utilisant trois périodes d'échantillonnages.

3. Avantages et inconvénients de la commande TDC :

Les avantages de la commande TDC est qu'elle est robuste et active car elle estime les paramètres pour compenser les incertitudes, la raison pour laquelle elle peut être appliquée à des systèmes dont la dynamique peut être non linéaire, temps-variant, et peut être même inconnue.

Par contre l'inconvénient de cette commande réside dans le choix de la matrice B qui doit être proche de $G(x, u, t)$ et aussi sur l'inversion de la matrice $H(x, u, t)$ pour tout x , u , et t . ceci n'est pas toujours possible.

4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de la commande robuste TDC de manière simple. Nous nous sommes limité au fonctionnement de base. Des études passées peuvent être consultées dans les références citées.

La commande TDC permet d'annuler l'effet des dynamiques incertaines en les estimant par des informations passées. Le principe de base présenté dans ce chapitre sera illustré au chapitre suivant dans le cas de la commande d'un bras manipulateur.

Chapitre 4

Résultats de simulations

1. Introduction :

Dans les deux chapitres précédents, nous avons présenté deux commandes non linéaires qu'on va appliquer sur un bras manipulateur à deux degrés de liberté. Ces deux commandes sont la commande par mode glissant standard et de la commande TDC. Nous présentons dans ce chapitre les résultats de simulation et une étude comparative des deux techniques de commande.

2. Modèle dynamique du bras manipulateur:

2.1. Modèle :

Nous avons considéré un bras manipulateur à 2 d.d.l avec les valeurs suivantes :

$$m_1 = 0.5 \text{ kg} \quad , \quad m_2 = 0.5 \text{ kg}$$

$$l_1 = 1 \text{ m} \quad , \quad l_2 = 0.8 \text{ m}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Le modèle correspondant est représenté sous la forme non linéaire suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q_1 \\ -\frac{q_2}{3} \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ -\frac{\dot{q}_2}{3} \\ h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ - \\ - \\ H^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix}$$

Avec :

$$H = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2(\frac{5}{3} + \cos q_2) & \frac{2}{3} + \cos q_2 \\ \frac{2}{3} + \cos q_2 & \frac{2}{3} \end{bmatrix}$$

$$h = \frac{1}{2} H^{-1} \begin{bmatrix} -\dot{q}_2(2\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin q_2 \\ \dot{q}_1 \sin q_2 \end{bmatrix}$$

$$\text{on pose : } F = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ h \end{bmatrix} \text{ et } G = \begin{bmatrix} 0 \\ - \\ - \\ H^{-1} \end{bmatrix}$$

Model d'état :

$$x = [x_1, x_2]^T$$

$$x_1 = [q_1, q_2]^T$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 = [q_1, q_2]^T \\ \dot{x}_2 = h + H^{-1} * u \end{cases}$$

Avec :

$$u = [u_1 \ u_2]^T$$

Alors le modèle d'état peut être donné sous la forme non linéaire suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (4.1)$$

$x(t) \in R^4$ Représente le vecteur d'état.

$u(t) \in R^2$ Représente le vecteur d'entrée.

$y(t) \in R^2$ Représente le vecteur de sortie.

$h(x)$ Représente la fonction de sortie.

De (4.1) nous pouvons écrire l'ensemble des variables d'état pour le système telles que :

$$f(x) = [x_2, h]^T$$

$$g(x) = [g_1, g_2]^T$$

où :

$$g_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ et } g_2 = H^{-1}$$

La sortie correspond aux variables articulaires du robot :

$$y(t) = h(x) = x_1$$

2.2. Objectif de la commande

L'objectif est de ramener les positions q_1 et q_2 vers leurs références désirées qui sont

$$q_{1\text{ref}} = \pi/3 \text{ et } q_{2\text{ref}} = \pi/3$$

Les simulations sont effectuées sous MATLAB avec la méthode numérique Runge-Kutta d'ordre 4.

3. commande par modes glissants:

3.1. synthèse de la loi de commande

La forme de la surface de glissement est :

$$s(x) = [s_1, s_2]^T$$

$$s(x) = \lambda e(x) + \dot{e}(x)$$

Avec :

$$s_1(x) = \lambda_1 e_1(x) + \dot{e}_1(x)$$

$$s_2(x) = \lambda_2 e_2(x) + \dot{e}_2(x)$$

Avec :

$$e = \begin{pmatrix} q_1 - q_{1d} \\ q_2 - q_{2d} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} q_{1d} \\ q_{2d} \end{pmatrix} + x_1$$

$$\dot{e} = - \begin{pmatrix} \dot{q}_{1d} \\ \dot{q}_{2d} \end{pmatrix} + \dot{x}_1 = - \begin{pmatrix} \dot{q}_{1d} \\ \dot{q}_{2d} \end{pmatrix} + \dot{x}_2$$

Et :

$$\ddot{e} = - \begin{pmatrix} \ddot{q}_{1d} \\ \ddot{q}_{2d} \end{pmatrix} + \ddot{x}_1 = - \begin{pmatrix} \ddot{q}_{1d} \\ \ddot{q}_{2d} \end{pmatrix} + \ddot{x}_2$$

On pose :

$$\begin{pmatrix} q_{1d} \\ q_{2d} \end{pmatrix} = X_d \quad , \quad \begin{pmatrix} \dot{q}_{1d} \\ \dot{q}_{2d} \end{pmatrix} = \dot{X}_d \quad \text{et} \quad \begin{pmatrix} \ddot{q}_{1d} \\ \ddot{q}_{2d} \end{pmatrix} = \ddot{X}_d$$

Ainsi, la dérivée de la surface de glissement est :

$$\dot{s}(x) = \lambda \dot{e}(x) + \ddot{e}(x)$$

La condition d'attractivité permet d'écrire :

$$\dot{s}(x) = -K \text{sign}(s(x, t))$$

Donc :

$$\lambda \dot{e}(x) + \ddot{e}(x) = -K \text{sign}(s(x, t))$$

On tire la dérivée seconde de l'erreur on aura :

$$\ddot{e}(x) = -(\lambda \dot{e}(x) + K \text{sign}(s(x, t)))$$

On remplace $\ddot{e}(x)$ par son expression :

$$-\begin{pmatrix} \ddot{q}_{1d} \\ \ddot{q}_{2d} \end{pmatrix} + \dot{x}_2 = -(\lambda \dot{e}(x) + K \text{sign}(s(x, t)))$$

On remplace \dot{x}_2 et $-\begin{pmatrix} \ddot{q}_{1d} \\ \ddot{q}_{2d} \end{pmatrix}$ par leurs expressions :

$$-\ddot{X}_d + F + H * u = -(\lambda \dot{e}(x) + K \text{sign}(s(x, t)))$$

On multiplie l'équation précédente par H et après quelques développements, on tire la commande u :

$$u = H^{-1}(-\lambda \dot{e}(x) - F - K \text{sign}(s(x, t)) + \ddot{X}_d)$$

On peut identifier la commande équivalente :

$$u_{eq} = H^{-1}(-\lambda \dot{e}(x) - F + \ddot{X}_d)$$

Et la commande discontinue :

$$u_n = -H^{-1} * K \text{sign}(s(x, t))$$

3.2. résultats de simulations

Nous avons choisies valeurs de K et λ comme suit:

$$K = 50$$

$$\lambda = 40$$

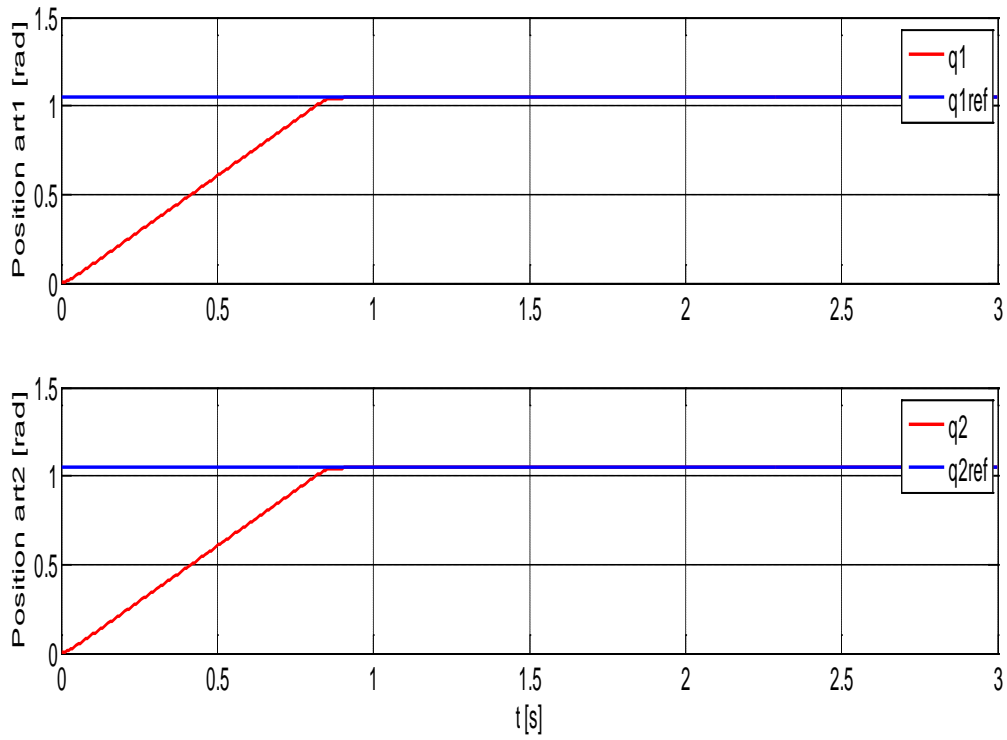
Avec les conditions initiales

$$q_1 = 80^\circ \quad \text{et} \quad q_2 = 70^\circ$$

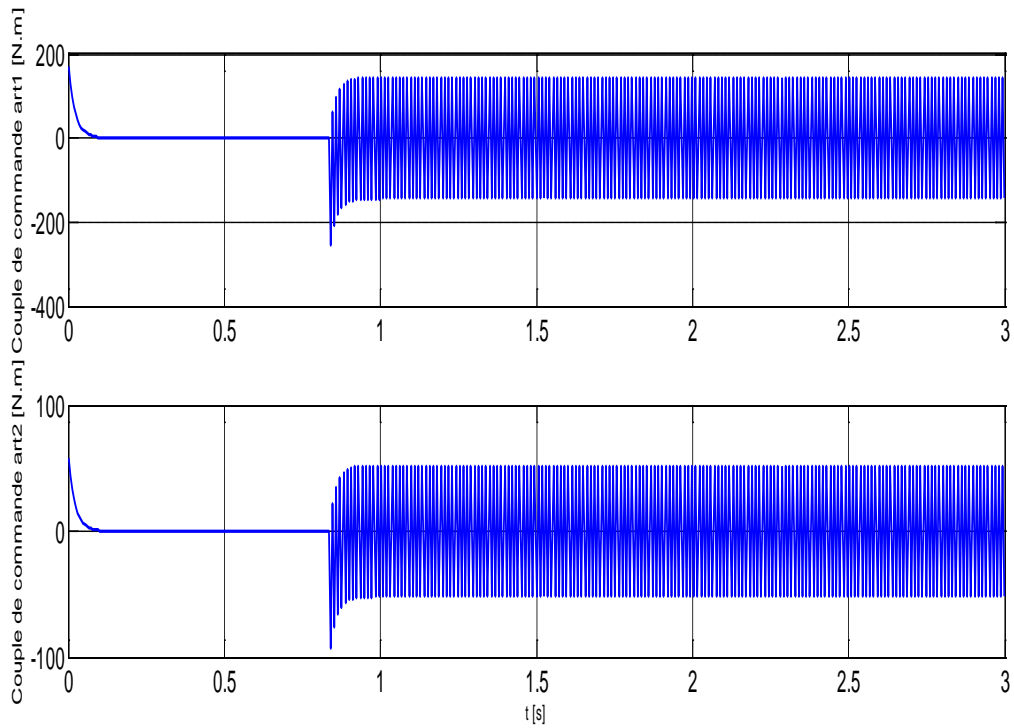
3.2.1. résultats de simulations sans erreurs paramétriques

Les résultats de simulation sont donnés ci-dessous :

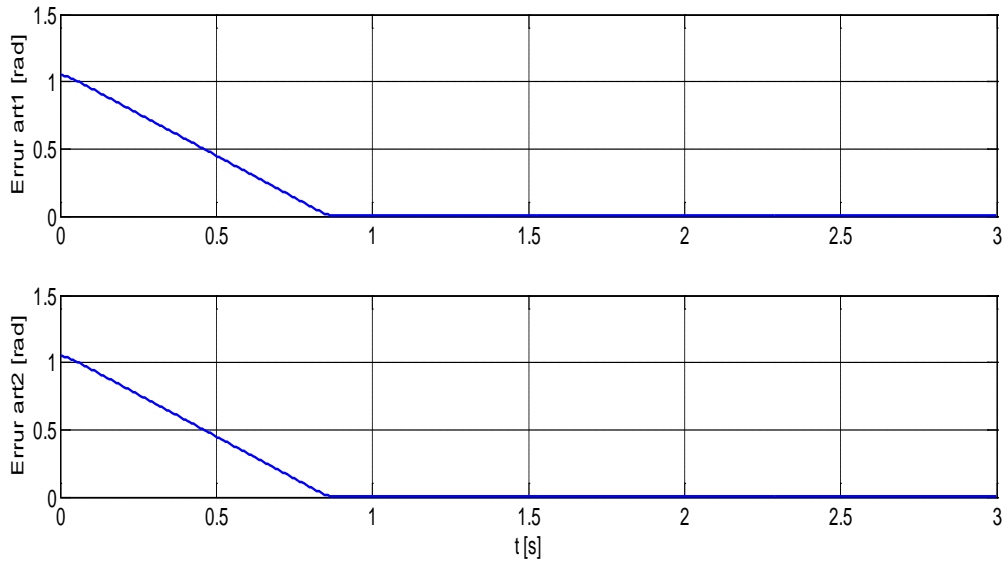
Les figures (4.1, 4.2, 4.3, 4.4) : (a) illustre les trajectoires des angles (q_1, q_{1ref}) et (q_2, q_{2ref}) successivement, (b) illustre les commandes résultantes des deux articulations u_1 et u_2 successivement, (c) représente les erreurs de poursuite des trajectoires, (d) montre les surfaces de glissement s_1 et s_2 en fonction du temps.



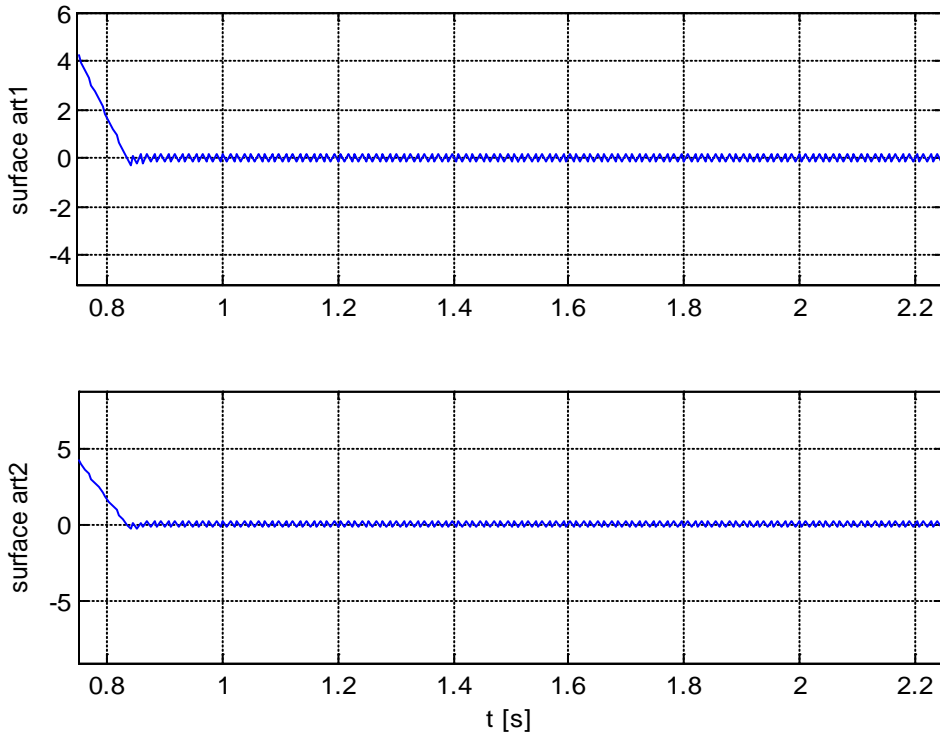
(a)



(b)



(c)



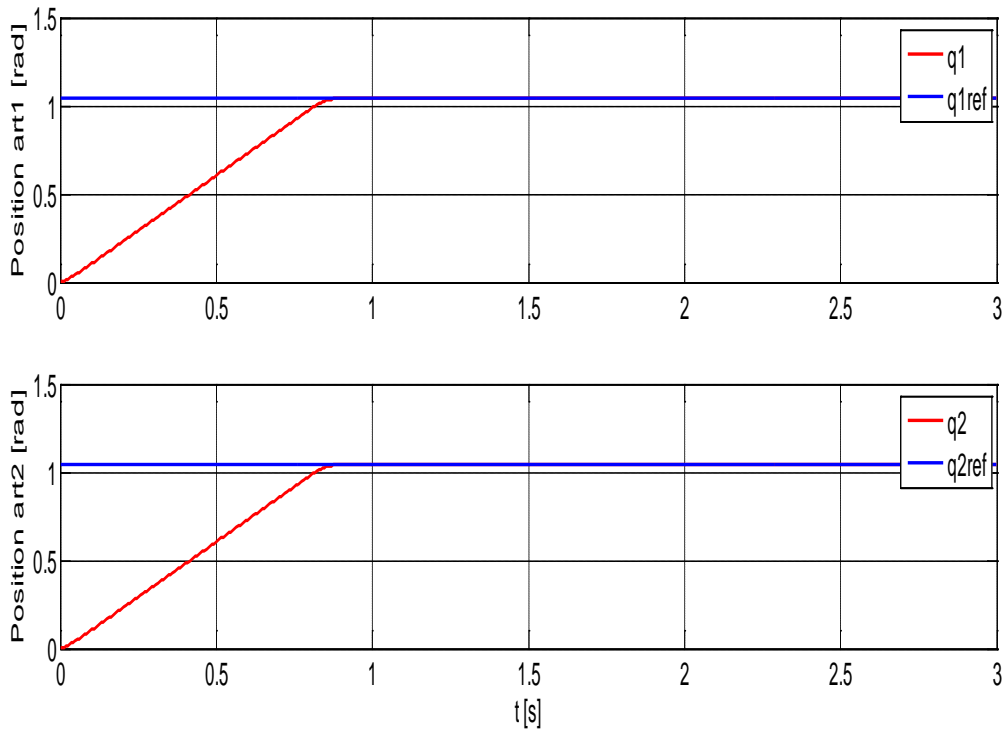
(d)

Figure4. 1 : Résultats de simulation dans le cas de la commande par modes glissants sans erreurs paramétriques.

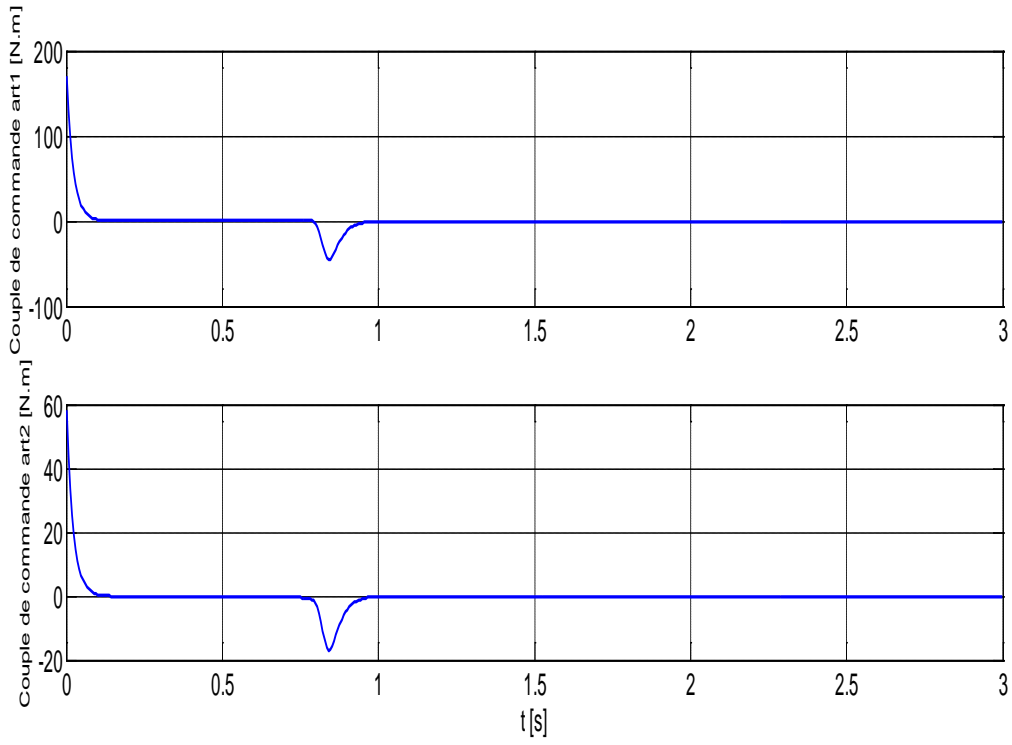
A travers la figure ci-dessus, on remarque que la commande par mode glissant conduit les trajectoires du système à suivre les trajectoires désirées avec un écart statique négligeable. sur (q_1 et q_2). Nous constatons que les commandes sont fortement oscillantes à cause de chaettering qui est important. Les surfaces de glissement convergent vers zéro avec la présence de chattering.

Donc, pour éliminer l'effet de chattering qui est du à la commande discontinue on remplace la fonction $\text{sign}(x)$ par la fonction $\tanh s(x)$.

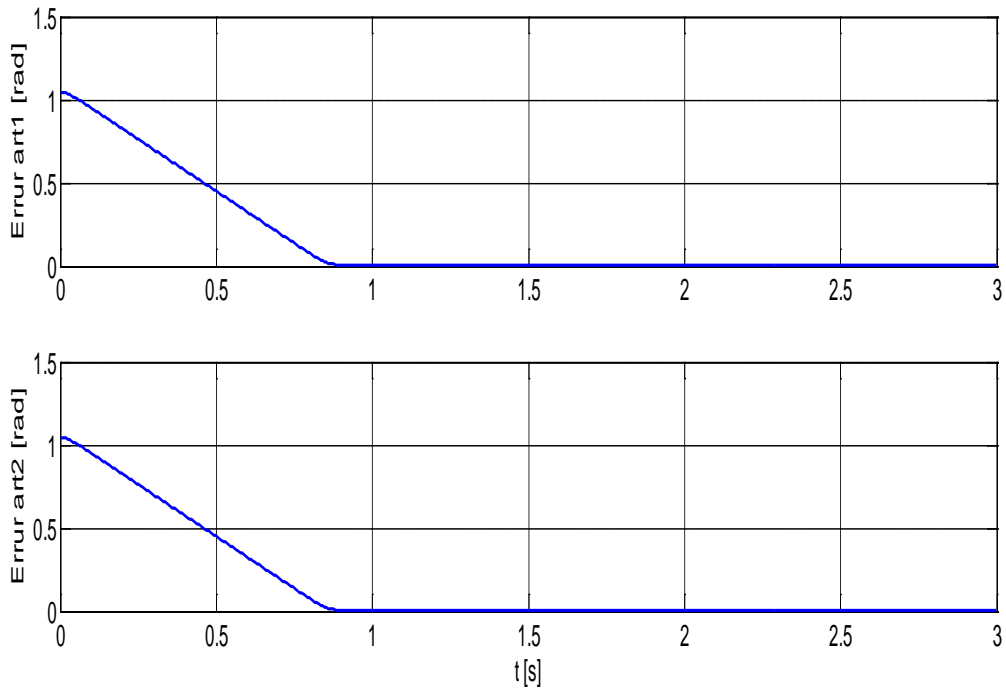
Les résultats de simulation obtenus sont donnés ci-dessous :



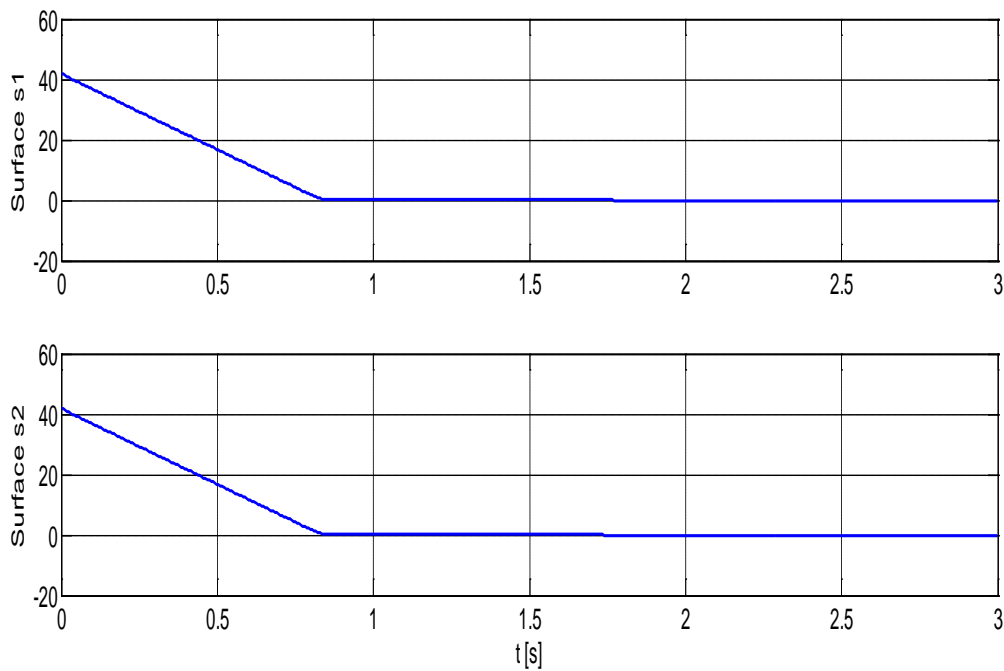
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4. 2 : Résultats de simulation dans le cas de la commande par modes glissants sans le phénomène de chattering.

En changeant la fonction $\text{sign } s(x)$ par $\tanh s(x)$ on peut constater que le phénomène de chattering est fortement atténué tout en gardant les performances dynamiques du système bouclé.

3.2.2 Test de robustes

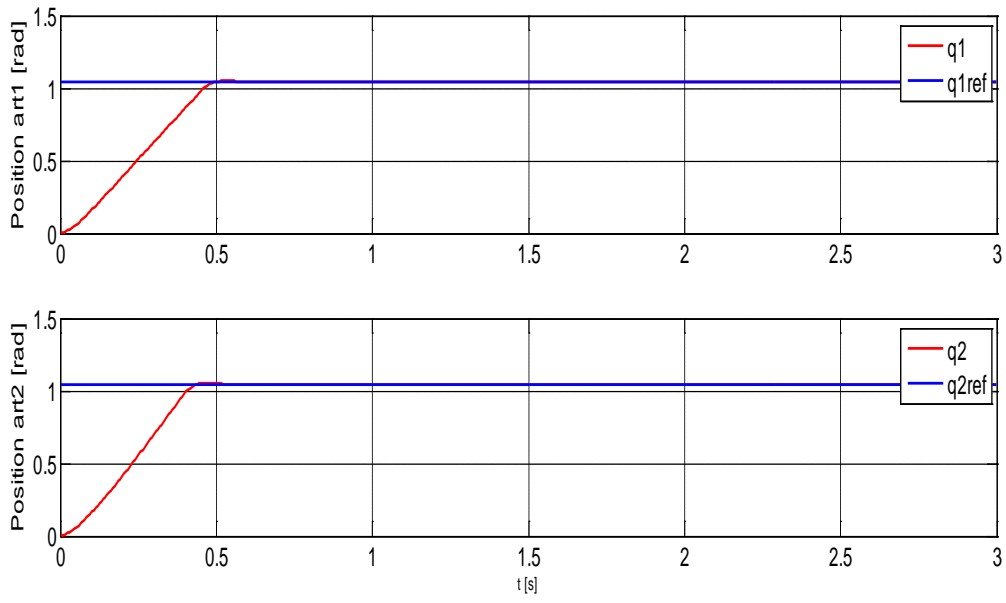
a. variations paramétriques:

Nous avons supposé que le vecteur F est incertain. Afin de tenir compte de cette incertitude, nous avons considéré dans la loi de commande le vecteur F comme suit

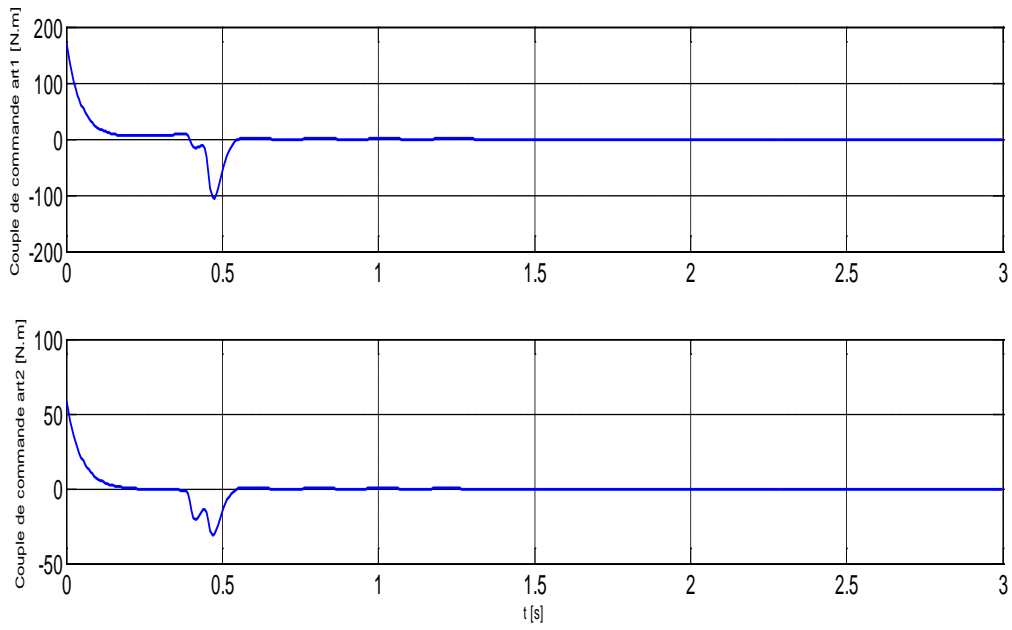
$$F = 0.8 \text{ } Freel$$

Où $Freel$ représente le vecteur F réel du système.

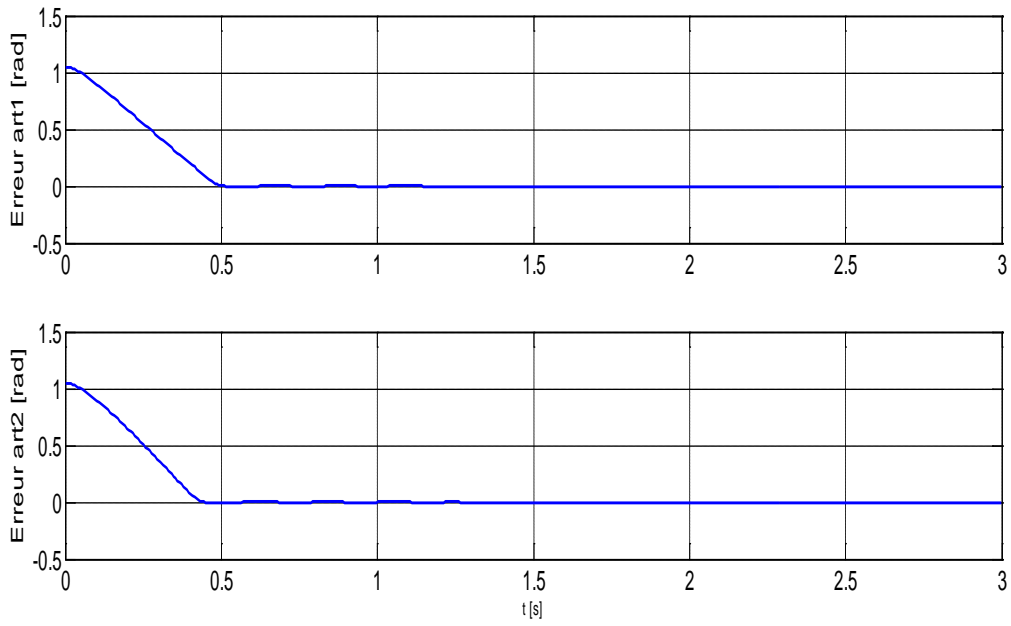
Les résultats de simulations sont montrés par les figures suivantes :



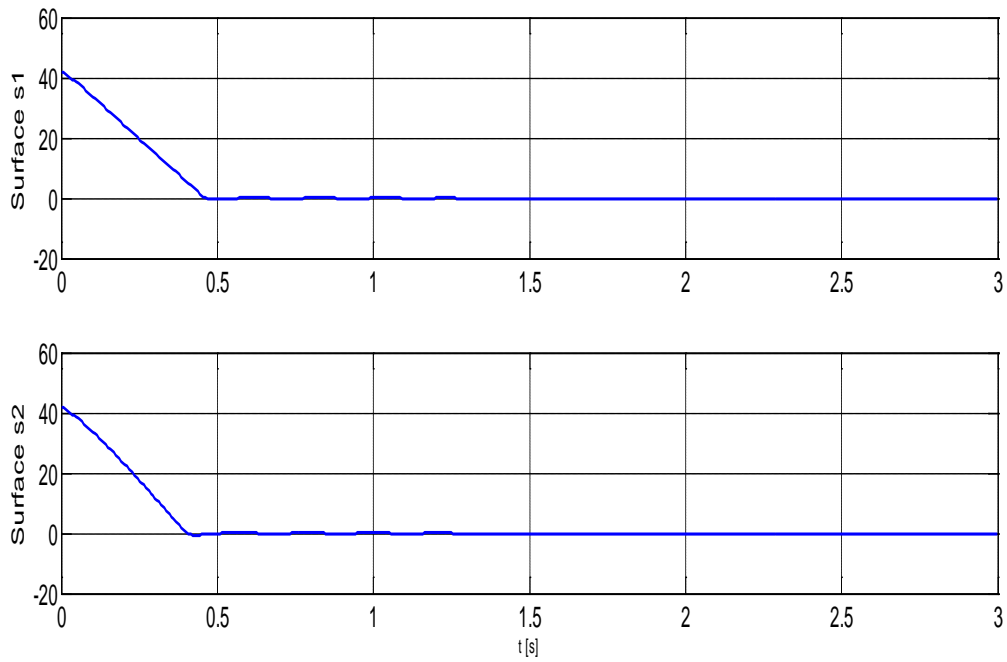
(a)



(b)



(c)

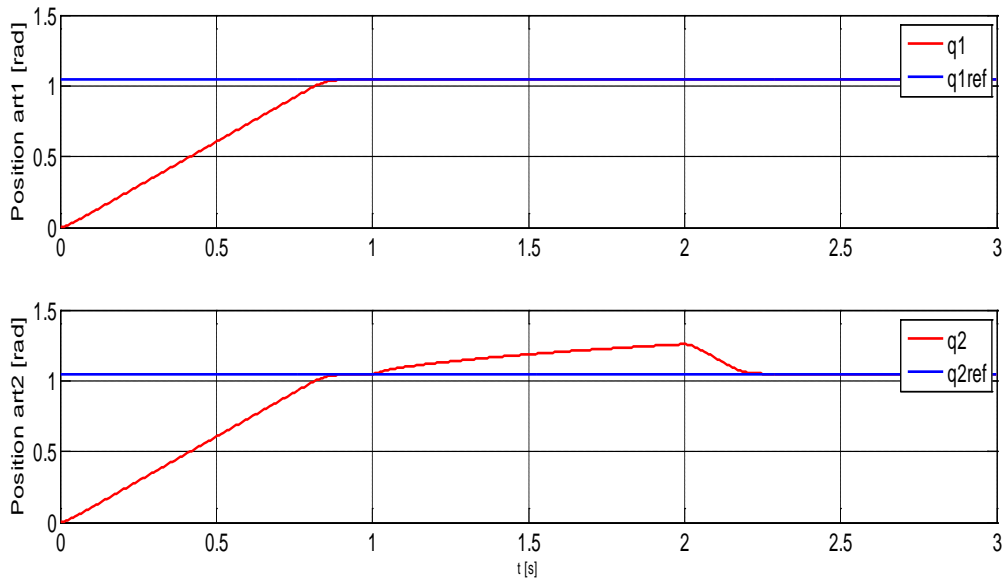


(d)

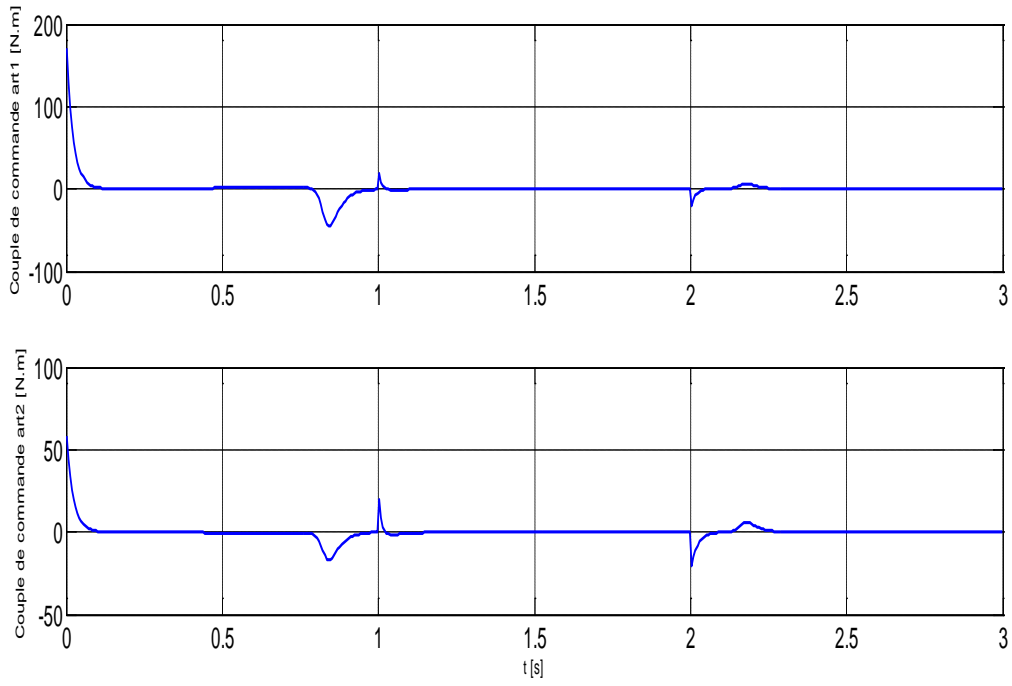
Figure 4.3 : Résultats de simulation dans le cas de la commande par modes glissants avec variation paramétrique.

b. présence des signaux perturbateurs :

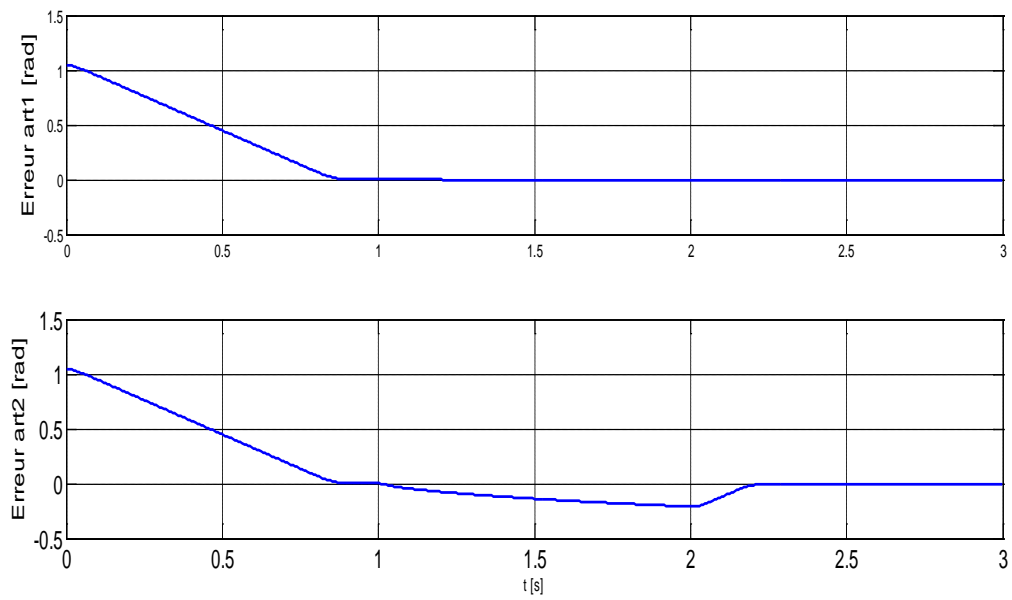
Ici nous avons injecté, sur les deux entrées de commande, une perturbation externe notée $d(t)$ constante d'amplitude égale à 20 à l'instant $t=[1,2]$ s. Les résultats de simulations sont montrés par les figures suivantes :



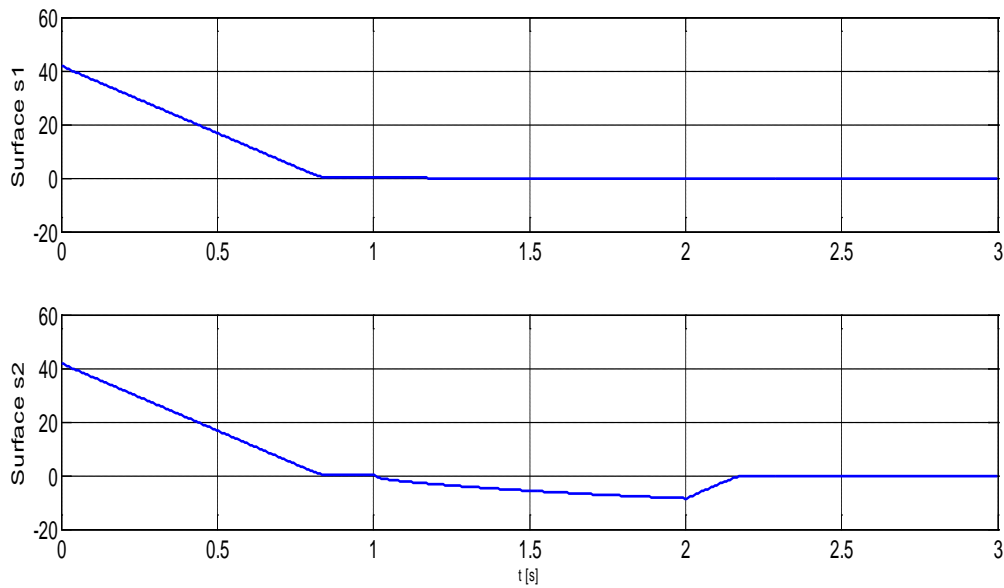
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4.4 : Résultats de simulation dans le cas de la commande par modes glissants avec signaux perturbateur.

3.3. Interprétations des résultats de simulations :

A travers la figure 4.1, on remarque que la commande par mode glissant conduit les trajectoires du système à suivre les trajectoires désirées avec un écart statique négligeable sur (q_1 et q_2). Nous constatons que les commandes sont fortement oscillantes à cause de chattering qui est important. Les surfaces de glissement convergent vers zéro avec la présence de chattering.

D'après la figure 4.2 on remarque qu'en remplaçant la fonction *sign* par la fonction *tanh* dans la fonction discontinu u_n (responsable de chattering) nous a bien permis d'avoir des améliorations, ces améliorations sont essentiellement l'élimination du phénomène de broutement et une meilleure poursuite des trajectoire.

A travers la figure 4.3 nous observons que les surfaces de glissement et les commandes u convergent toujours vers zéro sans le phénomène de broutement. Et aussi une augmentation d'amplitude à un certain moment pour la commande et cela pour compenser la perturbation. Cette perturbation paramétrique n'a pas affecté les performances de cette

commande par mode glissant. Ceci se traduit par la robustesse de cette approche vis-à-vis les variations paramétriques.

La figure 4.4 montre qu'en injectant la perturbation dans l'intervalle de temps [1,2]s, on observe la surface de glissement qui diverge complètement à cet instant. Nous notons aussi des pics qui apparaissent dans les commandes u_1 et u_2 . Ceci se traduit par le rejet rapide de perturbation. Ceci se traduit par la robustesse de cette approche vis-à-vis les signaux perturbateur.

D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure que la commande par mode glissant est très efficace et robuste.

4. Commande TDC :

On utilisant le modèle non linéaire (4.1)

4.1. Synthèse de la loi de commande :

On utilisant la loi de commande présentée dans le chapitre 3 :

$$u = v - Ke$$

$$v = B^+[A_m x + B_m r - F(x, t) - \hat{\Psi}(x, u, t)]$$

nous avons choisis le modèle de référence comme suit :

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -w_n^2 & 0 & -w_n^2 & 0 \\ 0 & -w_n^2 & 0 & -w_n^2 \end{bmatrix}$$

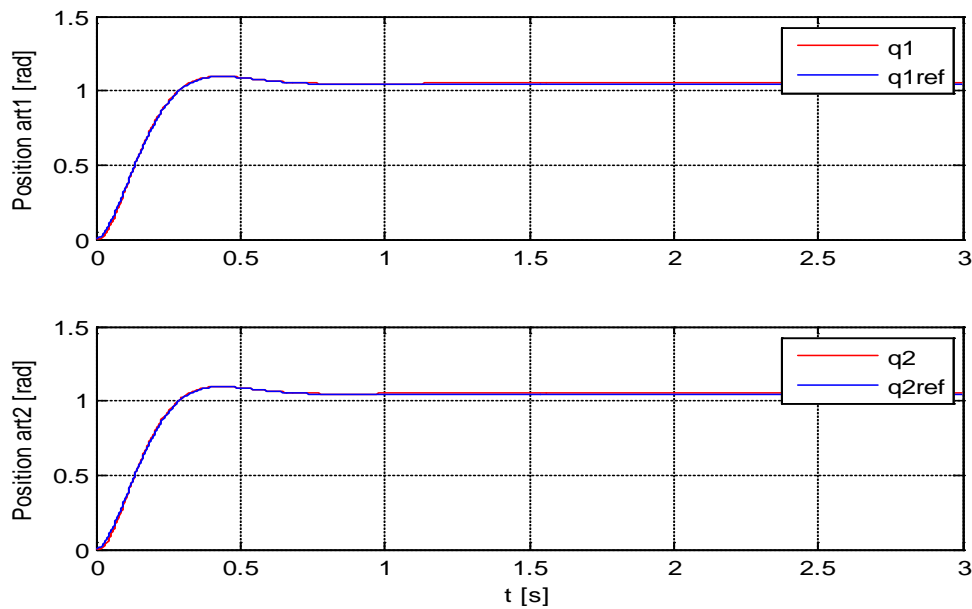
$$B_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -w_n^2 & 0 \\ 0 & -w_n^2 \end{bmatrix}$$

4.2. Résultats de simulations:

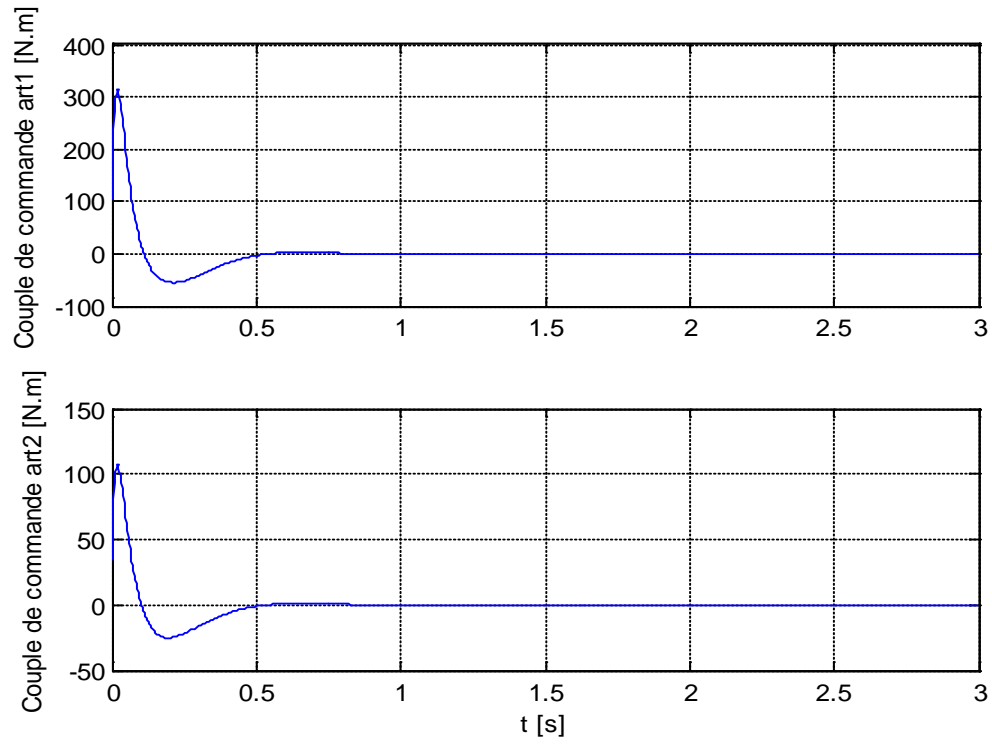
4.2.1. Résultats de simulations sans erreurs paramétrique

Les résultats de simulation sont donnés ci-dessous :

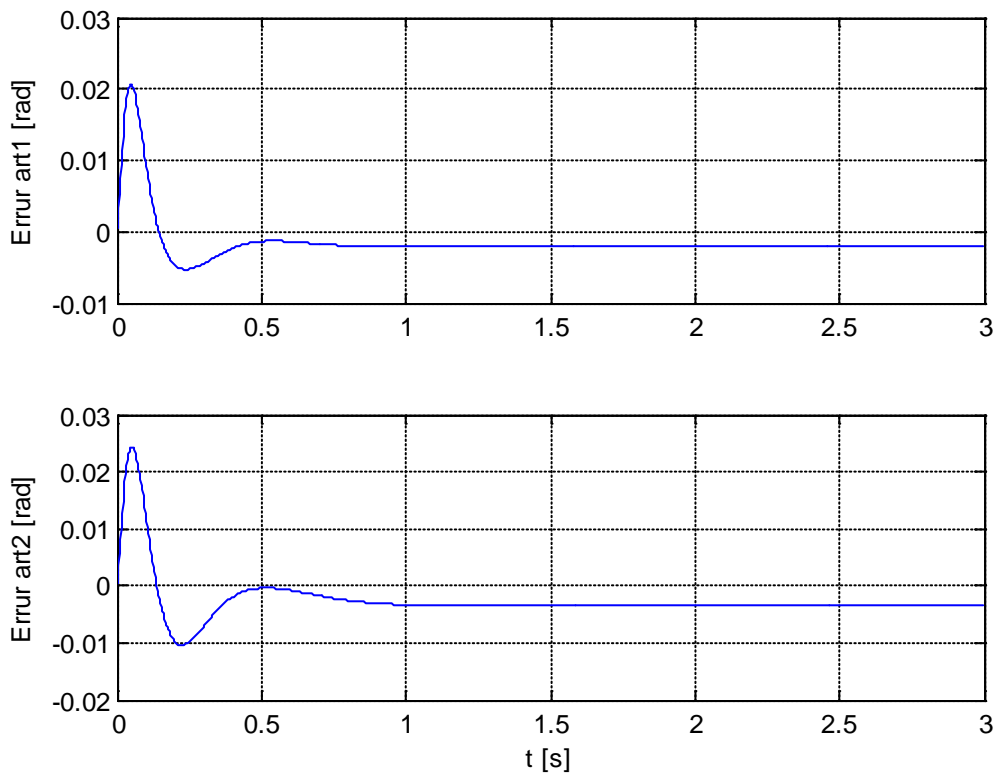
Les figures (4.5), (4.6) et (4.7) : (a) illustre les trajectoires des angles (q_1, q_{1ref}) et (q_2, q_{2ref}) successivement, (b) illustre les deux commandes u_1 et u_2 successivement, (c) représente les erreurs de poursuite des trajectoires de la 1er et la 2eme articulation successivement, (d) represent les courbes de l'estimateur ψ_{reel} et $\psi_{estimer}$ en fonction du temps.



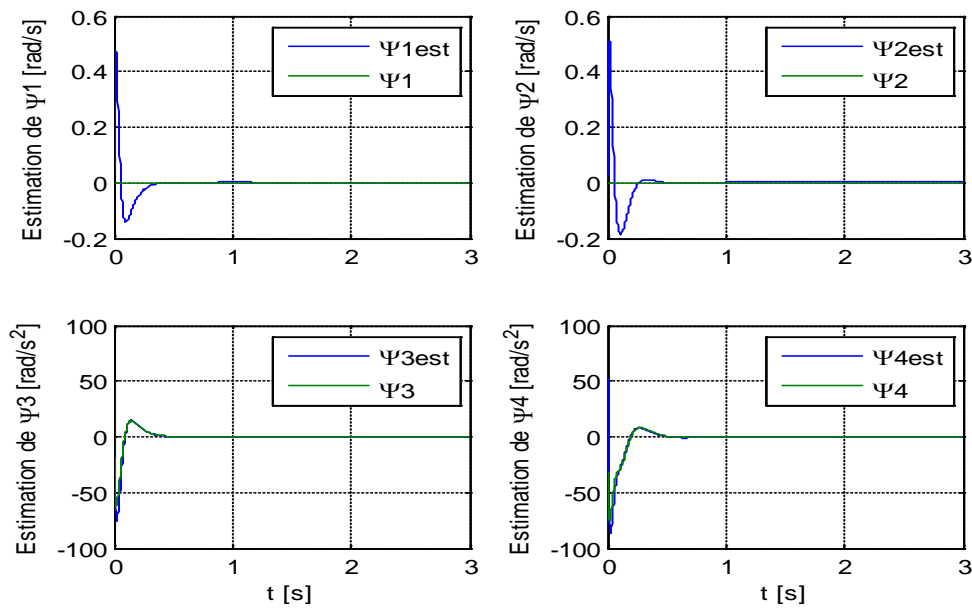
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4.5 : Résultats de simulation dans le cas de la commande TDC sans erreurs paramétriques.

A travers la figure ci-dessus on remarque que la commande TDC force le suivi des trajectoires désirées avec une erreur presque nulle, nous constatons que les trajectoires de commandes tendent vers zéro.

Notons que la commande TDC permet d'estimer les incertitudes, alors, les tests de robustesse sont faits uniquement par rapport aux perturbations extérieures.

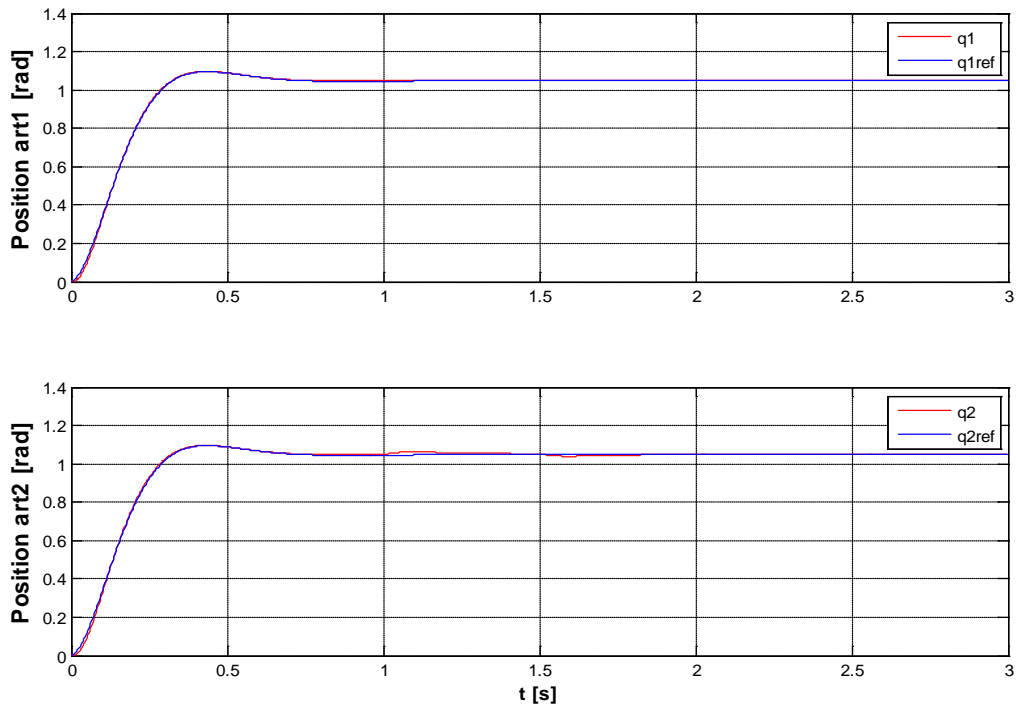
4.2.2. Test de robustesse (présence des signaux perturbateurs) :

Nous avons supposé que le vecteur F est incertain. Afin de tenir compte de cette incertitude, nous avons considéré dans la loi de commande le vecteur F comme suit

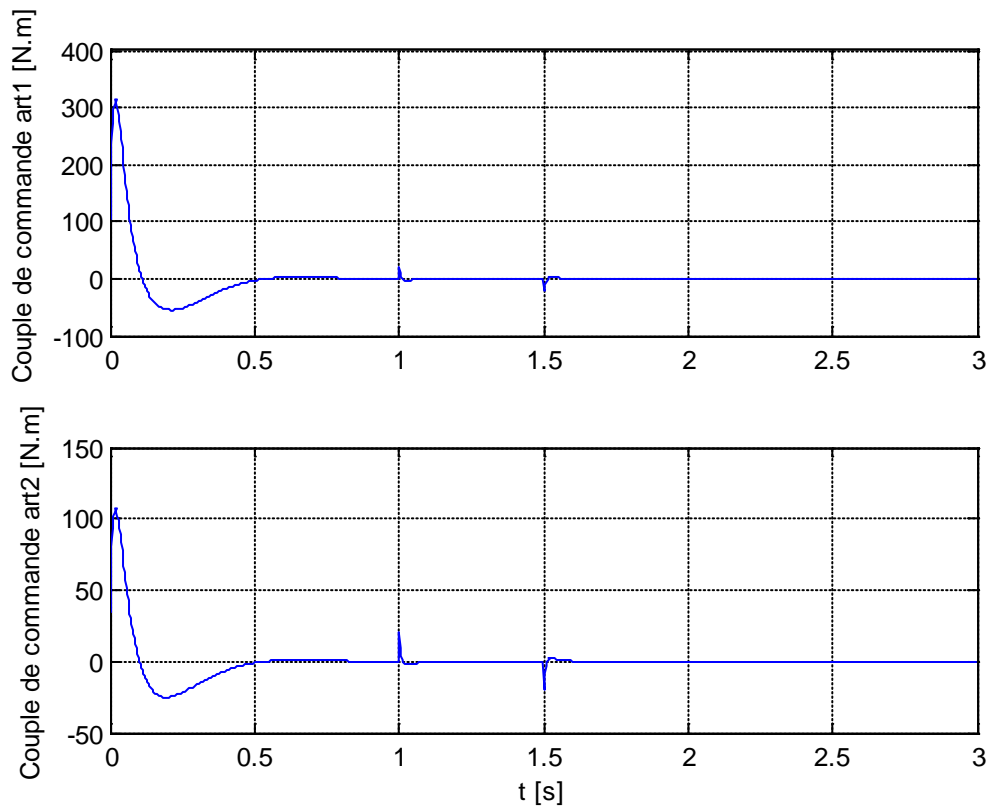
$$F = 0.8 \text{ } Freel$$

Où $Freel$ représente le vecteur F réel du système.

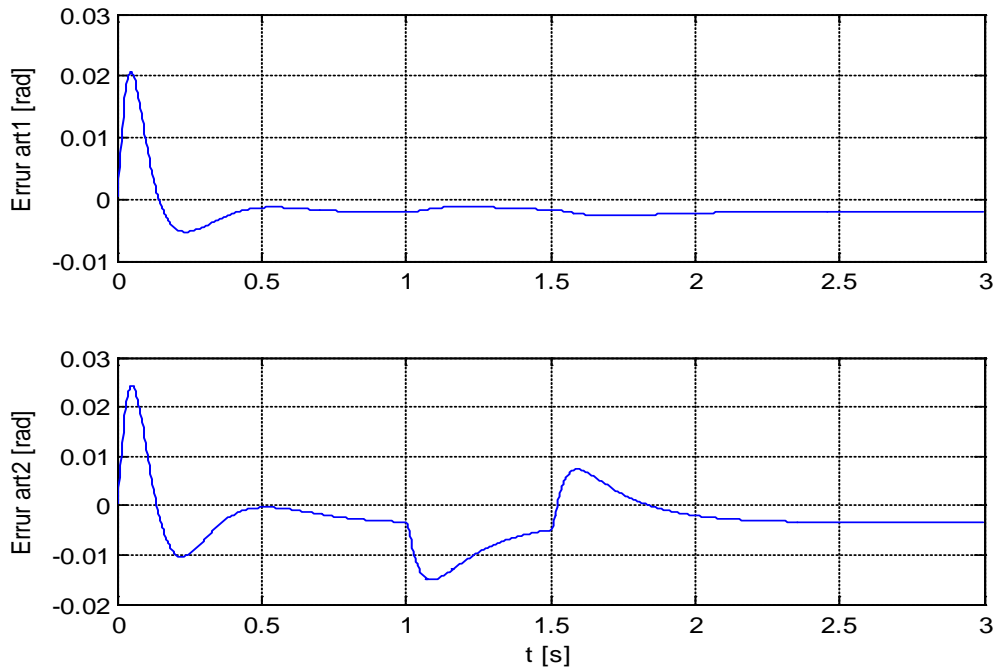
Les résultats de simulations sont montrés par les figures suivantes :



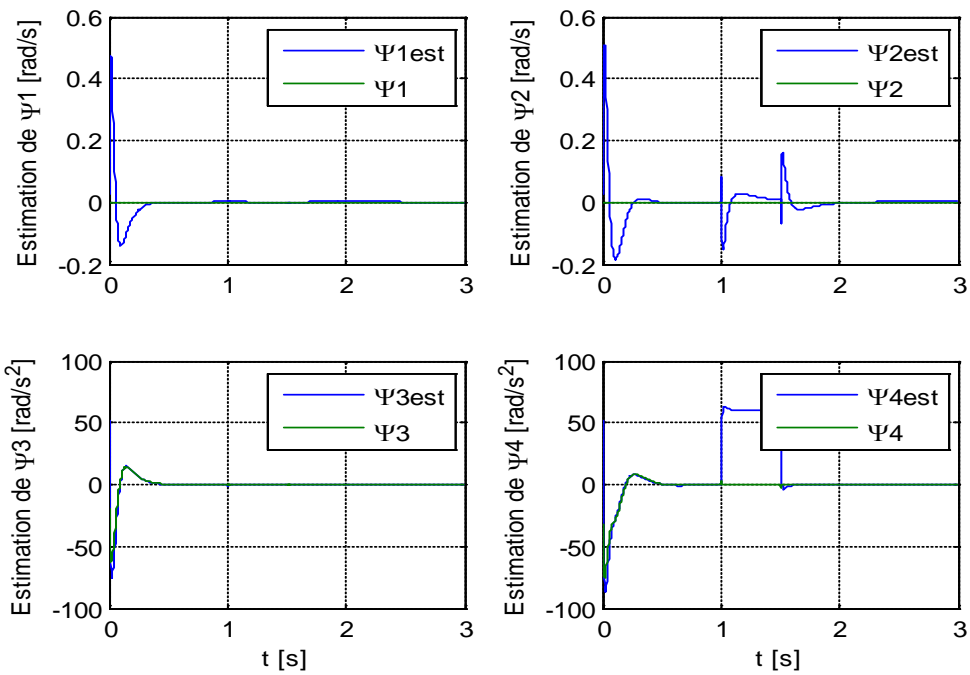
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4.7 : Résultats de simulation dans le cas la commande TDC avec signaux perturbateurs.

4.3. Interprétation des résultats:

La figure (4.5 *a*) montre une poursuite parfaite du modèle de référence. Cependant, nous constatons un écart statique au niveau de la position q_2 (fig. 4.5 *c*). Les deux commandes u_1 et u_2 convergent vers zéro (fig. 4.5 *b*).

Les incertitudes ψ sont aussi parfaitement estimées comme le montre la figure (4.5 *d*).

Le test de robustesse par rapport à la perturbation sur l'entrée a été concluant comme l'illustrent les figures (4.6). Effectivement, le système bouclé suit le modèle de référence avec les mêmes performances que dans le cas sans perturbations.

5. Conclusion :

Au vu des résultats de simulation obtenus des deux commandes étudiées, nous pouvons conclure les points suivants :

- La commande à mode glissante est une commande robuste passive dont l'avantage est la simplicité de la mise en œuvre. Elle permet d'atténuer l'effet des perturbations et des incertitudes de modélisation à condition que celles-ci ne dépassent pas un certain seuil.
- La commande à retard TDC est une commande robuste active. Elle permet de reconstruire les incertitudes en les estimant par le principe de convolution. Son inconvénient est la lourdeur de sa mise en œuvre. En effet l'estimation des incertitudes nécessitent l'acquisition en temps réel d'un volume d'information important.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Le projet que nous avons réalisé a porté sur l'étude de deux commandes robustes de type mode glissant d'ordre un et à retard de temps avec une application sur un bras manipulateur à deux degrés de liberté.

Au chapitre un, nous avons présenté les notions de bases de la robotique, nous avons ainsi exposé les différentes modélisations (géométrique, cinématique et dynamique). Nous avons détaillé le modèle dynamique d'un bras manipulateur à deux degrés de liberté qui est l'objet de notre application.

Au chapitre deux, le principe de la commande à mode glissant d'ordre un est exposé. Les performances de cette commande ont été étudiées.

Au chapitre trois, nous avons étudié la commande à retard TDC. C'est une commande robuste très récente qui permet d'estimer les incertitudes de modélisation et de les réinjecter dans la commande afin d'éliminer leurs effets.

Au dernier chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation obtenus sur la commande d'un bras manipulateur.

Les résultats obtenus pour les deux commandes ont permis d'illustrer la théorie étudiée.

L'avantage de la commande TDC est qu'elle permet d'estimer toutes incertitudes alors que la commande en mode glissant ne peut pas atténuer systématiquement n'importe qu'elle incertitudes, par contre son inconvénient majeur reste sa mise en œuvre qui est plus complexe que celle de la commande en mode glissant.

L'étude présentée dans ce mémoire n'est que préliminaire, une étude comparative très approfondie des deux commandes robustes est souhaitable.

Nous pouvons envisager d'autres perspectives comme l'utilisation de la commande TDC pour l'estimation des entrées inconnues dans les problèmes de diagnostic de défauts et de synchronisation de système chaotique.

Enfin, ce projet nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine de la commande des systèmes et d'aborder des thématiques récentes à travers les articles de recherche.

Références bibliographiques

Bibliographie

- [1] Spong M. W., Vidyasagar M, «Robot Dynamics and Control» , Quinn- Woodbine, USA, 1981.
- [2]bernard BAYLE « IVP Technologie avancées des sciences du vivant » UniversitéLouis.2002
- [3] Jean-Louis Boimond Université Angers, Robotique .2001
- [4] Khalil W., Dombre E., « Modélisation, Identification et commande des Robots », Paris, Hermes, 1999.
- [5] R. Merzouki, « Robotique industriel » , 2010/2011.
- [6] A.Isidori, « Nonlinear Control Systems », Springer-Verlag Communication and Control Engineering, ISBN 3-540-19916-0 3rd edition 1995.
- [7] HansruediBuhler, « réglage par mode glissement » presses Polytechniques Romandes Pasteur de strasbourg, années 2004-2005.
- [8] N. Djeghali, «Commande par mode glissant des systemes non linéaires à entrée retardée », mémoire de magister Université Mouloud Mammeri TiziOuzou, 2007.
- [9] V.I. Utkin, « Sliding modes and their application in variable structure systems »,Edition MIR, Moscow,1978.
- [10] J.J.E. Slotine, « Sliding controller design for nonlinear systems », Int. Jour. Of Cont., 40(2) : 421 .434, 1984.
- [11] S.Djennoune, « Cours Systemes Non Linéaire », Master 2 en Automatique, Université Mouloud Mammeri TiziOuzou, 2013/2014.
- [12] M. C. S. Alaoui : «Commande et Observateur par Modes glissants d'un système de pompage et d'un bras manipulateur», Thèse Doctorat, Université Sidi Mohammed Ben Abdallah, Faculté des scienceDhar El MahrezFés, 2009.
- [13] F.Plestan, « Quelques Contributions à la théorie de la commande par modes glissants », 2010.
- [14] K. Benmansour, « Realisation d'un banc d'essai de la commande et de l'observation des convertisseurs multicellulaires, Série : Approche Hybride », 2009.

- [15] Chun-Yi Su and Tin-Puileung, «A Sliding Mode Controller with Bound Estimation for Robot Manipulators», IEEE Trans. Robotics and Automation, VOL 9 ,1993.
- [16] Youcef-Toumi, K and Ito, O. « On Model Reference Control Using Time Delay for Nonlinear Plants with Unknown Dynamics » Massachusetts Institute of Technology Report , LMP/RBT 86-06. June, 1986.
- [17] Youcef-Toumi, K and Ito, O. « Controller Design for Systems with Unknown Dynamics» Proceeding of American Control Conference, Minneapolis, MN, June, 1987.
- [18] Youcef-Toumi, K and Ito, O. « Model Reference Control Using Time Delay for Nonlinear Plants With Unknown Dynamics», proceeding of international federation of Automatic Control World Congress, Munich Federal Republic of Germany, July 1987.
- [19] Youcef-Toumi, K and Ito, O. « Controller Design for Systems with Unknown dynamics » Proceeding of American Control Conference, Atlanta, GA, June, 1988. And, ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement and control.
- [20] Youcef-Toumi, K and Reddy, S. «Stability of Time Delay Control With Application to High Speed High Precision Magnetic bearings» to the 1990 IEEE Conference on Decision and Control.
- [21] Youcef-Toumi, K and Fuhlbrigge, T. « Application of a Decentralized Time Delay Controller to Robot manipulators» Proceeding of the 1989 IEEE Conference on robotics and automation.
- [22] Youcef-Toumi, K. « Control of Systems with Unknown Dynamics with Application to Robot Manipulators» M.I.T Laboratory for Manufacturing and Productivity, report No.90-003, March 1990.

Résumé :

Pour qu'un robot accomplisse la tâche qu'on lui assigne, il faut concevoir une commande bien adaptée. La commande choisie doit être capable de surmonter les variations paramétriques et les perturbations engendrées par la forte dynamique du robot. C'est dans ce cadre que nous allons aborder la problématique de notre projet de fin d'étude en introduisant la notion de la commande par mode glissant et la commande à retard TDC (time delay control).

La commande par mode glissant est une technique de commande non linéaire. Elle est caractérisée par sa robustesse vis-à-vis des incertitudes paramétriques du modèle, et certaines perturbations extérieures.

La commande TDC introduite dans les années 90 est aussi une technique de commande non linéaire robuste. Le principe de la commande à retard repose sur la possibilité d'estimer les incertitudes présentes dans le système par des informations passées et mesurées. L'estimation des incertitudes utilise la convolution. Cette estimation est ensuite exploitée par la commande afin d'imposer au système de suivre un modèle de référence.

L'objectif de notre travail est d'étudier et de comparer les deux techniques de commande. Cette étude et cette comparaison sont effectuées sur un exemple d'application qui est celui de la commande d'un bras manipulateur.