

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMARI, Tizi-Ouzou



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'Automatique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme

MASTER ACADEMIQUE EN AUTOMATIQUE
OPTION : COMMANDE DES SYSTEMES

Thème

*Commande par Non Singular terminal sliding mode
flou d`un robot manipulateur à 2 D.D.L*

Proposé et encadré par : Dr. A.REZOUG

Dr. R.MELLAH

Présenté par : HAMADI Idir
OUERD Azeddine

Président de jury : S. Djennoune

Soutenu le 2 juillet 2013

Promotion 2013

DEDICACES

À la mémoire de mon grand père.

À mon PÈRE et à ma MÈRE, les mots ne suffisent pas pour vous remercier assez, j'espère seulement que j'ai pu réaliser l'un de vos rêves en poursuivant mes études.

À mes SŒURS, chacune a contribué à sa manière à la réalisation de ce travail.

A tous mes ami(e)s qui m'ont toujours soutenue.

AZEDINE

À la mémoire de mon grand père et ma grand-mère.

À mon PÈRE et à ma MÈRE, les mots ne suffisent pas pour vous remercier assez, j'espère seulement que j'ai pu réaliser l'un de vos rêves en poursuivant mes études.

À mes SŒURS, chacune a contribué à sa manière à la réalisation de ce travail.

A tous mes ami(e)s qui m'ont toujours soutenue.

IDIR

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier, en premier lieu, Le docteur **REZOUG Amar**, de nous avoir accueillis au sein de centre recherche CDTA, pour l'aide qu'il nous a apportée et pour sa disponibilité tout au long de ce travail.

Nos remerciements vont également à notre promoteur R.Mellah qui nous a soutenu et conseillé tout au long de notre travail.

Nous remercions également Mr k.Saidi, pour toute l'aide que nous avons reçue gracieusement de sa part.

Nous remercions aussi Mr. S.Djennoune pour toute l'aide qu'il nous a apportée pour l'accomplissement de ce travail.

SOMMAIRE



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

Chapitre I: Définition et modélisation des bras manipulateurs

I.1.	Introduction	3
I.2	Quelques notions de base sur robotique.....	3
I.2.1	Degré de liberté	3
I.2.2	Articulations.....	3
I.2.3	Coordonnées homogène.....	4
I.2.3.1.	Représentation d'un point	4
I.2.3.2.	Représentation d'une direction	4
I.2.3.3.	Représentation d'un plan.....	4
I.2.4	Transformation homogène	4
I.2.4.1.	Transformation des repères	5
I.2.4.2.	Matrice de rotation.....	6
I.2.5	Notion de torseur	6
I.3.	Les différents types de modélisation d'un bras manipulateur	7
I.3.1	modélisation géométrique	7
I.3.2	modélisation cinématique	7
I.3.3	modélisation dynamique	7
I.3.3.1	Les formalismes de Lagrange Euler.....	8
I.3.3.2	Modélisation dynamique d'un bras manipulateur à 2d.d.l.....	9
I.4	Conclusion.....	12

Chapitre II: Théorie de la commande par mode glissant et par la logique floue

II.1	Introduction	13
II.2	Les systèmes à structure variable	13
II.2.1	Configuration de base des SSV.....	13
II.2.2.1	Configuration avec changement de la structure par commutation d'une contre-réaction d'état variable	13

II.2.2.2	Configuration avec changement de la structure par commutation au niveau de l'organe de commande.....	14
II.3	Mode glissant classique.....	15
II.3.1	Synthèse de la commande robuste par mode glissant	16
II.3.2	Choix de la surface de glissement.....	16
II.3.2.1	Condition d'existence d'une surface de glissement.....	16
II.3.3	Synthèse de la loi de commande	17
II.3.4	Le phénomène du chattering.....	18
II.3.5	Remplacement de la fonction sign par une fonction continue.....	18
II.4	Commande par Terminal Sliding Mode (TSM).....	21
II.4.1	Propriétés du TSM.....	21
II.4.2	Synthèse de la loi de commande	22
II.4.3	Stabilité de la commande TSM.....	23
II.5	Commande par le terminale mode glissant non singulier (NSTSM).....	23
II.5.1	Propriétés du NSTSMC	24
II.5.2	Synthèse de la loi de commande	24
II.5.3	Stabilité de la commande NSTSMC	24
II.6	Logique floue	26
II.6.1	Bref historique.....	26
II.6.2	Principe de la logique floue	27
II.6.2.1	Variables floues	27
II.6.2.2	Inférence floue.....	28
II.6.2.3	Opérateurs flous.....	28
II.6.3	Structure interne d'un système d'inférence flou (SIF)	29
III.6.3.1	Fuzzification.....	29
II.6.3.2	Défuzzification.....	30
II.7	Conclusion.....	32

Chapitre III Commande d'un bras manipulateur à 2 DDL par FNSTSMC

III.1	Introduction :.....	33
III.2	Construction du contrôleur :.....	33

III.2.1	Le contrôleur NSTSMC (le contrôleur Non Singular Terminal Sliding Mode) :	33
III.2.2	Le contrôleur TDENSTSMC (time-delay estimation terminal mode glissant non singulier) :	37
III.2.3	Le contrôleur FTDENSTSMC (Fuzzy time-delay estimation non singular terminale sliding mode contrôle) :	40
II.3	CONCLUSION	43

Chapitre IV Résultats de simulations des commandes développées

IV.1	Introduction	44
IV.2	Résultats de simulations des commandes développées	44
IV.2.1	Résultat de simulation en mode régulation	44
IV.2.1.1	Condition de la simulation	45
IV.2.1.2	Résultats de simulation	45
IV.2.1.3	Interprétations des résultats	48
IV.2.2	Résultats de simulation des commandes développées pour le cas bras manipulateur en mode poursuite de trajectoire	48
IV.2.2.1	Condition de simulation	50
IV.2.2.2	Résultats de simulation	50
IV.2.2.3	Interprétation des résultats	51
IV.3	Conclusion :	51
	Conclusion générale	52
	Bibliographie	54
	Liste des figures	56

INTRODUCTION

GENERALE

GENEVA

A travers l'histoire de l'humanité, l'innovation vient souvent de la nécessité de l'homme à améliorer ses conditions de vie, Le robot permet à l'homme une grande facilité de manipuler des tâches qui lui sont pénibles, et des fois, impossible d'y accéder comme par exemple mesurer la température au sein d'un réacteur nucléaire, ou bien effectuer une intervention chirurgicale, etc....

Comme pour tous autres systèmes, Afin d'élaborer d'une commande pour un bras manipulateur, il faut à priori avoir son modèle mathématique. En plus de la présence des couplages entre les entrées/sorties et les dynamiques fortement non linéaires, son modèle a des paramètres qui peuvent varier dans le temps du fait de changement de la charge, de la configuration et de la vitesse du mouvement, etc

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 qu'on nous allons aborder la problématique de notre PFE en introduisant la notion de la commande à structure variable par mode glissant (Sliding Mode Control en Anglais). Le mode glissant est réputé pour sa robustesse vis-à-vis des perturbations externe et les incertitudes paramétriques ainsi que les erreurs de modélisation.

La commande par mode glissant classique, pose le problème de non convergence en temps fini. Pour pallier à ça, les chercheurs ont introduit une version améliorée de cette approche ayant pour titre "Terminal Sliding Mode [27]. Ce dernier a effectivement pallié au problème de non convergence en temps fini, mais en contrepartie il a causé un problème dit de singularité. A ce fait, une version plus améliorée du mode glissant nous a permis de surmonter la contrainte de singularité, cette approche est appelée << Non Singular Terminal Sliding Mode >>.

La commande par Non Singular Terminal Sliding Mode nous a permis d'avoir une convergence en temps fini et une robustesse vis-à-vis des perturbations et les incertitudes paramétriques. Le phénomène de broutement reste l'inconvénient majeur de cette commande, pour le circonvenir, nous avons fait appel à un contrôleur flou.

Ce travail comprendra quatre chapitres :

-Le premier chapitre sera consacré aux notions de base de la modélisation, il décrira les différentes modélisations d'un bras manipulateur. Il donnera à la fin le modèle dynamique à 2 d.d.l d'un bras manipulateur.

-Le deuxième chapitre sera dédié à la présentation de la théorie de la commande par mode de glissement et par la logique floue.

- Le troisième chapitre sera consacré à la commande d'un bras manipulateur à 2 DDL par Non Singular Terminal Sliding Mode Flou.

-Le quatrième chapitre sera pour objectif de présenter les résultats de simulations des commandes développées, ainsi que les tests de robustesse.

Enfin, on terminera par une conclusion générale.

Chapitre I

DEFINITION ET

MODELISATION D'UN

BRAS MANIPULATEUR

BRAS MANIPULATEUR

MODELISATION D'UN

I.1. Introduction

Pour commander le comportement d'un système mécanique articulé (robot), on doit disposer d'un modèle à plusieurs niveaux de modélisation selon les objectifs, les contraintes de la tâche à réaliser et les performances recherchées.

Les niveaux de modalisation des systèmes robotisés peuvent être résumés comme suit :

- 1) Les modèles géométriques directs et inverses expriment la situation de l'organe terminal en fonction des variables articulaires et inversement.
- 2) Les modèles cinématiques directs et inverses expriment les vitesses de l'organe terminal en fonction des variables articulaires et inversement.
- 3) Les modèles dynamiques expriment les équations du mouvement du robot qui permettent d'établir les relations entre les couples ou forces exercées par les actionneurs et les positions, vitesses et accélérations des articulations [1].

I.2 Quelques notions de base sur la robotique

I.2.1 Degré de liberté

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

I.2.2 Articulations

L'articulation est une liaison entre deux corps successifs, on distingue deux types articulations :

➤ **Articulation rotoïde**

Il s'agit d'une articulation de type pivot, 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, 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 les articulations

simples. Une rotule par exemple est obtenue avec trois articulations rotoïdes dont les axes sont concourants[2].

I.2.3 Coordonnés homogène

I.2.3.1. Représentation d'un point

Soit M un point de l'espace.

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

$$\vec{OM} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$$

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

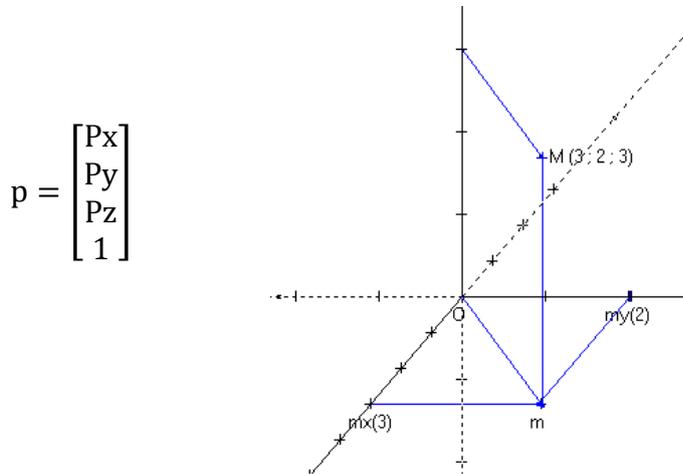


Figure [I.1] Représentation d'un point dans l'espace.

I.2.3.2. Représentation d'une direction

La représentation d'une direction (vecteur libre) se fait par quatre composantes, mais le quatrième est nul 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 [8] :

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

I.2.3.3. Représentation d'un plan

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

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

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

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

I.2.4 Transformation homogène

I.2.4.1. Transformation des repères

Faisons subir une transformation de translation et/ou de rotation, du repère R_i , vers le R_j . Cette transformation est définie par la matrice ${}^i T_j$ appelée matrice de transformation homogène de dimension (4x4), telle que:

$${}^i T_j = \begin{bmatrix} {}^i s_j & {}^i n_j & {}^i a_j & {}^i p_j \\ s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1.3)$$

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 [2] [10].

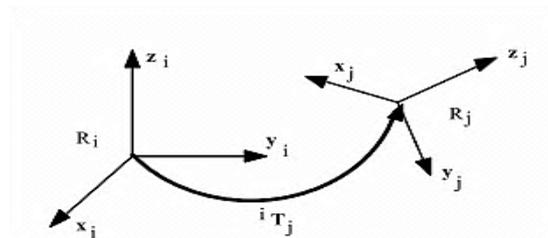


Figure [I.2] Transformation des repères.

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

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

Avec :

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

- iP_j est le vecteur de translation.

I.2.4.2. Matrice de rotation

Les trois matrices de rotation sont définies comme suit [3] :

Matrice de rotation par rapport à l'axe x

$$\text{ROT}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1.5)$$

Matrice de rotation par rapport à l'axe y

$$\text{ROT}(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1.6)$$

Matrice de rotation par rapport à l'axe z

$$\text{ROT}(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1.7)$$

I.2.5 Notion de torseur

Un torseur est constitué de deux champs vectoriels :

- un champ uniforme, dont la valeur en tout point est nommée résultante, notée \vec{R} .
- le champ des moments, dont la valeur en un point P est notée \vec{M}_P .

Ces deux champs sont reliés par la relation de Varignon : $\vec{M}_P = \vec{M}_0 + \vec{R} \wedge \vec{OP}$

Pour définir un torseur, il suffit donc de connaître sa résultante et son moment en un point. On écrit alors :

$$r = \begin{cases} \vec{R} \\ \vec{M}_0 \end{cases} \dots \dots \dots (1.8)$$

I.3. modélisation d'un bras manipulateur

I.3.1 modélisation géométrique

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

- Modèle géométrique direct.
- Model géométrique inverse.

Afin d'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 bras manipulateur. L'étude des mouvements des corps revient alors à l'étude des mouvements des repères.

I.3.2 modélisation cinématique

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

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

I.3.3 modélisation dynamique

Les modèles dynamiques des bras manipulateurs sont décrits par un ensemble d'équations mathématiques qui portent des informations dynamiques de ces robots. 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 :

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

$$\Gamma = F(q, \dot{q}, \ddot{q}) \dots \dots \dots (1.9)$$

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

$$\dot{q} = G(q, \ddot{q}, \Gamma) \dots \dots \dots (1.10)$$

Dans cette partie on utilise le formalisme de Lagrange[4] [3] [6].

I.3.3.1 Les formalismes de Lagrange Euler

Le formalisme d'Euler-Lagrange amène à un algorithme qui consiste à présenter les équations dynamiques du mouvement. L'approche d'Euler-Lagrange sert à modéliser et à présenter la dynamique du robot à travers les équations du mouvement. L'approche d'Euler-Lagrange est donnée par l'équation (1.11)

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{q}_i} = \tau_i \dots \dots \dots (1.11)$$

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

$$L = E_c - E_p \dots \dots \dots (1.12)$$

Avec : E_c : L'énergie cinétique.

E_p : L'énergie potentielle.

I.3.3.2 Modélisation dynamique d'un bras manipulateur à 2d.d.l

Le robot manipulateur à 2 d.l.l utilisé dans ce travail est schématisé dans la figure suivante [1.3]

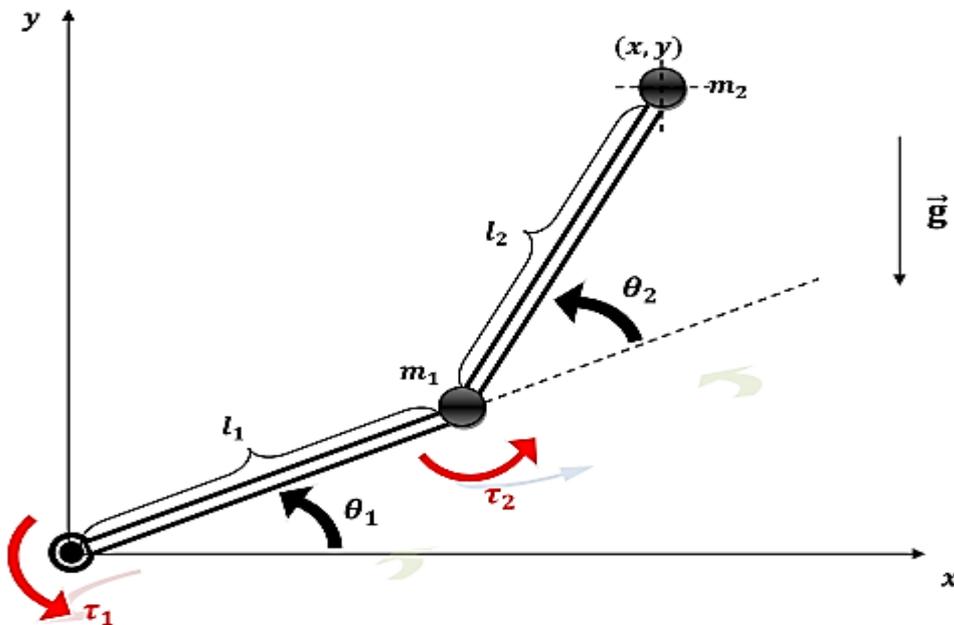


Figure [I.3]: Robot manipulateur à 2 d.d.l.

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

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

On admettra que les masses des tiges composant le robot sont concentrées en leurs extrémités. Le robot manipulateur est commandé en couple τ_1 et τ_2 fournis par les actionneurs dont on négligera la dynamique.

Les coordonnées cartésiennes sont :

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

L'utilisation de la méthode de Lagrange conduit à la forme standard de l'équation du mouvement d'un robot manipulateur qui se présente sous la forme suivante :

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \dots \dots \dots (1.13)$$

Avec :

- **Matrice d'inertie $M(q)$**

$M(q)$ est symétrique définie positive.

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

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

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

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

- **Vecteur de gravité $G(q)$**

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

g_b : Étant une fonction scalaire constante.

- **Energie cinétique**

L'énergie cinétique du bras manipulateur à 2ddl (figure [I.3]) est donnée comme suit :

$$E_c = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)l_1^2\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}m_2l_2^2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2l_1l_2\dot{\theta}_1(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 \dots \dots \dots (1.14)$$

• **Energie potentielle**

La seule source d'énergie potentielle est la gravitation. L'énergie potentielle du bras manipulateur à 2ddl (figure [I.3]) est donnée comme suit :

$$E_p = (m_1 + m_2)g l_1 \sin \theta_1 + m_2gl_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \dots \dots \dots (1.15)$$

• **Lagrangien du système**

$$L = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)l_1^2\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}m_2l_2^2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2l_1l_2\dot{\theta}_1(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 - [(m_1 + m_2)g l_1 \sin \theta_1 + m_2gl_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] \dots \dots \dots (1.16)$$

L'application de formalisme de Lagrange (1.14) sur le système (1.18) amène à l'équation suivante :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_1} = \tau_1 \\ \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_2} = \tau_2 \end{cases} \dots \dots \dots (1.17)$$

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

• $\tau_1 = [(m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2 \cos \theta_2]\ddot{\theta}_1 + [m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos \theta_2]\ddot{\theta}_2 - m_2l_1l_2\dot{\theta}_2(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 + (m_1 + m_2)gl_1 \cos \theta_1 + m_2gl_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \dots (1.18)$

• $\tau_2 = [m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos \theta_2]\ddot{\theta}_1 + [m_2l_2^2]\ddot{\theta}_2 + m_2l_1l_2\dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 + m_2gl_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \dots \dots \dots (1.19)$

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

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

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_2 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 \\ m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (m_1 + m_2) g l_1 \cos \theta_1 + m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1.20) \end{aligned}$$

On identifie les différents termes de l'équation (1.13) comme suit:

$$M(q) = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2) l_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 & m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 \\ m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 & m_2 l_2^2 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1.21)$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_2 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 \\ m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1.22)$$

$$V_m(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -2m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \sin \theta_2 & -m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\ m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 & 0 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1.23)$$

$$\begin{aligned} & G(q) \\ & = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2) g l_1 \cos \theta_1 + m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1.24) \end{aligned}$$

I.4 Conclusion

Les notions de base de la modélisation des robots manipulateurs ont été données au début de ce chapitre. La modélisation d'un robot manipulateur à 2 ddl qui est le sujet de ce mémoire a été détaillée et à la fin de ce chapitre le modèle dynamique a été donné.

Chapitre II

THEORIE DE LA
COMMANDE PAR MODE
GLISSANT ET PAR LA
LOGIQUE FLOUE
FONCTIONNELLE
GLISSANT ET PAR LA

II.1 Introduction

La commande classique des systèmes utilisant les régulateurs à action proportionnelle, intégrale et dérivée permet de commander avec précision des processus linéaires non perturbés à paramètres constants. Lorsque le système à commander est soumise à des perturbations et à des variations paramétriques, une solution adaptative par réajustement des paramètres des régulateurs, permet de conserver des performances fixées à l'avance. L'inconvénient de cette solution consiste en la nécessité d'une mise en œuvre souvent complexe. Nous présentons une seconde solution plus simple, où nous faisons appel à une classe particulière de systèmes de commande appelée systèmes à structure variable par mode glissant.

Pour profiter des avantages de la commande à structure variable, il faut trouver une méthode pour remédier au problème de chattering. Alors on a proposé l'usage des systèmes d'inférence floue. Dans ce chapitre nous présentons la théorie de la commande par mode de glissement et de la logique flou [16] [17].

II.2 Les systèmes à structure variable

Les Systèmes à Structures Variables (VSS) sont connus pour leur robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et les perturbations externes. La commande par SSV a été appliquée sur nombreux systèmes à savoir ;les robots, les moteurs (DC et AC), exe [19].

II.2.1 Configuration de base des SSV

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

II.2.2.1 Configuration avec changement de la structure par commutation d'une contre-réaction d'état variable

Le système à possède une grandeur de commande U et une grandeur de sortie y . Son comportement dynamique est décrit par le vecteur d'état X_s . Ce dernier est mis en contre-réaction soit par le vecteur $-k_{r1}$ ou par $-k_{r2}$ selon la position du commutateur. La tension de commande U_c est amenée à l'Organe de Commande (OC) qui fournit la grandeur de commande [16].

Le choix de la contre-réaction par $-k_{r1}$ ou $-k_{r2}$ se fait à l'aide de la loi de commutation U également en fonction de X_s [16].

On a:

$$U = \begin{cases} -k_{r1}x_s & \text{si } S(x) > 0 \\ -k_{r2}x_s & \text{si } S(x) < 0 \end{cases} \dots \dots \dots (2.1)$$

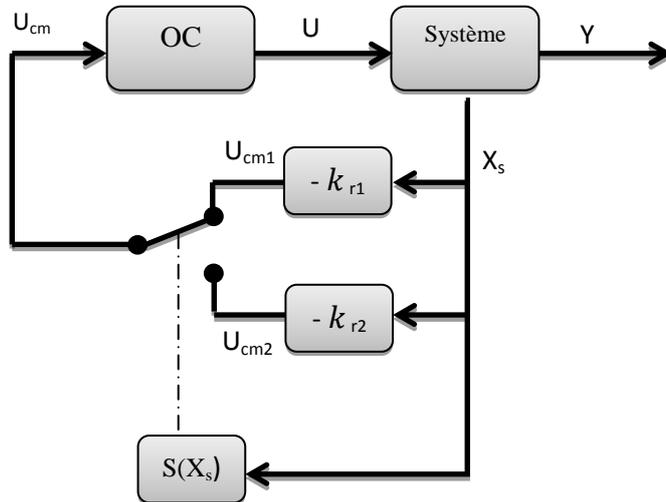
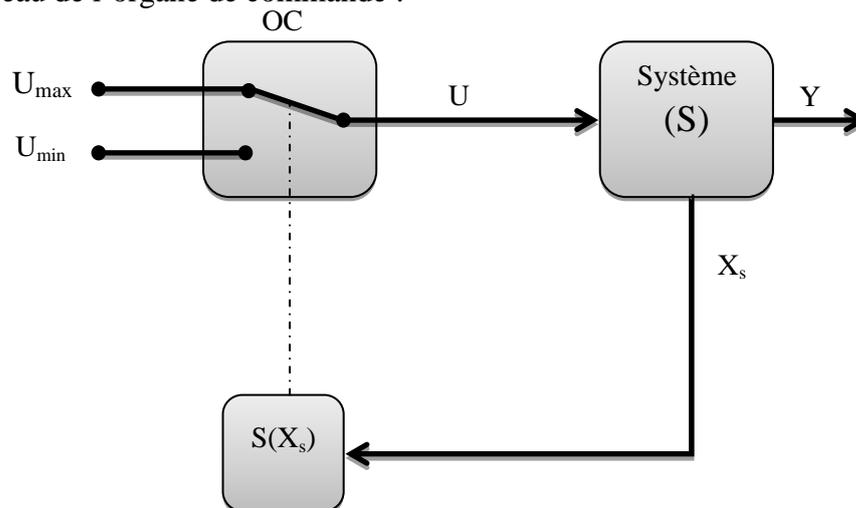


Figure [II.1] changement de structure avec commutation entre deux retours.

II.2.2.2 Configuration avec changement de la structure par commutation au niveau de l'organe de commande

La figure [II.2] montre le changement de la structure du contrôleur, ceci par la commutation au niveau de l'organe de commande :



Figure[II.2] Changement de la structure du contrôleur par la commutation au niveau de l'organe de commande.

Seul le signe de la fonction de la surface de $S(x)$ est suffisant pour générer la commande de l'ouverture ou de fermeture de l'interrupteur pilotant le système commandé. Dans ce cas la loi de commande est formulée comme suit :

$$u = \begin{cases} -U_{\max} & \text{si } S(x) > 0 \\ -U_{\min} & \text{si } S(x) < 0 \end{cases} \dots \dots \dots (2.2)$$

II.3 Mode glissant classique

Cette partie est consacrée à une présentation de la commande par modes glissants. Dans un souci de clarté, les systèmes considérés ici sont non linéaires, continus, mono-entrée mono-sortie (SISO). Cette partie se restreint à la commande par mode glissant d'ordre 1, telle qu'originellement introduite par Utkin.

La commande par mode glissant est une technique de commande non linéaire, caractérisée par la discontinuité de la commande aux passages par une surface de commutation appelée surface de glissement. La loi de commande discontinue est utilisée pour forcer le système à rester sur cette surface. D'où le phénomène de glissement est représenté comme suit [16] [20] :

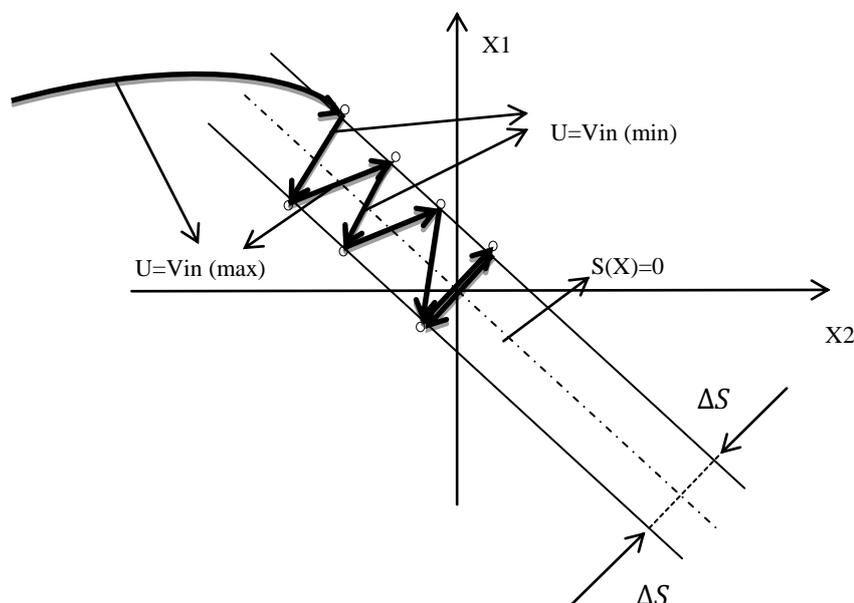


Figure [II.3]:Établissement du glissement

II.3.1 Synthèse de la commande robuste par mode glissant

La mise en œuvre d'une commande en mode glissant peut être effectuée en trois étapes principales[22] :

- choix de la surface de glissement.
- Détermination de la loi de commande.
- Cette commande doit être stable au sens de Lyapunov.

II.3.2 Choix de la surface de glissement

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

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

$$S(x, t) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right)^{n-1} e \dots \dots \dots (2.3)$$

Où : λ est un scalaire positif qui représente la pente de la surface de glissement.

n : est le degré relatif du système commandé généralement égale à 2.

II.3.2.1 Condition d'existence d'une surface de glissement

Il existe deux conditions pour assurer le mode de convergence :

➤ Fonction discrète de la commutation

C'est la première condition de convergence, proposée par EMIYANOVE et UTKIN. Il s'agit de donner à la surface une dynamique de convergence vers zéro en respectant cette condition suivante :

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

Cette condition peut être formulée comme suit :

$$\dot{S}(x) \cdot S(x) < 0 \dots \dots \dots (2.5)$$

➤ Analyse de stabilité par la fonction de Lyapunov

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

La loi de commande doit faire décroître ($\dot{V}(x) < 0$) afin de garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur référence. Dans le cas de la commande par mode glissant classique, la fonction du Lyapunov candidate est donnée généralement par l'équation suivante [23] [24]:

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \dots \dots \dots (2.6)$$

La dérivée de cette fonction est :

$$\dot{V}(x) = \dot{S}(x) \cdot S(x) \dots \dots \dots (2.7)$$

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

II.3.3 Synthèse de la loi de commande

La structure d'un contrôleur par mode glissant est constituée de deux parties : la commande équivalente (U_{eq}) et la commande discontinue (U_n).

D'où
$$U = U_{eq} + U_n \dots \dots \dots (2.8)$$

U_{eq} 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 trouver l'expression analogique de la commande U [25].

Soit
$$S(x, t) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda\right)^{n-1} e \dots \dots \dots (2.9)$$

D'où
$$\dot{S}(x, t) = c_1 \dot{e} + c_2 \ddot{e} + \dots \dots \dots + c_{n-1} e^{(n-1)} + e^{(n)}$$

$$= \sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} + x^{(n)} - x_d^{(n)}$$

$$= \sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} + f(x, t) + g(x, t)U - x_d^{(n)}$$

$$\dot{S}(x, t) = 0 \Rightarrow U_{eq} = b^{-1}(x, t) \left[\sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} + f(x, t) - x_d^{(n)} \right] \dots \dots \dots (2.10)$$

Comme $U = U_{eq} + U_n$

À partir de la condition de convergence $\dot{S} \leq -k|S|$ nous avons :

$$\begin{aligned} \dot{S} \left(\sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} + f(x, t) + b(x, t)(U_{eq} + U_n) - x_d^{(n)} \right) &\leq -k|S| \Rightarrow S \cdot b(x, t) \cdot U_n \leq -k|S| \\ \Rightarrow U_n &= -k \cdot b^{-1}(x, t) \cdot \text{sign}(S) \dots \dots \dots (2.11) \end{aligned}$$

Par conséquent, la loi de commande par mode glissant est donnée par la forme suivante :

$$U = b^{-1}(x, t) \left[- \sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} - f(x, t) + x_d^{(n)} - k \text{sign}(S) \right] \dots \dots \dots (2.12)$$

II.3.4 Le phénomène du chattering

Durant le régime glissant, les discontinuités issues de la commande peuvent entraîner des oscillations haute fréquence de la trajectoire du système autour de la surface de glissement, ce phénomène est appelé phénomène de broutement ou chattering en Anglais [21].

II.3.5 Remplacement de la fonction sign par une fonction continue

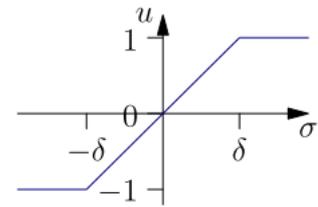
De nombreuses solutions ont été proposées dans le but de réduire ou d'éliminer ce phénomène. Il existe des méthodes comme celle de la couche limite (boundary layer) qui consiste à remplacer la fonction « sign » de la loi de commande par une approximation continue à gain élevé dans un proche voisinage de S [BZ86, Utk92], et saturée en dehors de ce voisinage. Le régime glissant qui en résulte n'est plus confiné dans S , mais dans un proche voisinage de celui-ci.

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

Les deux fonctions les plus utilisées sont :

- La fonction saturation

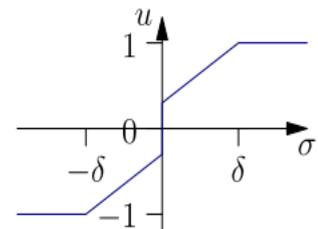
$$\text{sat}(S, \delta) = \begin{cases} \text{sign}(S) & \text{si } |S| > \delta \\ \frac{\sigma}{\delta} & \text{si } |S| \leq \delta \end{cases}$$



- La fonction sign + saturation :

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

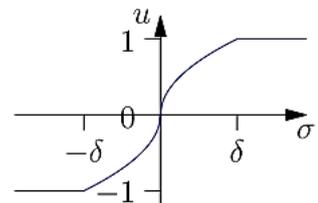
$$\text{sat}(\sigma, \delta) = \begin{cases} (a + b)\text{sign}(S) & \text{si } |S| > \delta \\ (a\frac{S}{\delta} + b)\text{sign}(S) & \text{si } |S| \leq \delta \end{cases}$$



Il existe d'autres approximations moins utilisées, car elles sont plus coûteuses en temps de calcul [21]:

- La loi d'interpolation de puissance

$$v(\sigma, \delta) = \begin{cases} \text{sign}(S) & \text{si } |S| > \delta \\ \left(\frac{\delta}{|S|}\right)^{(q-1)} & \text{si } 0 < |S| \leq \delta \\ 0 & \text{si } S = 0 \end{cases}$$

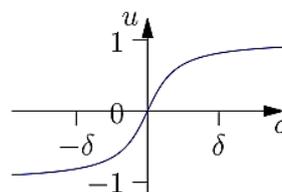


- La fonction pseudo-signe

$$v(S, \delta) = \frac{S}{|S| + \delta}$$

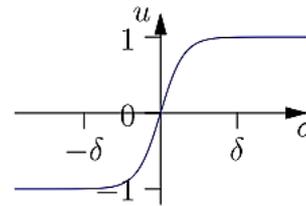
- La fonction arc tangente

$$v(S, \delta) = \frac{2}{\pi} \arctan \frac{S}{\delta}$$



- La fonction tangente hyperbolique

$$v(\sigma, \delta) = \tanh\left(\frac{\sigma}{\delta}\right)$$



Donc finalement, la commande en mode glissant se compose de deux éléments :

- une surface sur laquelle le système doit évoluer.
- une loi de commande forçant le système à atteindre cette surface de glissement.

Après la phase de convergence, le système bouclé jouit des propriétés suivantes :

- Sa dynamique est entièrement déterminée par la surface de glissement : il est en théorie possible d'imposer au système n'importe quelle dynamique physiquement réalisable uniquement par le choix de la surface de glissement.
- Il est insensible aux perturbations extérieures ou aux incertitudes de paramètres coïncidentes, c'est à dire agissant sur le système au même niveau que la commande.
- L'ordre du système est être réduit, certaines dynamiques sont supprimées dans ce cas.

La première phase du fonctionnement du mode glissant qui est l'attraction (attirer les trajectoires sur la surface de glissement) se fait en temps fini qui satisfera : $t_r \leq \frac{|s(0)|}{n}$, mais par contre le temps que prend la phase de glissement (glissement des états du système vers le point d'équilibre) n'est pas fini, en plus, la réponse du mode glissant peut être constante avec une erreur statique ou sinusoïdale (oscille au tour de la réponse désirée), toutes ses imperfections du mode glissant ont poussé les chercheurs à développer ce dernier pour avoir des meilleures performances, d'où la naissance du terminal sliding mode .

II.4 Commande par Terminal Sliding Mode (TSM)

Le TSM est une nouvelle approche de la commande par mode glissant. Il se distingue par sa surface de glissement non linéaire. Pendant que le système atteint le TSM, les erreurs de poursuite du système peuvent être convergées vers zéro en un temps fini. Dans le cas classique les erreurs de poursuite du système commandé convergent asymptotiquement vers zéro [27] [28].

II.4.1 Propriétés du TSM

Considérons le système SISO non linéaire suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x) + g(x) + b(x) * u \end{cases} \dots \dots \dots (2.13)$$

Avec $x = [x_1, x_2]^T$: est le vecteur d'état du système à commandé.

$f(x)$ et $b(x) \neq 0$ sont des fonctions non linéaires de x .

$g(x)$ représente les incertitudes et les perturbations satisfont $\|g(x)\| \leq I_g$ avec $I_g > 0$, u est la commande.

- La surface de glissement terminal non linéaire est formulée comme suit :

$$S = x_2 + Bx_1^{\frac{q}{p}} \dots \dots \dots (2.14)$$

Où : q et p sont des entiers positifs avec $p > q$

B : une constante positive.

- Le temps que prennent les états du système pour atteindre la surface de glissement ($S = 0$) est:

$$t_r \leq \frac{|S(0)|}{n} \dots \dots \dots (2.15)$$

- Le temps que prend le système pour atteindre le point d'équilibre :

Lorsque $S = 0$, l'équation de la surface de glissement terminal devient :

$$x_2 + Bx_1^{q/p} = 0 \Rightarrow \dot{x}_1 + Bx_1^{q/p} = 0$$

L'intégration de cette équation nous donne :

$$t_s = -B^{-1} \int_{x(\text{tr})}^0 \frac{dx_1}{x_1^{q/p}} = \frac{p}{B(p-q)} |x_1(\text{tr})|^{1-(\frac{q}{p})} \dots \dots \dots (2.16)$$

Cela signifie que dans la commande TSM, les deux états du système x_1 et x_2 converge vers zéro en un temps fini.

II.4.2 Synthèse de la loi de commande

La dérivée de la surface de glissement terminal (2.14) est donnée comme suit :

$$\Rightarrow \dot{S} = \dot{x}_2 + (Bx_1^{q/p})' = f(x) + g(x) + b(x) * u + B \frac{q}{p} x_1^{(\frac{q}{p}-1)} x_2 \dots \dots \dots (2.17)$$

➤ La dérivation de la surface de glissement terminal (2.17) permet de déterminer la commande équivalente U_{eq} comme suit:

$$\dot{S} = 0 \Rightarrow U_{eq} = -b(x)^{-1} * \left[f(x) + g(x) + B \frac{q}{p} x_1^{(\frac{q}{p}-1)} x_2 \right] \dots \dots \dots (2.18)$$

- la détermination instantanée de la perturbation $g(x)$ est impossible, mais il est soumis à cette inéquation : $\|g(x)\| \leq I_g$.

À cet effet (2.18) devient :

$$U_{eq} = -b(x)^{-1} * \left[f(x) + B \frac{q}{p} x_1^{(\frac{q}{p}-1)} x_2 \right] \dots \dots \dots (2.19)$$

La tâche de l'élimination du la perturbation $g(x)$ est confiée dans ce cas à la commande discontinue.

➤ Détermination de la commande discontinue U_n :

$$S \dot{S} = S * \left(f(x) + g(x) + b(x) * u + B \frac{q}{p} x_1^{(\frac{q}{p}-1)} x_2 \right)$$

$$S \dot{S} = S * \left(f(x) + g(x) + b(x) * (U_{eq} + U_n) + B \frac{q}{p} x_1^{(\frac{q}{p}-1)} x_2 \right) \dots \dots \dots (2.20)$$

L`application de U_{eq} avec ca valeur dans (2.19)

$$S \dot{S} = S * (g(x) + U_n) \dots \dots \dots (2.21)$$

Si on prend : $U_n = (I_g + k) * \text{sign}(S)$

L`application de 'U_n' sur l`équation du S \dot{S} donne :

$$S \dot{S} = S * k * \text{sign}(s)$$

D'où la condition suffisante pour l'existence du TSM est :

$$\dot{V}(x) = S \dot{S} < -k|S| \dots \dots \dots (2.22)$$

➤ La commande totale se synthétise sous cette forme :

$$U = -b(x) * \left[f(x) + B \frac{q}{p} x_1^{\left(\frac{q}{p}-1\right)} x_2 + (I_g + k) * \text{sign}(S) \right] \dots \dots \dots (2.23)$$

II.4.3 Stabilité de la commande TSM

La condition d'existence du TSM joue aussi un rôle primordiale pour une commande, car elle assure la stabilité de cette dernière en satisfaisant la condition du Lyapunov. Donc la stabilité est assurée tant que :

$$S \dot{S} < -k|S| \dots \dots \dots (2.24)$$

Le TSM offre plusieurs propriétés supérieures par rapport au mode glissant classique comme la rapidité, la réponse en temps fini, ce contrôleur est particulièrement utile pour le contrôle en haute précision, car elle accélère la vitesse de convergence à proximité de point d'équilibre, mais la singularité de cette méthode reste un problème à surmonter.

II.5 Commande par Non Singular Terminal Sliding Mode (NSTSM)

La présence du terme $x_1^{\frac{q}{p}-1} x_2$ dans la commande TSM peut causer une singularité quand $x_1 = 0$. Cette situation ne peut pas se produire dans le mode glissant idéal parce que quand $S=0$, $x_2 = -Bx_1^{\frac{q}{p}} \Rightarrow x_1^{\left(\frac{q}{p}-1\right)} * x_2 = x_1^{\left(\frac{q}{p}-1\right)} * (-Bx_1^{\frac{q}{p}}) = -B * x_1^{(2q-p)/p}$ Sachant que $1 < \frac{p}{q} < 2$ on conclue que le terme $x_1^{(2q-p)/p}$ n'est pas singulier. Mais lorsque on sort de

l'idéal on remarque que $x_1^{\frac{q}{p}-1} x_2 = \frac{x_2}{x_1} * x_1^{\frac{q}{p}}$ qui présente une singularité lorsque $x_1 = 0$.

Afin de surmonter le problème de la singularité dans la commande TSM, plusieurs méthodes ont été proposées, mais ces méthodes utilisent des approches indirectes pour éviter ce problème. En 2002 des chercheurs ont développé une méthode, qui est capable d'éviter complètement ce problème [27] [28]. La méthode développée est dénommée terminal sliding mode non singulier.

$$\dot{S} = x_2 + \frac{1}{B} \frac{p}{q} x_2^{\frac{p}{q}-1} \left[g(x) + \frac{q}{p} x_2^{2-\frac{p}{q}} - (I_g + k) \text{sign}(S) \right]$$

$$\dot{S} = \frac{1}{B} \frac{p}{q} x_2^{\frac{p}{q}-1} \left[g(x) - (I_g + k) \text{sign}(s) \right] \dots \dots \dots (2.27)$$

Ensuite, on vérifie la stabilité en étudiant l'état de $\dot{S}S$:

$$S\dot{S} = \frac{1}{B} \frac{p}{q} x_2^{\frac{p}{q}-1} \left[g(x)S - (I_g + k) \text{sign}(S)S \right] \dot{S} \iff \frac{1}{B} \frac{p}{q} x_2^{\frac{p}{q}-1} |S| \dots \dots \dots (2.28)$$

Avec p et q sont des entiers positifs et $1 < p/q < 2$ on a aussi donc :

$$x_2^{\frac{p}{q}-1} > 0 \quad \text{Pour } x_2 \neq 0$$

La deuxième partie de ce chapitre est consacré à la théorie de la logique floue, cette logique sera présentée dans la section suivante.

II.6 Logique floue

La logique floue est une forme de logique utilisée dans quelques systèmes experts et d'autres applications de l'intelligence artificielle dans lesquels les variables peuvent avoir des degrés d'exactitude ou de fausseté représentée par une gamme des valeurs entre 1(vrai) et 0 (faux). Avec la logique floue, les résultats d'une opération peuvent être exprimés comme une probabilité plutôt qu'une certitude. Par exemple, en plus d'être vrai ou faux, des résultats pourraient avoir des significations telles que probablement vraies, et probablement fausses.

Le principe de réglage par la logique floue se rapproche de la démarche humaine dans le sens où les variables à traiter ne sont plus des variables logiques, mais des variables linguistiques.

En outre, ces variables linguistiques sont traitées à l'aide des règles qui font référence à une certaine connaissance de base sur ce principe, les systèmes flous et l'ensemble de fonction non linéaires, qui permet de construire par apprentissage une très large classe de modèles et de correcteurs[25].

Cette logique s'appuie sur la théorie mathématique des sous-ensembles flous. Cette théorie, introduite par Pr L.Zadeh en 1965, est une extension de la théorie des ensembles classiques pour la prise en compte d'ensembles définis de façon imprécise. C'est une théorie formelle et mathématique dans le sens où, en partant du concept de fonction d'appartenance pour modéliser la définition d'un sous-ensemble d'un univers donné, on élabore un modèle complet de propriétés et de définitions formelles. On a aussi montré que cette théorie des sous-ensembles flous se réduit effectivement à la théorie des sous-ensembles classiques dans le cas où les fonctions d'appartenance considérées prennent des valeurs binaires ($\{0,1\}$).

II.6.1 Bref historique

Voici quelques repères historiques permettant de situer dans le temps de développement de la logique floue et ses applications au réglage [31] :

- 1965 le prof. L. A. Zadeh de l'Université de Berkeley (Californie) pose les bases théoriques de la logique floue.
- 1973 L. A. Zadeh propose d'appliquer la logique floue aux problèmes de réglage.
- 1974 Première application du réglage par la logique floue appliquée à une turbine à vapeur.

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

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

II.6.2 Principe de la logique floue

La logique floue n'est autre que l'extension de la logique binaire, à l'aide d'une série de notions fondamentales développées qui ont permis de justifier et de montrer certaines notions de base. Les éléments indispensables à la compréhension du réglage par la logique floue sont[30] :

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

II.6.2.1 Variables floues

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

- Les fonctions d'appartenances qui permettent de définir le degré de vérité de la variable floue en fonction de la grandeur d'entrée.
- Les ensembles flous qui représentent le nombre de variables floues associées à une grandeur d'entrée.

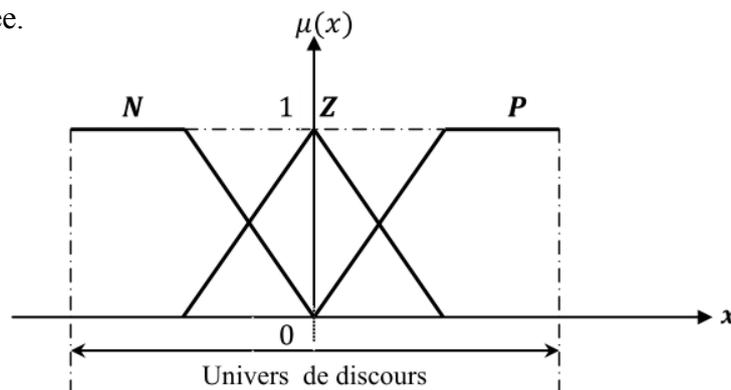


Figure [II.4] Variables linguistiques d'un ensemble flou

Typiquement plusieurs formes de fonctions d'appartenance sont utilisées dans les applications. La Figure [II.5] montre un aperçu des fonctions d'appartenance les plus usuelles:

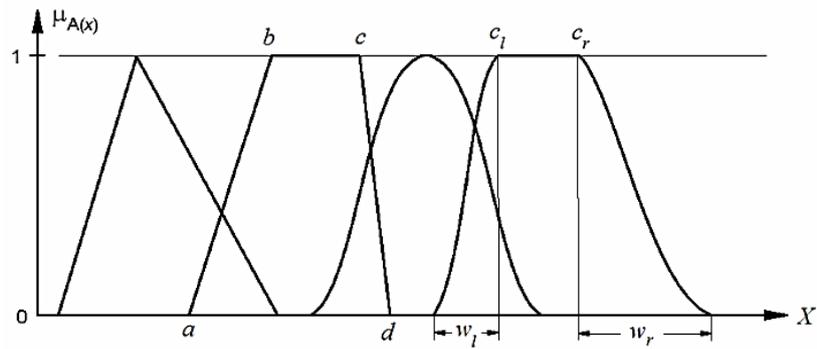


Figure [II.5] Formes typiques représentatives des fonctions d'appartenance.

II.6.2.2 Inférence floue

L'inférence floue est le processus de formulation de la relation entre les entrées et les sorties par logique floue. Cette relation offre une base avec laquelle la décision est prise par le système flou. L'inférence floue fait appel alors aux concepts de fonctions d'appartenance, d'implication floue et les règles floues.

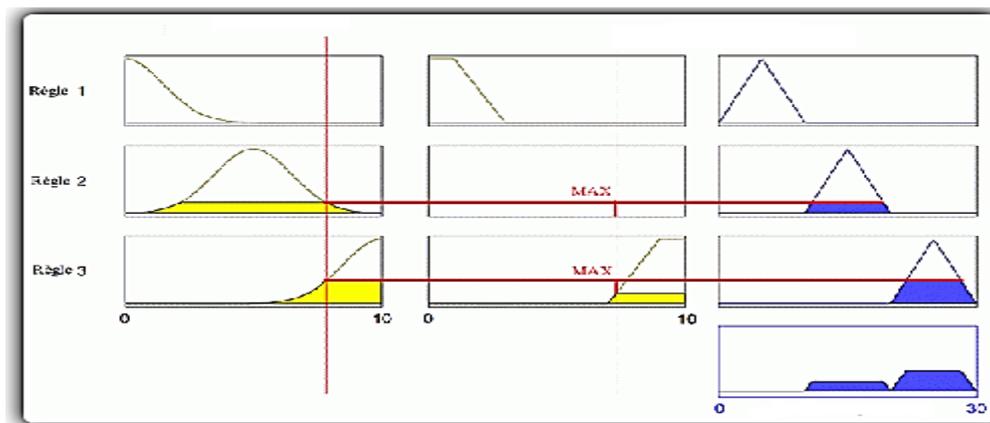


Figure [II.6] Représentation des résultats d'inférence.

II.6.2.3 Opérateurs flous

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

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

Tableau [2.1] : Opérateurs flous.

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

Quant aux opérations produites et valeur moyenne, elles sont les plus complexes à calculer mais produisent un résultat qui tient compte des valeurs de variables[25].

II.6.3 Structure interne d'un système d'inférence flou (SIF)

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

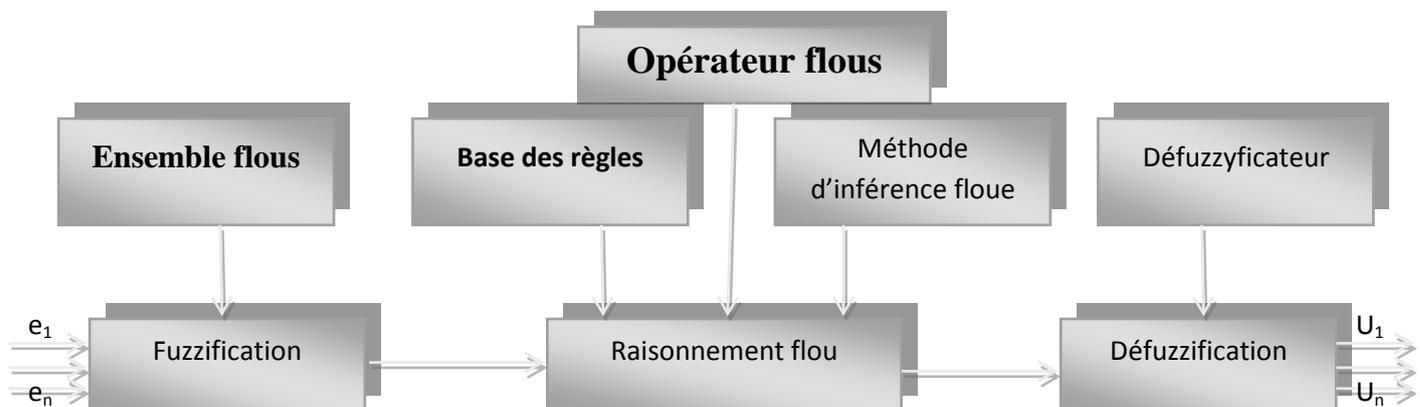


Figure [II.7] : Architecture de base d'un système flou

III.6.3.1 Fuzzification

La fuzzification est réalisée dans l'interface d'entrée du système flou. Durant cette phase, les informations issues du système sont tout d'abord normalisées, ensuite, les

données normalisées sont transformées en qualifications linguistiques, en utilisant des règles sémantiques définies par un expert.

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

II.6.3.2 Défuzzification

Le résultat de l'inférence en utilisant une des méthodes d'implication floue, comme Max-min, est une valeur floue. Cette information ne peut être utilisée directement. Une transformation doit être prévue à la sortie du bloc d'inférence pour la convertir en grandeur fixe, cette transformation étant connue par le terme défuzzification (concrétisation).

Plusieurs méthodes de défuzzification existent en logique floue, les plus utilisées sont les deux suivantes.

➤ La méthode du centre de maximum

Dans cette méthode, la valeur de sortie est estimée par l'abscisse du point correspondant au centre de l'intervalle pour lequel la fonction d'appartenance est maximale Figure[II.8].

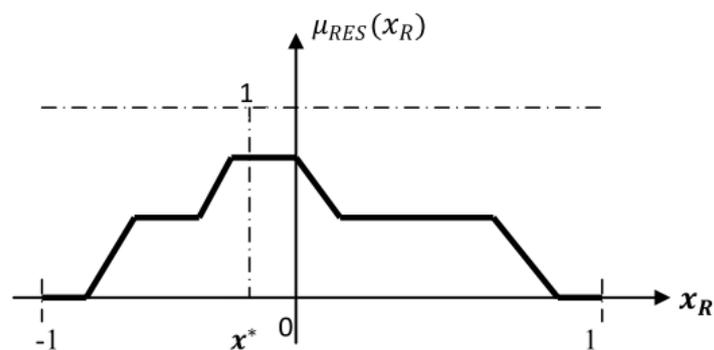


Figure [II.8]: La défuzzification par la méthode du centre de maximum.

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

$$x_R^* = \frac{\int_{-1}^1 x_R \mu_{RES}(x_R) dx_R}{\int_{-1}^1 \mu_{RES}(x_R) dx_R}$$

➤ **La méthode du centre de gravité (CG)**

La défuzzification par centre de gravité consiste à calculer l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance Figure [II.9].

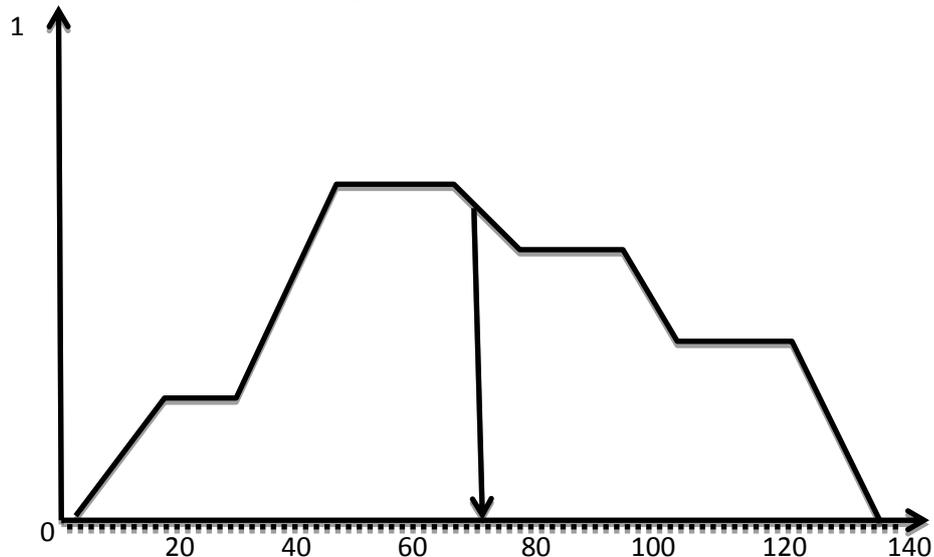


Figure [II.9] : La défuzzification par la méthode du centre de gravité.

➤ **Méthode de la moyenne pondérée**

Elle considère comme valeur de sortie la moyenne des valeurs préconisées par chaque règle, pondérées par leur degré respectif de validité.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a décrit la manière de synthétiser une commande en mode glissant classique et modifié, pour des systèmes mono entrée et mono sortie non linéaire qui est généralisable pour des systèmes multivariables. On a fini par une description générale du fonctionnement de la logique floue qu'il sera utile ultérieurement.

Chapitre III

COMMANDE D'UN BRAS

MANIPULATEUR A 2DDL

PAR FNSTSMC

PAR FNSTSMC

PAR FNSTSMC

III.1 Introduction :

Au cours du temps, plusieurs méthode de commande ont été proposées, et chacune d'elles a ses avantages et ses inconvénients. Cela a poussé les chercheurs à faire l'hybridation de ses dernières pour avoir des meilleures performances. Dans ce chapitre, on va développer trois contrôleurs, le premier est basé sur le CNSTSM et le deuxième consiste à ajouter une méthode d'estimation au contrôleur précédant pour simplifier la commande, et finalement on hybride ce dernier avec un contrôleur basé sur la logique floue [chapitre III].

III.2 Construction du contrôleur :

III.2.1 Le contrôleur NSTSMC (le contrôleur Non Singular Terminal Sliding Mode) :

- Synthèse de la loi de commande pour le robot manipulateur :

La modélisation dynamique d'un robot manipulateur a n-dll et donner par l'équation (1.13) [18] [31] :

- La présence des incertitudes dans le modèle du robot manipulateur nous obligent à les mentionner comme suit :

$$M(q) = M_0(q) + \Delta M(q)$$

$$C(q, \dot{q}) = C_0(q, \dot{q}) + \Delta C(q, \dot{q})$$

$$G(q) = G_0(q) + \Delta G(q)$$

Avec : $M_0(q)$, $C_0(q, \dot{q})$ et $G_0(q)$ sont les estimés de $M(q)$, $C(q, \dot{q})$ et $G(q)$ respectivement. $\Delta M(q)$, $\Delta C(q, \dot{q})$ et $\Delta G(q)$ sont les termes d'incertitudes sur les matrices.

Donc l'équation dynamique du bras manipulateur(1.13) peut s'écrire comme suit :

$$M_0(q)\ddot{q} + G_0(q) + C_0(q, \dot{q}) = \tau + p(t) \dots \dots \dots (3.1)$$

Tel que : $p(t) = -\Delta M(q)\ddot{q} - \Delta C(q, \dot{q}) - \Delta G(q)$

- Les hypothèses formulées sur le robot manipulateur sont représenté comme suit [27]:

$$\|M(q)\| < \alpha_0$$

$$\|C(q, \dot{q})\| < \beta_0 + \beta_1 \|q\| + \beta_2 \|\dot{q}\|^2$$

$$\|G(q)\| < \gamma_0 + \gamma_1 \|q\|$$

$$\|\tau\| < \lambda_0 + \lambda_1 \|q\| + \lambda_2 \|\dot{q}\|^2$$

$$\|p(t)\| < b_0 + b_1 \|q\| + b_2 \|\dot{q}\|^2$$

Avec $\alpha_0, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \gamma_0, \lambda_2, \lambda_0, \lambda_1, \gamma_1, b_1, b_1, b_1$ sont des valeurs constantes positives.

- Equation d'erreur du robot manipulateur :

On suppose que q_d est l'entrée désirée du robot manipulateur, \dot{q}_d est sa dérivée. Dans ce cas l'erreur et sa dérivée sont données comme suit :

$$e = q_d - q \Rightarrow \dot{e} = \dot{q}_d - \dot{q} \text{ et } \ddot{e} = \ddot{q}_d - \ddot{q}$$

$$\dot{e} = A \cdot e + B \cdot v \dots \dots \dots (3.2)$$

Où $A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}$ et $v = M_0(q)^{-1}(-G_0(q) - C_0(q, \dot{q}) - M_0(q)\ddot{q}_d + \tau + p(t))$

- Synthèse de la commande :

On choisit la surface du glissement NSTSM comme suit :

$$S = e + K * \dot{e}^{\frac{p}{q}} \dots \dots \dots (3.3)$$

Avec K est une matrice diagonale a valeurs constantes et $1 < \frac{p}{q} < 2$

La dérivée de la surface de glissement (3.3) nous donne :

$$\dot{S}(x) = \dot{e} + \frac{p}{q} K \text{diag} \left(\dot{e}^{\frac{p}{q}-1} \right) \ddot{e} \dots \dots \dots (3.4)$$

La fonction de candidate du Lyapunov pour un système multivariables est choisie dans notre cas sous la forme suivante : $V = \frac{1}{2} S^T S$

Sa dérivée est :

$$\dot{V} = S^T(x) \cdot \dot{S}(x) = S^T \left(\dot{e} + \frac{p}{q} K \text{diag} \left(\dot{e}^{\frac{p}{q}-1} \right) \ddot{e} \right) \dots \dots \dots (3.5)$$

Avec $\ddot{e} = \ddot{q}_d - \ddot{q} = \ddot{q}_d - M_0(q)^{-1}(-G_0(q) - C_0(q, \dot{q}) + \tau + p(t))$

$$\Leftrightarrow \ddot{e} = -M_0(q)^{-1}(-G_0(q) - C_0(q, \dot{q}) - M_0(q)\ddot{q}_d + \tau + p(t)) \dots \dots \dots (3.6)$$

On remplace l'équation (3.6) dans (3.5) on obtien :

$$\dot{V} = S^T \left(\dot{e} + \frac{p}{q} K \text{diag} \left(\dot{e}^{\frac{p}{q}-1} \right) [-M_0(q)^{-1}(-G_0(q) - C_0(q, \dot{q}) - M_0(q)\ddot{q}_d + \tau + p(t))] \right) \dots \dots \dots (3.7)$$

La loi de commande par terminale sliding mode est donnée par [32] comme suit :

$$\tau = \tau_0 + u_1 + u_0 \dots \dots \dots (3.8)$$

On remplace :

$$\tau_0 = G_0(q) + C_0(q, \dot{q}) + M_0(q)\ddot{q}_d \dots \dots \dots (3.9)$$

Donc l'équation (3.7) devient :

$$\dot{V} = S^T \left(\dot{e} + \frac{p}{q} K \text{diag} \left(\dot{e}^{\frac{p}{q}-1} \right) [-M_0(q)^{-1}(u_1 + u_0 + p(t))] \right) \dots \dots \dots (3.10)$$

Pour faire annuler le terme \dot{e} on propose :

$$u_0 = -\frac{q}{p} M_0(q) K^{-1} e^{2-\frac{p}{q}} \dots \dots \dots (3.11)$$

Donc l'équation (3.7) devient :

$$\dot{V} = S^T \left(\frac{p}{q} K \text{diag} \left(\dot{e}^{\frac{p}{q}-1} \right) [-M_0(q)^{-1}(u_1 + p(t))] \right) \dots \dots \dots (3.12)$$

Il faut maintenant choisir u_1 de telles manières à satisfaire la condition de stabilité et aussi contraindre les incertitudes qui sont représentées par $p(t)$, et pour cela on prend

$$\begin{aligned}
 \mathbf{u}_1 = & -\frac{\mathbf{q}}{p} * \frac{[\mathbf{S}^T \mathbf{K} \text{diag}(\dot{e}^{\frac{p}{q}-1}) \mathbf{M}_0(\mathbf{q})^{-1}]^T}{\|\mathbf{S}^T \mathbf{K} \text{diag}(\dot{e}^{\frac{p}{q}-1}) \mathbf{M}_0(\mathbf{q})^{-1}\|} * \|\mathbf{S}\| * \|\mathbf{K} \text{diag}(\dot{e}^{\frac{p}{q}-1}) \mathbf{M}_0(\mathbf{q})^{-1}\| \\
 & * (b_0 + b_1 \|\mathbf{q}\| + b_2 \|\dot{\mathbf{q}}\|^2)
 \end{aligned}$$

➤ **Schéma de simulation du contrôleur NSTSMC :**

Le schéma fonctionnel du contrôleur NSTSMC est représenté par la figure [III.1] suivante :

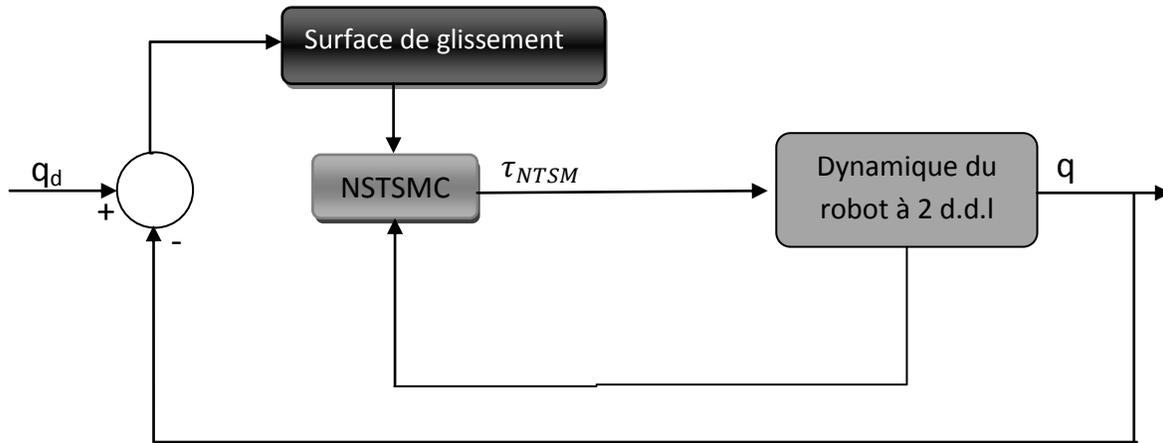


Figure [III.1] : Schéma bloc de la commande NSTSMC.

III.2.2 Le contrôleur TDENSTSMC (time-delay estimation terminal mode glissant non singulier) :

Dans la pratique (réalisation) , les ingénieurs ont tendance à utiliser des commandes programmables, non complexes et surtout qui ne comportent pas de problème numérique une fois implémenter. Pour avoir cela, on a exploité la rapidité de convergence du mode glissant non linéaire avec une technique de commande sans modèle, on obtient une commande à la fois simple à implémenter et surtout permet d’assurer la robustesse [18].

➤ **Synthèse de la commande :**

En ajoutant à l’équation (1.13) une matrice diagonale $\bar{\mathbf{M}}$ avec des valeurs constantes, on obtient une autre expression de (1.13) qui est sous la forme (3.15):

$$\tau = \bar{\mathbf{M}}\mathbf{u} + \mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \dots \dots \dots (3.15)$$

$$\text{Avec } N(q, \dot{q}, \ddot{q}) = [M(q) - \bar{M}]\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) \dots \dots \dots (3.16)$$

La surface de glissement utilisé ici est représentée dans l'équation (3.3), dans ce cas la commande peut être synthétisée comme suit :

$$\tau = \bar{M}u + \hat{N}(q, \dot{q}, \ddot{q}) \dots \dots \dots (3.17)$$

$$\text{Ou } u = \ddot{q}_d + \frac{q}{p}K^{-1}\dot{e}^{2-\frac{p}{q}} + K_{sw}\text{sign}(S) \dots \dots \dots (3.18)$$

K et K_{sw} sont des matrices diagonales à valeurs constantes.

$\hat{N}(q, \dot{q}, \ddot{q})$ est l'estimé de $N(q, \dot{q}, \ddot{q})$

⇒ Ici intervient le rôle de la méthode du time-delay estimation, qui consiste à estimer la valeur de $N(q, \dot{q}, \ddot{q})$ de la manière suivante :

$$\hat{N}(q, \dot{q}, \ddot{q}) = N(q, \dot{q}, \ddot{q})_{t-L} \dots \dots \dots (3.19)$$

Où $\hat{N}(q, \dot{q}, \ddot{q})$ est l'estimé de $N(q, \dot{q}, \ddot{q})$ et

$N(q, \dot{q}, \ddot{q})_{t-L}$ représente la valeur de $N(q, \dot{q}, \ddot{q})$ à l'instant $t-L$.

L est la période d'échantillonnage.

À partir de (3.16) on obtient :

$$N(q, \dot{q}, \ddot{q})_{t-L} = \tau_{t-L} - \bar{M}\ddot{q}_{t-L} \dots \dots \dots (3.20)$$

On remplaçant l'équation (3.20) dans l'équation (3.17), on aura la commande globale suivante :

$$\tau = \tau_{t-L} - \bar{M}\ddot{q}_{t-L} + \bar{M} \left[\ddot{q}_d + \frac{q}{p}K^{-1}\dot{e}^{2-\frac{p}{q}} + K_{sw}\text{sign}(S) \right] \dots \dots \dots (3.21)$$

Pour diminuer l'effet de chattering, on utilise une fonction plus douce que cette dernière.

Nous avons choisi d'utiliser la fonction saturation, dans ce cas (2.21) devient :

$$\tau = \tau_{t-L} - \bar{M}\ddot{q}_{t-L} + \bar{M} \left[\ddot{q}_d + \frac{q}{p}K^{-1}\dot{e}^{2-\frac{p}{q}} + K_{sw} \text{sat}(S) \right] \dots \dots \dots (3.22)$$

➤ **Stabilité du contrôleur TDENSTSMC :**

D'après la fonction candidate de Lyapunov :

$$V = \frac{1}{2} S^T S \dots \dots \dots (3.23)$$

On remplace l'équation de la commande (3.4) et (3.6) dans l'équation de la dynamique du robot (3.15) :

$$\ddot{e} = -\frac{q}{p} K^{-1} e^{2-\frac{p}{q}} - K_{sw} \text{sgn}(S) + \varepsilon \dots \dots \dots (3.24)$$

l'erreur de la TDE est définie comme suit :

$$\varepsilon = \bar{M}^{-1} (N - N_{t-L}) \dots \dots \dots (3.25)$$

D'après l'équation (3.5), la dérivée de l'équation de Lyapunov nous donne :

$$\dot{V} = S^T(x) \cdot \dot{S}(x) = S^T \left(\dot{e} + \frac{p}{q} K \text{diag} \left(\dot{e}^{\frac{p}{q}-1} \right) \ddot{e} \right) \dots \dots \dots (3.26)$$

En remplace la valeur de \ddot{e} (3.24) dans l'équation (3.26), on aboutit à l'équation (3.27)

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S^T(x) \cdot \dot{S}(x) = S^T \left(\dot{e} + \frac{p}{q} K \text{diag} \left(\dot{e}^{\frac{p}{q}-1} \right) \left(-\frac{q}{p} K^{-1} e^{2-p/q} - K_{sw} \text{sgn}(S) + \varepsilon \right) \right) \\ \dot{V} &= S^T(x) \cdot \dot{S}(x) = S^T \left(\frac{p}{q} K \text{diag} \left(\dot{e}^{\frac{p}{q}-1} \right) (-K_{sw} \text{sgn}(S) + \varepsilon) \right) \dots \dots \dots (3.27) \end{aligned}$$

Puisque $1 < \frac{p}{q} < 2 \Rightarrow \dot{e}^{\frac{p}{q}-1} > 0$ pour $\dot{e} \neq 0$, donc \dot{V} est définie négative si :

$$\{K_{sw}\}_{ii} > |\varepsilon|_i \dots \dots \dots (3.28)$$

avec \blacksquare_{ii} représente le ième élément de \blacksquare .

Donc si ε est borné, la condition (3.28) va assurer \dot{V} négatif.

D'après [18] ε est borné, donc la commande est stable.

➤ **Schéma de simulation :**

Le schéma fonctionnel du contrôleur TDE-NTSMC est représenté par la figure [III.2] suivante :

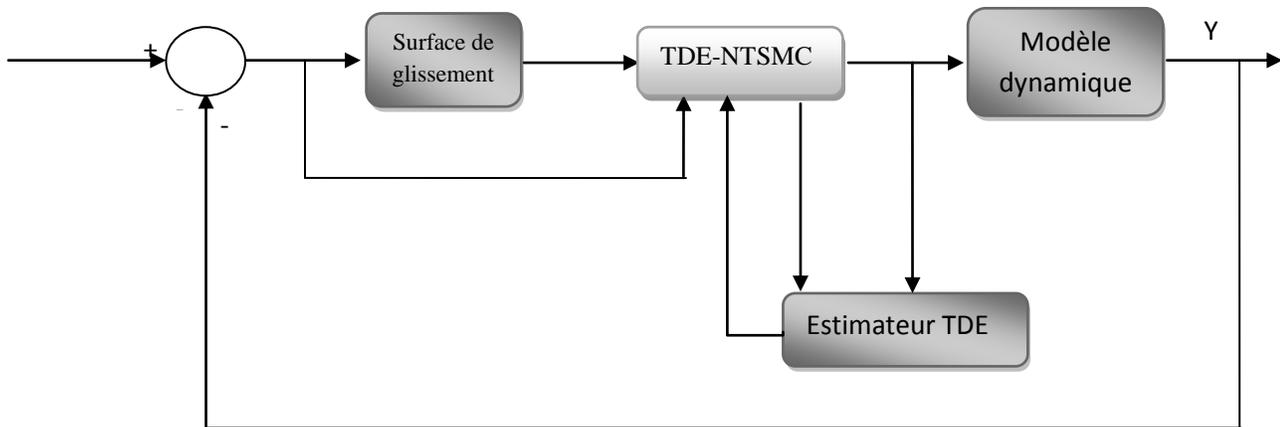


Figure [III.2] : Schéma bloc de la commande TDENSTSMC.

III.2.3 Le contrôleur FTDENSTSMC (Fuzzy time-delay estimation non singular terminale sliding mode contrôle) :

➤ **Synthèse de la commande**

On prend la commande obtenue avec le contrôleur TDENTSMC (3.22) et on remplace la commande discontinue par un régulateur flou, la loi de commande dite FTDENTSMC est donnée par l'équation (3.29) comme suit [18] [32] [26] :

$$\tau = \tau_{t-L} - \bar{M}\ddot{q}_{t-L} + \bar{M} \left[\ddot{q}_d + \frac{q}{p} K^{-1} \dot{e}^{2-\frac{p}{q}} + K_{sw} U_{fou} \right] \dots \dots \dots (3.29)$$

Avec : $U_{fou} = [U_{fou1}, U_{fou2}]^T$

III.2.3.1 La construction du régulateur flou

Notre régulateur flou est de type sugeno comporte une seule entrée qui est la surface de glissement non linéaire du NSTSM et une seule sortie donne la commande discontinu du mode glissant.

- La figure [III.3] suivante montre les ensembles flous utilisés pour générer les fonctions d'appartenance appropriées aux variables floues décrivant l'entrée.

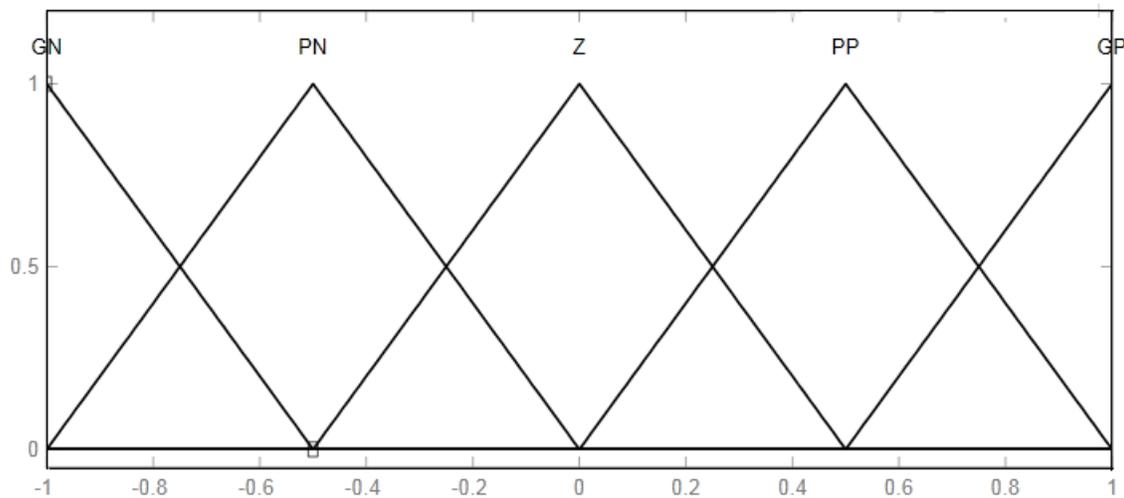


Figure [III.3] : La fuzzification de la surface de glissement terminal.

- **GN** : Grande Négative
- **PN** : Petite Négative
- **Z** : Zéro
- **PP** : Petite Positive
- **GP** : Grande Positive
- **Règle d'inférence**
La base des règles floues utilisées l'hors de la phase de résonnement flou sont le suivante :
 - Si (la surface est **GN**) alors (la commande est **TP**)
 - Si (la surface est **PN**) alors (la commande est **P**)

- Si (la surface est **Z**) alors (la commande est **Z**)
- Si (la surface est **PP**) alors (la commande est **G**)
- Si (la surface est **GP**) alors (la commande est **TG**)

Avec

TP : très petit

P : petit

Z : zéros

G : grand

TG : très grand

- La defuzzification est effectuée via la méthode de Takagi -Sugeno comme le montre la figure [III.3] :

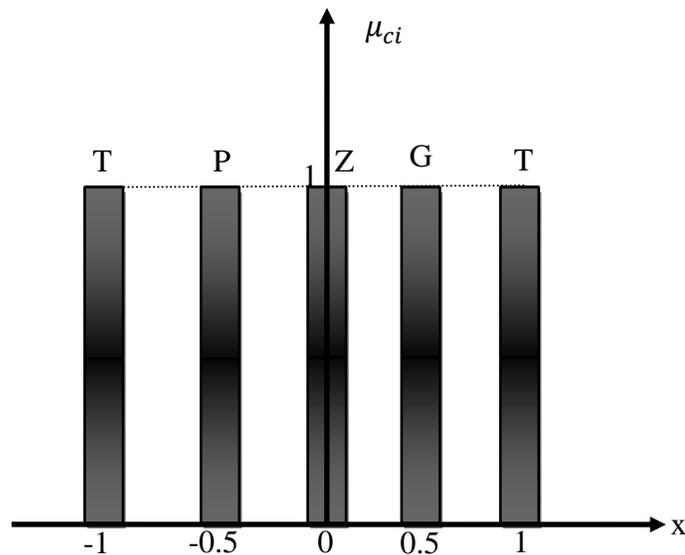


Figure [III.3] : La fuzzification de la sortie.

La valeur de la surface de glissement n'est pas directement injectée dans le régulateur flou, car il faut d'abord la multiplier par un gain de normalisation pour pouvoir la situer dans l'univers de discours. De même, la sortie est aussi multipliée par un gain de normalisation puisque on a modifié sa valeur à l'entrée.

➤ **Schéma de simulation contrôleur FTDENSTSMC:**

Le schéma bloc suivant représente l'hybridation entre la commande floue et la commande NTSM :

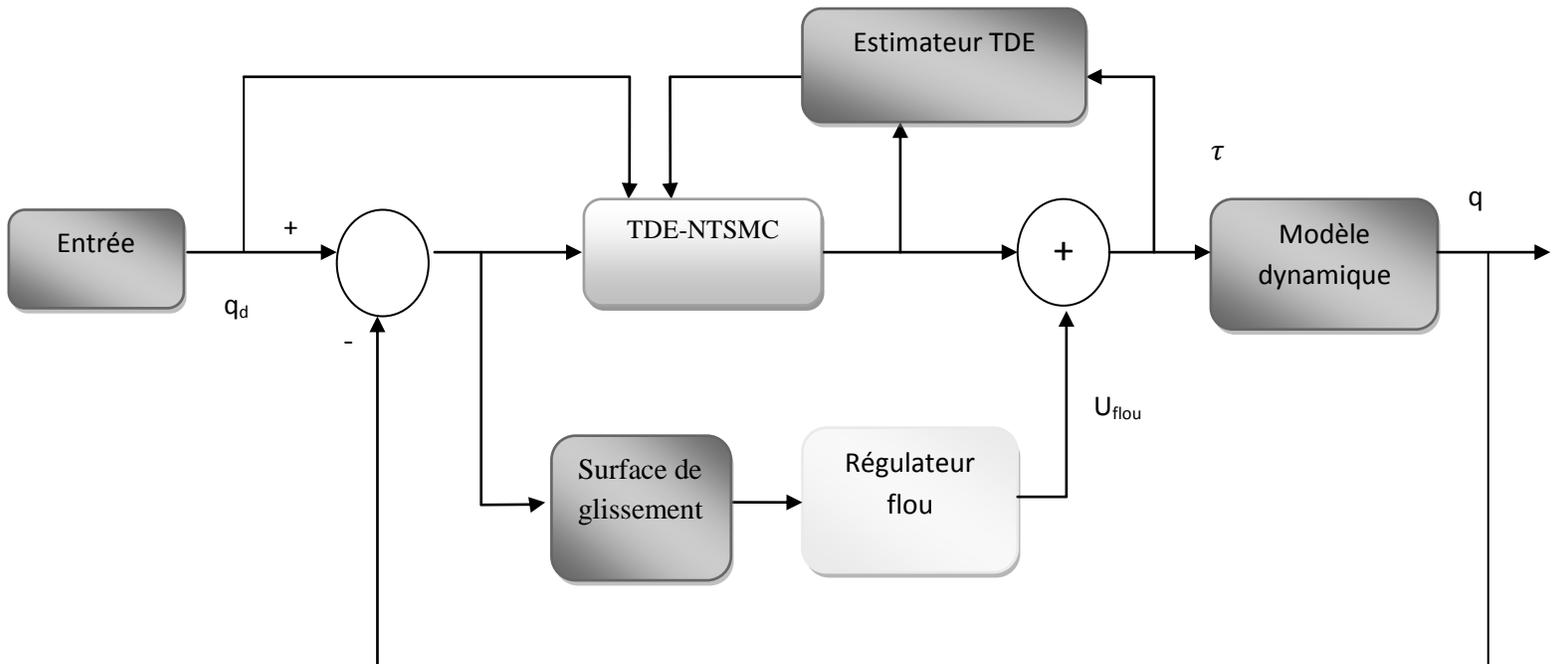


Figure [III.4] : Schéma bloc de la commande FTDENSTSM.

II.3 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons proposé une commande hybride par terminal sliding mode flou. Le contrôleur est basé sur une approche dite méthode d'estimation à temps de retard. La commande FTDENSTSM permet à la fois d'avoir la robustesse du système commandé et des bonnes performances.

Chapitre IV

RESULTATS DE
SIMULATION DES
COMMANDES
DEVELOPPEES
ДЕΛΓΟΒΒΕΕΣ
COMMANDES

IV.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats de simulation en mode de régulation et poursuite de trajectoire des deux contrôleurs TDENTSMC « Time-Delay estimation Non Singular Terminal Sliding Mode Control » et FTENTSMC « fuzzy Time-Delay estimation Non Singular Terminal Sliding Mode Control » appliqués sur le modèle dynamique d'un bras manipulateur développé à 2-ddl dans le chapitre 1.

IV.2 Résultats de simulations des commandes développées

Le modèle dynamique du robot à 2 ddl que nous avons vu dans le chapitre 1, va nous permettre de tester nos commandes sur un système non linéaire et fortement couplé.

Afin de commander la position angulaire des deux axes du bras manipulateur, nous avons introduit au premier lieu une commande par TDENTSMC améliorée par la suite par un contrôleur flou.

IV.2.1 Résultat de simulation en mode régulation

Dans ce passage, nous présentons les résultats de simulation de l'implémentation des contrôleurs sur les deux axes du bras manipulateur en mode régulation.

- Les paramètres des deux contrôleurs utilisés sont donnés par les tableaux [4.1] et [4.2] pour la commande TDENSTSMC et FTDENSTSMC respectivement :

	Paramètres	Valeurs
Axe 1	K	0.9
	K_{sw}	5.0
	\bar{M}	0.25
	q	3
	p	5
Axe 2	K	0.9
	K_{sw}	5.0
	\bar{M}	0.25
	q	3
	p	5

Tableau [4.1] Paramètres du contrôleur TDENSTSMC.

Paramètres		Valeurs
Axe 1	K	0.9
	K_{sw}	5.0
	\bar{M}	0.25
	q	3
	P	5
	Gain de normalisation d`entrée floue	0.05
	Gain de normalisation de la sortie floue	40
Axe 2	K	0.9
	K_{sw}	5.0
	\bar{M}	0.25
	q	3
	p	5
	Gain de normalisation d`entrée floue	0.05
	Gain de normalisation de la sortie floue	50

Tableau [4.2] Paramètres du contrôleur FTDENTSMC.

IV.2.1.1 Condition de la simulation

Les positions désirées sont de 14° pour l`axe 1, et de 10° pour l`axe 2. La durée de la simulation est de 15 secondes. Cette dernière est suffisante pour la visualisation de la réponse du système en position angulaire, la commande, l`erreur de position et le plan de phase.

IV.2.1.2 Résultats de simulation

Les résultats des réponses des deux axes pour les deux contrôleurs introduits sont représentés sur le même graphe.

La représentation de la sortie (position angulaire) nous permettra de visualiser le comportement du système, la commande est observée pour la quantité d`énergie nécessaire pour la réalisation du déplacement angulaire, et l`erreur pour évaluer l`exactitude de notre sortie, et le plan de phase pour visualiser la phase de glissement.

Les courbes en rouges représentent les résultats de l`application de la commande TDENTSMC. Quand les courbes en bleues montres les résultats de la commande hybride FTDENSTSMC.

Les résultats de simulation pour le contrôle de l'axe 1 et de l'axe2 en mode régulation sont donnés par les figures [4.1] [4.2] suivantes :

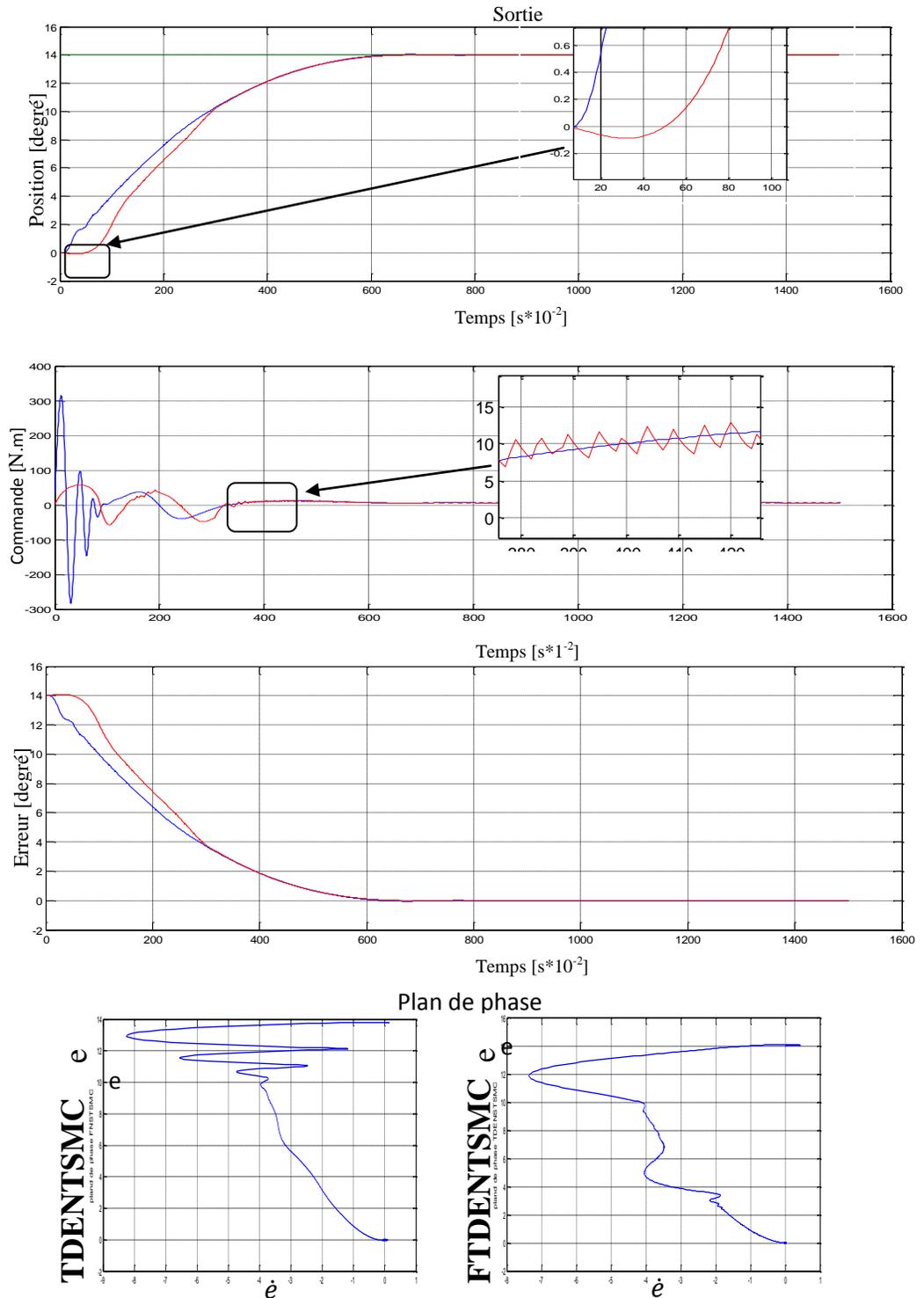


Figure [4.1] : Résultat de simulation du premier axe en mode régulation.

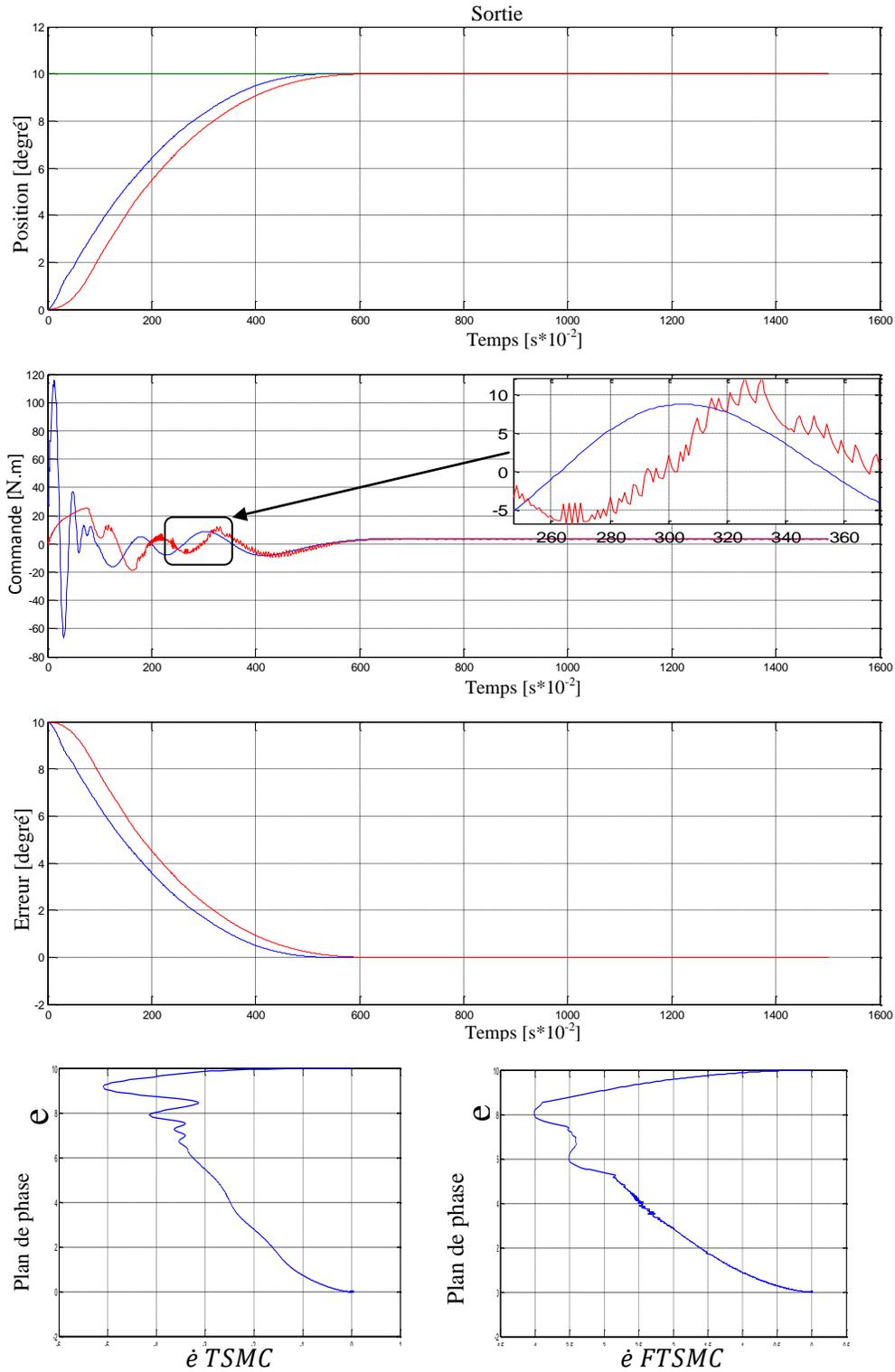


Figure [4.2] : Résultat de simulation du deuxième axe en mode régulation.

Le tableau [4.3] représente les performances des contrôleurs en mode régulation des deux axes :

contrôleurs		NSTSMC	FNSTSMC
Axe 1	Dépassement (%)	0	0
	Temps de réponse(s)	2.6	2.36
	Erreur statique (%)	0	0
Axe 2	Dépassement (%)	0	0
	Temps de réponse (s)	2.3	1.8
	Erreur statique (%)	0	0

Tableau [4.3] Performances des contrôleurs des deux axes en régulation.

IV.2.1.3 Interprétations des résultats

D'après les figures [4.1] et [4.2], on remarque que la commande FTDENTSMC est plus performante que la TDENTSMC vu que la FTDENTSMC ne comporte pas ni de retard dans le signal de position ni du chattering dans le signal de commande, La commande FTDENTSMC nous a permis d'améliorer le temps de réponse tout en gardant un dépassement nul ($D=0\%$) avec une erreur statique égal à 0.

Dans le graphe de la commande on distingue des effets sur-énergétiques qui ont été obtenus avec la combinaison du TDENTSMC et le contrôleur flou.

IV.2.2 Résultats de simulation des commandes développées pour le cas bras manipulateur en mode poursuite de trajectoire

Nous présentons dans cette section les résultats de simulation de l'implantation des correcteurs sur les deux axes du bras du robot à 2 DDL en mode poursuite de trajectoire. Les paramètres des deux contrôleurs utilisés sont choisis comme suit :

	Paramètres	Valeurs
Axe 1	K	0.9
	K_{sw}	5.0
	\bar{M}	0.25
	q	3
	p	5
Axe 2	K	0.9
	K_{sw}	5.0
	\bar{M}	0.25
	q	3
	p	5

Tableau [4.4] Valeurs des paramètres du contrôleur TDENTSMC.

	Paramètres	Valeurs
Axe 1	K	0.9
	K_{sw}	5.0
	\bar{M}	0.25
	q	3
	P	5
	Gain de normalisation d'entrée flou	0.05
	Gain de normalisation de sortie flou	40
Axe 2	K	0.9
	K_{sw}	5.0
	\bar{M}	0.05
	q	3
	p	5
	Gain de normalisation d'entrée flou	1/20
	Gain de normalisation de sortie flou	50

Tableau [4.5] Paramètres du contrôleur FTDENTSMC.

IV.2.2.1 Condition de simulation

Nous allons maintenant présenter les résultats de simulation en mode poursuite de trajectoire. Le choix s'est porté sur une trajectoire sinusoïdale d'amplitude 14 pour l'axe 1, et 10 pour l'axe 2. La période de la simulation est de 45 secondes avec une période d'échantillonnage de 0.01s.

IV.2.2.2 Résultats de simulation

L'évolution de la position angulaire pour les deux axes du robot est représentée par les figures [4.3] et [4.4], il a été aussi donné les erreurs par rapport aux références.

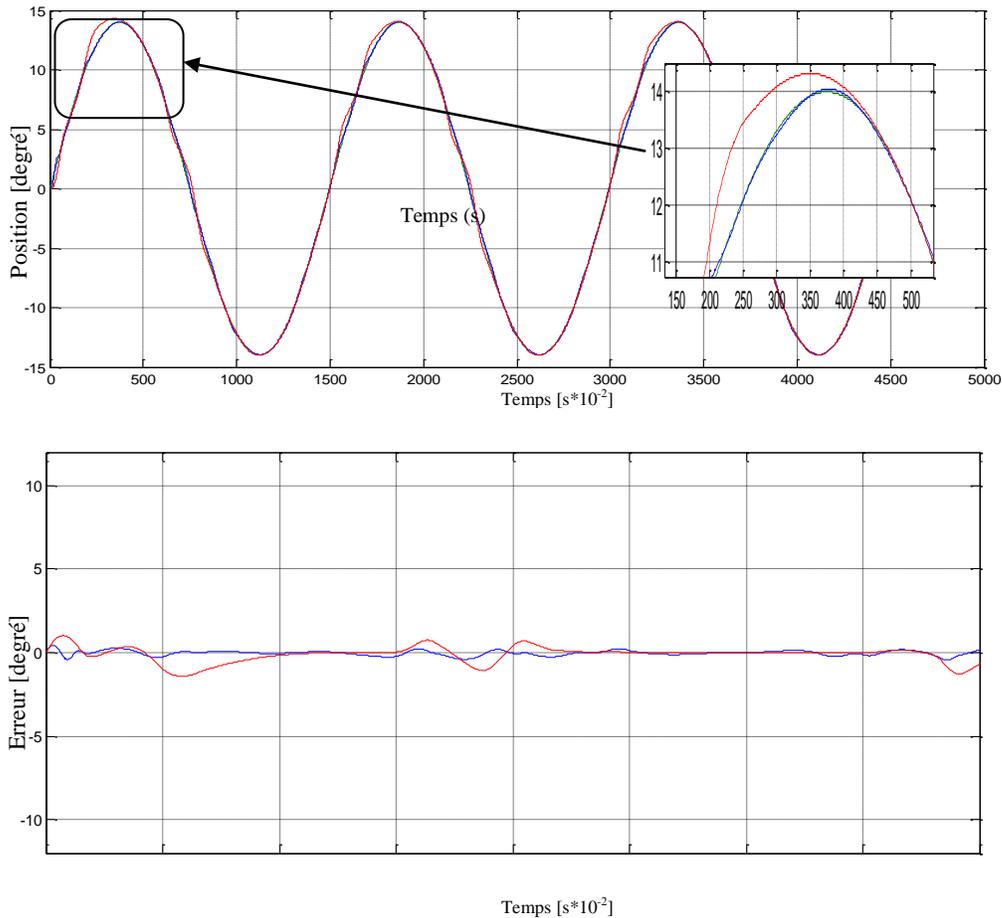


Figure [4.3] : Résultat de simulation de la commande du premier axe en mode poursuite

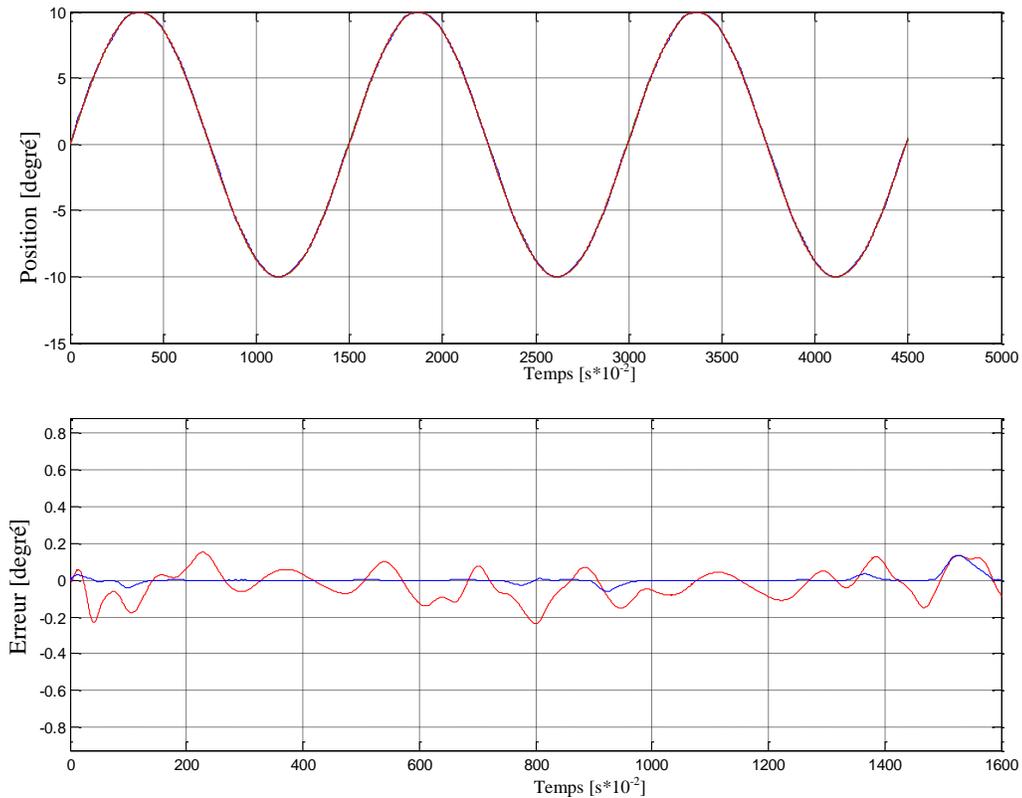


Figure [4.4] : Résultat de simulation de la commande du deuxième axe en mode poursuite.

IV.2.2.3 Interprétation des résultats

D'après les figures [4.3] et [4.4], on remarque que la FTDENTSMC nous a permis plus de précision en termes de poursuite de la trajectoire par rapport à la TDENTSMC. Cela explique bien la superposition du graphe de l'erreur du FTDENTSMC avec l'axe du temps contrairement au contrôleur NSTSMC qu'il a une erreur remarquable.

IV.3 Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de bien constater les améliorations que la logique floue à apporter pour la commande FTDETSMC en remplaçant la commande discontinue par un régulateur flou. Ces améliorations sont essentiellement l'élimination du phénomène de broutement et amélioration du temps de réponse avec une erreur très faible.

CONCLUSION GENERALE

ET PERSPECTIVES

ET PERSPECTIVES

Les travaux présentés dans ce mémoire ont conduit à la réalisation d'une nouvelle commande hybride pour le contrôle en position angulaire et en poursuite de trajectoire d'un bras manipulateur. D'une manière plus précise, il s'agissait d'une commande par terminal sliding mode flou pour un robot manipulateur à deux degré de liberté, permet à la fois de commander le robot sans avoir besoin de modèle et d'assurer une commande robuste en temps fini et avec atténuation de broutement.

De point de vue théorique, nous avons présenté quelques notions de base de la robotique à savoir, le degré de liberté, l'articulation, les transformations géométriques, etc. la commande d'un robot manipulateur que ce soit dans l'espace articulaire ou opérationnelle nécessite de connaître leurs modèles, à cet effet, les modèles géométrique, cinématique et dynamique ainsi que leurs inverses ont été présentés. Les démarche de la modélisation dynamique d'un robot manipulateur à 2 degrés de liberté a été donnée en détaille, ce modèle est utilisé par la suite pour les testes de simulation pour les commandes développées.

Il est très connu que quelque soit la modélisation développée elle présente partiellement le robot à commander. Afin de compenser les erreurs de modélisation, nous avons fait appel à une classe de commande robuste dite commande à structure variable par mode de glissement. La théorique mathématique de ce domaine était l'objet du chapitre 2, dont une nouvelle approche de commande appelée terminal sliding mode a été présentée en détail.

La commande du bras manipulateur à 2-*dll* était l'objet de ce mémoire, nous avons sollicité une variante de la commande par terminal sliding mode connue dans la littérature sous le nom TDENSTSMC cette commande permet de commander le robot manipulateur sans avoir besoin de modéliser ce robot.

Le phénomène de broutement est le principale inconvénient de cette approche, afin de résoudre ce problème nous avons fait appel à la théorique des systèmes d'inférence floue, dont un contrôleur par terminal sliding mode flou (FTDENSTSMC) a été proposé, ce contrôleur nous a permis de non seulement surmonter le problème de broutement mais aussi d'améliorer les performances et la robustesse du robot commandé par TDENSTSMC. A travers des simulations (chapitre 4) nous avons pu voir ces améliorations.

Comme perspectives, nous proposons:

- L'optimisation des paramètres de contrôleur par l'usage des techniques d'optimisation méta heuristique.
- La mise en œuvre expérimentale de l'approche hybride développée

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] S.BORSALI, modélisation des Robots, 2012.
- [2] Wisama Khalil, Modélisation, identification et commande des robots, 1999.
- [3] R.Merzouki, Robotique industriel, 2010-2011.
- [4] A.Yousnadj, M.Hadad, Description et modélisation des systèmes polyarticulés 2005-2006.
- [5] B. Karim, G. Nour, "Conception d'un Régulateur GA-CMAC en vue de piloter un Robot Manipulateur". Mémoire de projet de fin d'études d'ingénieur en électronique, juin 2008.
- [6] Claudio Melchiorri, Dynamic model of robot manipulators.
- [7] Pr. DJELOUAH Hakim, vibrations et ondes mécaniques, Cours & Exercices, 2011-2012.
- [8] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, M. Vidyasagar, Robot Modeling and Control, 2011-2012.
- [9] R. Merzouki, Robotique de Manipulation, Master SMART, 2009-2010.
- [10] Khalil W. Modélisation et identification et commande des Robot Hermès.
- [11] Gangloff J. Cours de robotique ENSPS 3ADEA photonique, Image et cybernétique.
- [12] Benhaj B. Selhaji Y. Commande d'un robot manipulateur par mode glissant d'ordre supérieur.
- [13] Jean-Louis Boimond Université Angers, Robotique.
- [14] LucJaulin, Robotique mobile, 2013.
- [15] David FILLIAT, robotique mobile, 2011.
- [16] R.CHELLAL, Y. BENBELKACEM, Conception d'un contrôleur SMRFNNC en vue de piloter un robot manipulateur à 2 d.d.l, 2009.
- [17] K.G, N. E, N. M, A. H & J. Z, Commande Hybride par Mode Glissant Floue appliquée à un Moteur à induction, 2004.
- [18] Maolin Jin, Jinh Lee, Pyung Hun Chang, Chintae Choi, Practical Nonsingular Terminal Sliding-Mode Control of Robot Manipulators for High-Accuracy Tracking Control, 2009.
- [19] M.Chakib, Commande et Observateur par Modes glissants d'un système de pompage et d'un bras manipulateur, 2009.
- [20] A.Hamzaoui, N.Essounbouli, J.Zaytoon, Command par mode glissant flou d'un **système non linéaire** incertain, 2003.
- [21] f. Plestan, quelques contributions à la théorie de la commande par modes glissants, 2010.
- [22] M. MRABTI, Commande et Observateur par Modes glissants d'un système de pompage et d'un bras Manipulateur, 2009.

- [23] J.P. LaSalle, Some extensions of Liapunov's second method, IRE Trans. Circuit Theory, CT-7 (1960), 520–527.
- [24] Lyapunov Stability Theory, R.M.Murray, Z.Li, S.S.Sastry
- [25] Fuzzy Logic - Controls, Concepts, Theories and Applications, Elmer Dadios, 2012
- [26] Fuzzy Terminal Sliding-mode controller for Robotic Manipulators, Y-C.Huang, T-H S.Li, 2005
- [27] Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators, Yong Feng ,Xinghuo Yu , Zhihong Man , 2002
- [28] On nonsingular terminal sliding-mode control of nonlinear systems, Yong Feng, Xinghuo Yu , Fengling Han, 2012
- [30] Logique floue et SMA : Aide à la décision floue dans les systèmes multi-agents,S.DJAABOUB, 2009
- [31] Introduction à la logique floue Application à la commande floue,Matthieu Lescieux
- [32] Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators,Y.Feng, X.Yu,ZMan, 2002
- [33] FUZZY LOGIC - AN INTRODUCTION, Steven D. Kaehler, 1998.
- [34] Logique floue et SMA : Aide à la décision floue dans les systèmes multi-agents, Mr.DJAABOUB Salim,/2009

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure [I.1] Représentation d'un point dans l'espace.....	4
Figure [I.2] Transformation des repères.....	5
Figure [I.3]: Robot manipulateur à 2 d.d.l.....	9
Figure [II.1] changement de structure avec commutation entre deux retours.	14
Figure[II.2] Changement de structure avec commutation au niveau de l'organe de commande.	15
Figure [II.3]:Établissement du glissement.....	16
Figure [II.4] Variables linguistiques d'un ensemble flou.....	28
Figure [II.5] Formes typiques représentatives des fonctions d'appartenance.	28
Figure [II.6] Représentation des résultats d'inférence.	28
Figure [II.8]: La défuzzification par la méthode du centre de maximum.....	31
Figure [II.9] : La défuzzification par la méthode du centre de gravité.....	31
Figure [II.10]: Défuzzification par la méthode de Sugeno.	31
Figure [III.1] : Schéma bloc de la commande NSTSMC.	37
Figure [III.2] : Schéma bloc de la commande TDENSTSMC.	40
Figure [III.3] : La fuzzification de la surface de glissement.	41
Figure [III.3] : La defuzzification de la sortie.	42
Figure [III.4] : Schéma bloc de la commande FTDENSTSMC.	43
Figure [4.1] : Résultat de simulation du premier axe en mode régulation.	46
Figure [4.2] : Résultat de simulation du deuxième axe en mode régulation.	48
Figure [4.3] : Résultat de simulation de la commande du premier axe en mode poursuite.....	51
Figure [4.4] : Résultat de simulation de la commande du deuxième axe en mode poursuite.....	51

ANNEXE

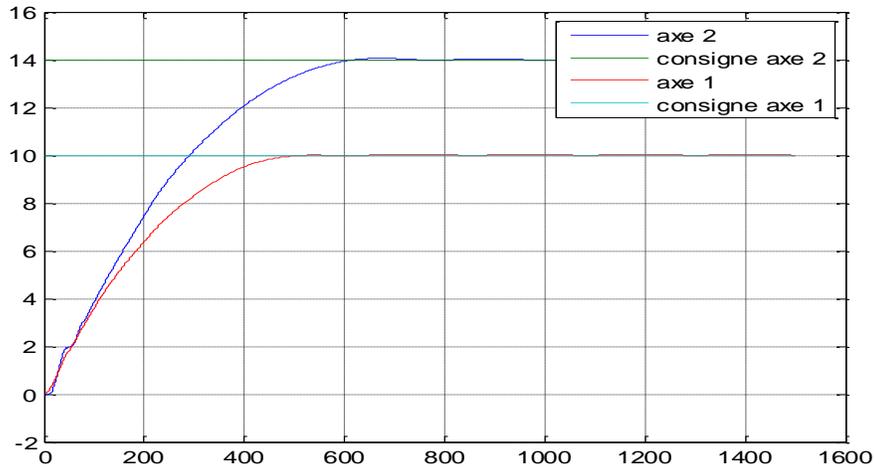
ANNEXE

Testes de robustesse

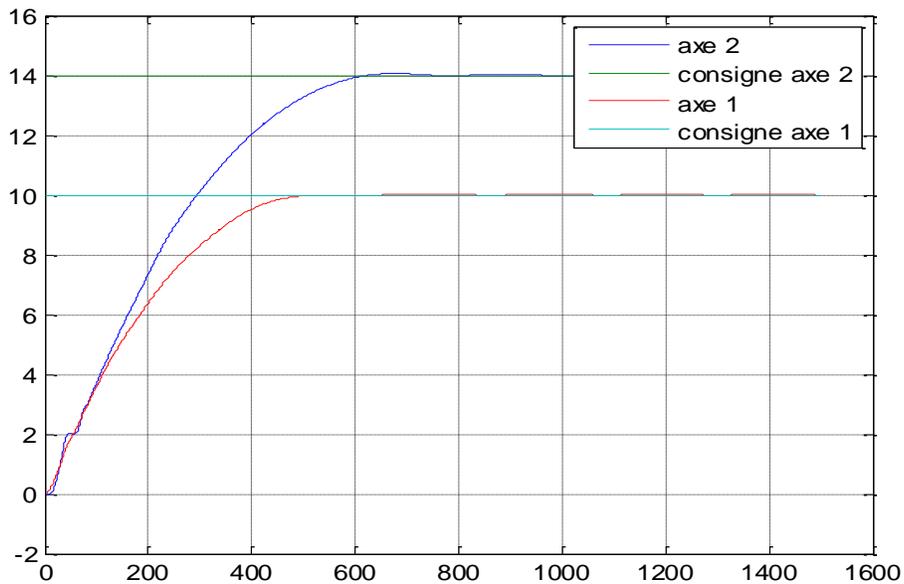
Dans ce passage, nous présentons les résultats de la robustesse des deux axes en variant la masse de deuxième axes en mode de régulation et poursuite de trajectoire comme suit :

Mode de régulation :

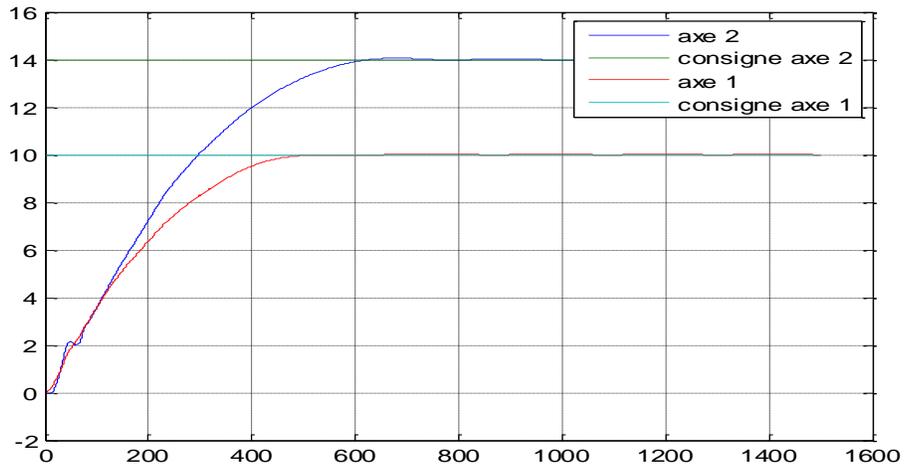
M=1.3 kg



M=1.5 kg

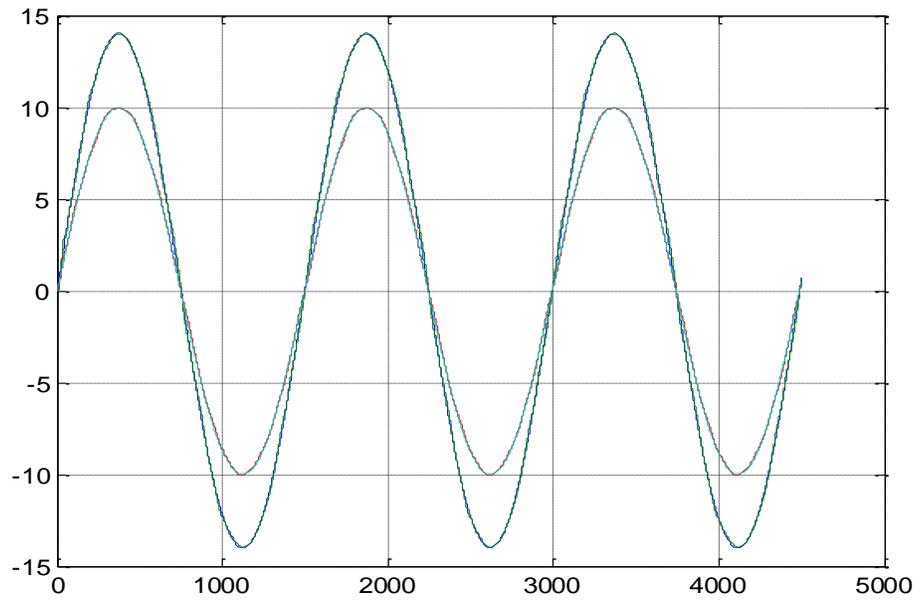


M=1.7 kg

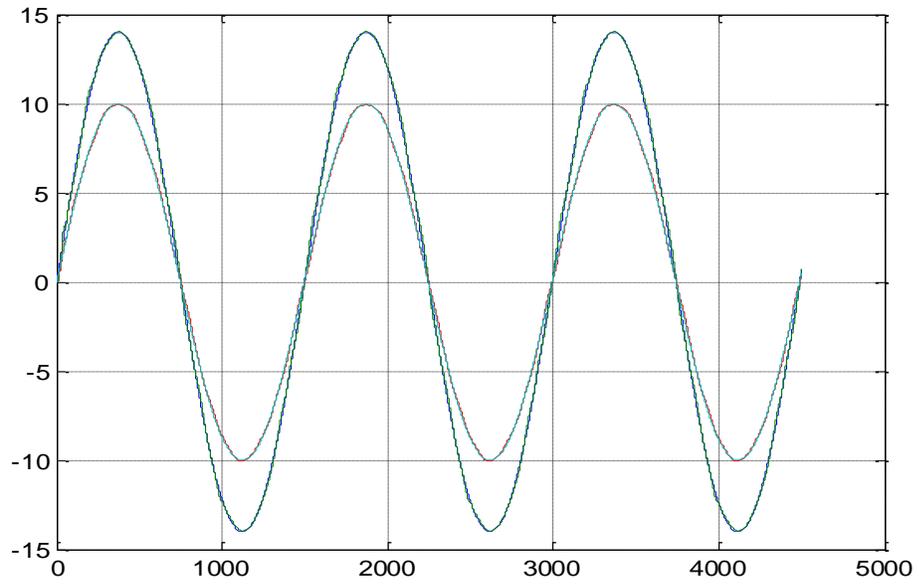


Mode poursuite de trajectoire

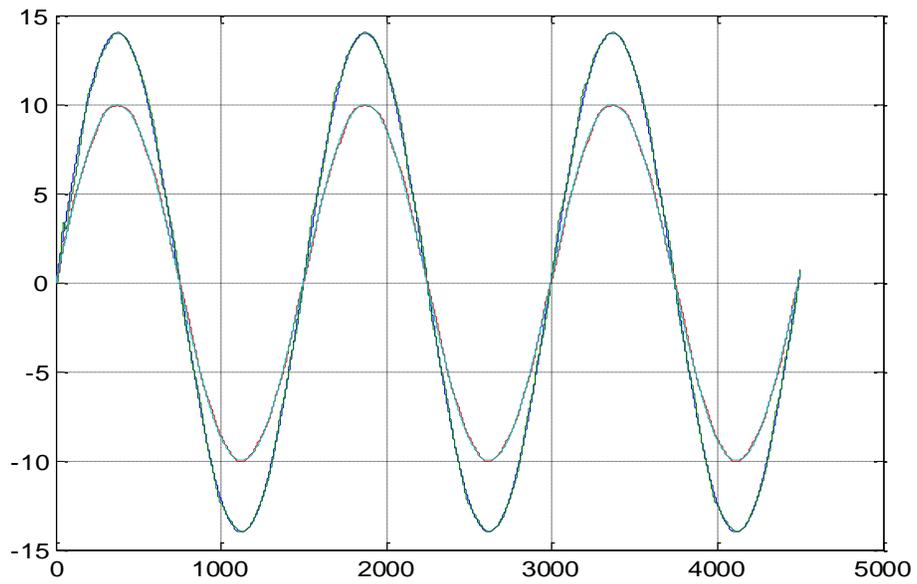
M=1.3 kg



M=1.5kg



M=1.7kg



Résumé :

Le sujet consiste à proposer une nouvelle commande par terminal Sliding mode flou pour un robot manipulateur, cette approche sera pour objectif de compenser les inconvénients de terminal Sliding mode par les avantages de la commande par la logique floue notamment l'effet de broutement.

Ce travail comprendra quatre chapitres :

-Le premier chapitre sera consacré aux notions de base de la modélisation, il décrira les différentes modélisations d'un bras manipulateur. Il donnera à la fin le modèle dynamique a 2 d.d.l d'un bras manipulateur.

-Le deuxième chapitre sera dédié à la présentation de la théorie de la commande par mode de glissement et par la logique floue.

- Le troisième chapitre sera consacré à la commande d'un bras manipulateur à 2 DDL par Non Singular Terminal Sliding Mode Flou.

-Le quatrième chapitre sera pour objectif de présenter les résultats de simulations des commandes développées, ainsi que les tests de robustesse.

Enfin, on terminera par une conclusion générale.

Mots clés :

FNTSMC, NTSMC, TDENTSMC, CSV, Robot manipulateur a 2-ddl, controleur flou, Mode glissent