

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université Kasdi Merbah–Ouargla

Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication
Département d'Electronique et des Télécommunications



PROJET DE FIN D'ETUDES

En vue d'obtention du
Diplôme de Master en Automatique

Filière : Génie électrique

Spécialité : Automatique

Présenté par :

SAGGAI Abd el moula

MEDAB Abd el malek

Thème

**COMMANDE FLOUE MODE GLISSANT
APPLICATION SUR LE SYSTÈME DE
GRUE 3D**

Présenté devant le jury composé de :

<i>Nom et Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Université</i>
S. KADRI	MAA	Président	UKMO
L. BECHEKA	MAA	Examineur	UKMO
B. Benhellal	MAA	Rapporteur	UKMO

Année universitaire : 2016/2017

Remerciement

Nous remercions tout d'abord, à ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience et la force pour réaliser ce modeste travail. Nous tiens, avant tout, à exprimer notre profonde gratitude à notre

encadreur Mr. Belkhir BENCHALLAL, pour la confiance qu'il prodigué pour la direction et tout l'aide qu'il apporté durant toute la durée de ce travail de recherche.

Tous des maîtres de l'université de OUARGLA et spécial les maîtres de département de l'électronique.

Nous adresse aussi nos remerciements à tous nos amis et collègues

Surtout ceux qui nous apportés un soutien moral, patience, une amitié inoubliable et précieuse et son dévouement qui fut particulièrement indispensable.

Enfin, nous tiens à remercier tous nos familles pour leurs encouragements et leur soutien inconditionnel.

Merci à tous



Dédicaces

À nos chères mères ;

À mon père El Tahar ;

À la mémoire de mon père ;

À tous nos proches de la famille MEDAB et SAGGAI,

et plus particulièrement, nos sœurs et nos frères tout à son nom et sans oublier les familles Hani, Ben Nadji et Hadji ;

À tous nos chers amis et mes collègues de l'Université de

Ouargla D.Djamel Eddine ; M.

Romeyssa ; L. Yousra ; H. Elmoundher ; M.

Khaled ; S. Djamel ; O. Mohi ; B. Riad ; H. Bilel ; S. Chouaib ; Ayoub

BMT

Et à tous ce qui ont enseigné moi au long de ma vie scolaire

<i>Chapitre I</i>		
Figure I.1	La différence entre les deux types de la logique	p.5
Figure I.2	Ensembles flous type-1	p.6
Figure I.3	Caractéristiques des sous-ensembles flous type-1	p.8
Figure I.4	Variable linguistique type-1	p.8
Figure I.5	Système à commande floue	p.9
Figure I.6	Schéma synoptique générale d'un Régulateur flou type-1	p.10
Figure I.7	Représentation tridimensionnelle d'un ensemble flou type-2 gaussien	p.15
Figure I.8	Fonction d'appartenance d'un ensemble flou type-2	p.16
Figure I.9	Structure d'un système flou type-2	p.18
<i>Chapitre II</i>		
Figure II.1	configuration par changement de retour d'état	p.25
Figure II.2	Configuration avec loi de commutation au niveau de l'organe du commande	p.25
Figure II.3	Changement de structure avec ajout de la commande équivalente	p.26
Figure II.4	Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase	p.27
Figure II.5	Linéarisation exacte de l'écart	p.28
Figure II.6	Principe de la commande en mode glissant avec commande équivalente	p.30
Figure II.7	Interprétation de U_{eq}	p.31
Figure II.8	Représentation de la fonction Sign	p.32
Figure II.9	Phénomène de Chattering	p.33
Figure II.10	Les différent solutions pour éliminer le chattering	p.34
Figure II.11	Schéma de la commande hybride FSMC	p.35
Figure II.12	pendule inverse	p.36
Figure II.13/14.a	La trajectoire de système	p.38/39
Figure II.13/14.b	La command de système	p.38/39
Figure II.13/14.c	L'erreur de poursuite	p.38/39
FigureII.15	fonction d'appartenances	p.40
FigureII.16/17.a	La trajectoire de système	p.40/41
FigureII.16/17.b	La command de système	p.41/42
FigureII.16/17.c	L'erreur de poursuite	p.41/42
<i>Chapitre III</i>		
FigureIII.1	Le système 3D crane de laboratoire	p.45
FigureIII.2	le système de la grue 3D leurs coordonnées et forces	p.46
FigureIII.3	Schéma de régulateur FSMC avec entrée s, \dot{s}	p.47
FigureIII.4	Schéma de régulateur FSMC avec entrée e, \dot{e}	p.49
FigureIII.5	Comportement dynamique du (3D crane) poursuite trajectoire désiré et son angles d'oscillations de la masse externe (FLC type 1)	p.51
FigureIII.6	Comportement dynamique du (3D crane) poursuite trajectoire désiré et son angles d'oscillations de la masse avec une perturbation externe (FLC type 1)	p.52
FigureIII.7	Comportement dynamique du (3D crane) poursuite trajectoire désiré et son angles d'oscillations de la masse (FLC type 2)	p.55

Chapitre I

Tableaux I.1	les formes les plus utilisées de la fonction d'appartenance type-1	p.6
Tableaux I.2	Les opérateurs de base sur les sous ensemble floue type-1	p.7
Tableaux I.3	La table de Mac Vicar-Whelan	p.11
Tableaux I.4	Les deux méthodes les plus utilisées de Défuzzification	p.12
Tableaux I.5	Les opérateurs de base sur les sous ensemble floue type-2	p.17



Chapitre II

Tableaux II.1	matrice d'inférence ($e \hat{e}$)	p.43
Tableaux II.2	matrice d'inférence ($s \hat{s}$)	p.44

Grandeurs utilisées	
μ	dégré d'appartenance
U	univers du discours
A	ensemble flou
μ_A	fonctions d'appartenance
$h(A)$	hauteur
$supp(A)$	support
V	une variable classique
T_v	sous-ensemble
R_s	commande réelle (non flou)
e	L'erreur
de	la dérivée de l'erreur
σ_x	écart de fonction d'appartenance
σ_m	déviations de fonction d'appartenance
$*$	t-norme
\vee	le maximum t-conorme
U	commande
x	Vecteur d'état
$f(x)$	Champ de vecteur
$g(t)$	Matrice de commande
$u(t)$	Vecteur de commande
K	constant positive
s	surface de glissement
λ	Constante positive
r	degré relative
$V(x)$	fonction de Lyapunov
η	Constante positive
U_{eq}	command équivalent
U_d	commande discontinue.
q	Constante positive
θ	angle
$\dot{\theta}$	vitesse angulaire
θ_d	angle désirée
d	perturbation externe

g	la constante de gravitation,
Δ (m ; M)	les incertitudes des masses

Sigles utilisés	
T-S	Takagi Sugeno
SMC	commande par mode glissant
FLC	commande par logique floue
FSMC	commande par mode glissant floue
CSV	commande à structure variable
MG	mode glissant
MRP	mode de régime permanent
MC	mode de convergence
Sat	saturation
FBF	fonctions de bases floues
<i>ref</i>	signe d'une grandeur de référence

Remerciement	I
Dédicace	II
Liste des tableaux et figures	III
Notion symbolique.....	V
Sommaire.....	VII
Introduction Générale.....	Page 1
 CHAPITRE I  LA LOGIQUE ET LA COMMANDE FLOUE	
I.1.Introduction.....	Page 3
I.1.1. Historique.....	Page 3
I.1.2. Domaines d'application.....	Page 4
I.2. Principes et définitions de la logique floue.....	Page 4
I.2.1 Logique classique et logique floue	Page 4
I.3. Les concepts de bases.....	Page 5
I.3.1. Fonction d'appartenance type-1.....	Page 5
I.3.2. Univers de discours.....	Page 6
I.3.3. Ensembles flous type-1.....	Page 6
I.3.3.1. Opérateur de base sur les sous ensemble floue type-1.....	Page 7
I.3.3.2. Caractéristiques des sous-ensembles flous type-1.....	Page 7
I.3.3.3. Opérations sur les ensembles flous type-1.....	Page 8
I.3.4. Variable linguistique type-1.....	Page 8
I.4. Commande par logique floue.....	Page 9
I.4.1. Structure du réglage par logique floue.....	Page 9
I.4.2. Structure d'un régulateur Flou type-1.....	Page 9
I.4.2.1. Fuzzification.....	Page 10
I.4.2.2. base de connaissance.....	Page 10
I.4.2.3. Moteur d'inférence.....	Page 11
I.4.2.4. Défuzzification.....	Page 11
I.4.3. Types de régulateurs flous.....	Page 12
I.4.3.1. Régulateur flou de type Mamdani.....	Page 12
I.4.3.2. Régulateur flou de type Sugeno.....	Page 12
I.5. Les Avantages et les Inconvénients de la commande par logique flou type-1..	Page 13
I.6. Généralités sur la logique floue type-2.....	Page 14
I.6.1. Représentation d'un ensemble flou type-2.....	Page 14
I.6.2. Types d'ensembles flous type-2.....	Page 15
I.6.3. Opération sur les ensembles floue type-2.....	Page 16

I.6.4. Structure d'un système flou type-2.....	Page 17
I.6.4.1. Fuzzification.....	Page 18
I.6.4.2. Base de règle.....	Page 18
I.6.4.3. Mécanisme d'inférence.....	Page 18
I.6.4.4. Réduction de type.....	Page 19
I.6.4.5. Défuzzification.....	Page 21
I.7.conclusion.....	Page 22

CHAPITRE II

COMMAND HYBRIDE GLISSANT-FLOUE

II.1. Introduction.....	Page 24
II.2. Systèmes à structure variables.....	Page 24
II.2.1. Configuration de base pour les systèmes à structure variable.....	Page 24
II.2.1.1. Structure par commutation d'une contre réaction d'état.....	Page 25
II.2.1.2. Structure niveau de l'organe de commande.....	Page 25
II.2.1.3. Commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande équivalente.....	Page 26
II.3. Théorie de la commande par modes glissants.....	Page 26
II.3.1. Principe et Conception de la commande par mode de glissement.....	Page 26
II.3.2. Synthèse de commande par modes glissants.....	Page 27
II.3.2.1. Choix de la surface de glissement.....	Page 27
II.3.2.2 condition d'existence du mode de glissement.....	Page 28
II.3.2.3. Loi de commande.....	Page 29
II.4. Phénomène de broutement (chattering).....	Page 31
II.5. Elimination du phénomène de broutement.....	Page 32
II.5.1. Loi d'approche "approch law".....	Page 32
II.5.2. Solution de couche limite.....	Page 33
II.6. Domaine d'application du réglage par mode glissant.....	Page 34
II.7 Les avantages et les Inconvénients de la commande par mode glissant.....	Page 34
II.8. La Command hybride glissante-floue. (FSMC).....	Page 35
II.8.1. Application.....	Page 36
II.9. Conclusion.....	Page 43

CHAPITRE III

DISCUSSIONS EXPÉRIMENTAL ET SIMULATION

III.1.Introduction	Page 45
III.1.1.Définition de système de la grue	Page 45

III.1.2.Le modèle mathématique du system « 3DCrane »	Page46
III.2. Résultats expérimentaux et interprétation.....	Page47
III.2.1 Résultats obtenus sans perturbation du régulateur FSMC-type1.....	Page47
III.2.2 Résultat obtenus avec perturbation du régulateur FSMC-type1.....	Page51
III.3.Résultats de Simulation et interprétation.....	Page52
III.4.Conclusion.....	Page56
Conclusion Générale.....	Page58
Bibliographie	
Annexe	
Résumé	

Introduction Générale

Dans ces dernières années, la recherche dans le domaine de la commande des différents genres des grues a connu une évolution significative, à cause de ces propriétés particulières, elle ouvre la porte à toutes les applications pratiques, efficacité, rapidité dans la manipulation des tâches. Les motivations de cette avancée étaient d'une part, la généralisation de l'utilisations des grues dans des domaines variés, et d'autre part, l'exigence de plus en plus accrue au niveau des performances dans la réalisation des tâches par ceux-ci.

Les grues à cinq degrés de liberté sont des grues manipulateurs à trois axes à commander (X ;Y ;Z) , ces grues sont efficaces pour des gros travaux nécessitant une grande portée et une précision ainsi une fiabilité dans l'exécution des tâches, on les trouvent souvent dans les zones industrielles (les usines, les entreprises, chantiers), les domaines de la marchandise , la construction , surtout dans les ports et dans les domaines qui nécessitent une élévation ou un déplacement des volumes ; mais ils présentent un inconvénient majeur due à les balancements de volume porté en cas de déplacement, ces balancements peuvent influencer d'une façon directe sur le travail normalisé de la grue et posent des dommages catastrophique (humain, environnemental, financières) surtout dans le domaine nucléaire; c'est un problème d'élimination des balancements et des perturbations externe ,donc il faut mise en évidence ce genre des grues 3D et éradiquer tous les performances peuvent influera à la compétence de ces grues.


Une grue 3D est un manipulateur idéal, précis, fiable et stable. L'objectif des stratégies de commande est d'améliorer la repense des 3 axes simultanément. En réalité, cette simultanéité n'est pas facile à atteindre, c'est un compromis réaliste qu'il faut chercher une commande suffisante pour combine entre les paramètres des trois axes.

Un grand nombre d'approches ont été développées sur la commande de la grue 3D, la diversité des solutions proposées est en rapport avec la complexité du problème à résoudre. Parmi les solutions qu'ont été proposées et basée sur l'importance d'apporter des travaux de recherche sur la modélisation dynamique et la linéarisation des paramètres du système.

Notre travail a pour objectif d'apporter une contribution à la commande de la grue et éliminer au maximum les balancements de la masse apportée. Beaucoup de problèmes sont discutés avec l'objectif principal de montrer que la grue 3D consiste une complexité pour trouver une combinaison entre les 3 axes à commandé ainsi que les angles. Pour pouvoir effectuer la commande de la grue, nous avons synthétisé deux types de commande.

Une commande pour la modélisation du système non linéaire, qui consiste à la logique floue (approximation universel) (type 1 et type 2).

L'autre commande est concernée la linéarisation des paramètres du système, elle porte la commande robuste a structure variable (Commande par mode glissant), des résultats expérimentaux seront communiquer à la fin.

 Le présent mémoire expose le travail décrit ci-dessus et se devise en 3 chapitres :

- ❖ Le premier chapitre est divisé en deux parties. La première sera consacrée à introduire des certains fondements théoriques et notions de base de la logique et des systèmes flous de type-1. Ensuite, nous allons aborder une extension de la logique floue type 1 appelé « logique floue type-2 », ces notions fondamentales différent par rapport au type-1 et les avantages et les inconvénients des deux types, puis la structure générale d'un contrôleur flou type-1 et type-2 avec les différents modèles utilisés dans sa conception.
- ❖ Dans le deuxième chapitre, notre démarche a été d'une rappelle sur les théories fondamentales et les notions essentielles telles que l'attractivité des surfaces de glissement, les conditions d'existence, les propriétés de robustesse, la commande équivalente et la dynamique en régime glissants. L'inconvénient majeur de cette méthode est l'apparition du phénomène de réticence, quelques techniques de réduction du broutement (chattering) sont exposées, à la fin de ce chapitre on a appliqué une combinaison entre la commande floue et la loi de commande par mode glissante cette commande hybride glissante floue (FSMC) été appliqué sur un pendule inversé, nous discutons les résultats de simulation fait obtenus sous MATLAB.
- ❖ Le dernier chapitre est le beurre de notre mémoire, il sera consacré à l'étude expérimentale de la loi de la commande hybride (FSMC) par un régulateur flou type-1 puis en type-2 appliqués au modèle réel de la grue à 3 degrés de liberté et les résultats des travaux expérimentaux sont présentés et interprétés ainsi que les performances due à cette stratégie de commande

I.1.Introduction :

En automatique, la majorité des approches de la commande non linéaire exige la disponibilité d'un modèle mathématique du système, et ceci n'est pas toujours réalisable à cause de l'imprécision et l'incertitude liées aux paramètres mal connus, difficilement identifiables et des dynamiques négligées. D'autre part, les performances assurées seront directement liées à l'exactitude du modèle utilisé. Par conséquent, les automaticiens sont confrontés au problème de définir un modèle mathématique précis sachant que les systèmes deviennent de plus en plus complexes, les méthodes de modélisation traditionnelles s'avèrent souvent incapables de représenter le comportement global d'un système. L'utilisation des contrôleurs basés sur l'expertise humaine peut être une alternative à la commande de ce type de systèmes. Parmi ces approches, nous distinguons celles utilisant la commande par logique floue

Dans ce chapitre nous introduisons, dans la première partie, les concepts de base d'un système flou type-1, ainsi que la conception des contrôleurs flous type-1.

Ensuite ; Dans la seconde partie, nous intéressons au système flou type-2 ainsi que ces contrôleurs afin montrer la différence entre les deux types de systèmes et de régulateurs flous.

I.1.1. Historique :

Apparition de la logique floue

- **1965** : naissance du concept flou avec le Pr. « Zadeh Lotfi ». (Université de Berkley en Californie), il introduit la théorie des « sous-ensembles flous ».

Premières applications et Essor

- **1970** : premières expériences en Europe.
- **En 1973** : le Pr. « Zadeh » publie un article (dans l'IEEE Transactions on Systèmes, Man and Cybernetics) qui fit date, Il y mentionne pour la première fois le terme de variables linguistiques
- **En 1974** : le Docteur Mamdani (Université de Londres) réalise un contrôleur flou expérimental sur un moteur à vapeur.
- **En 1978**: F.L. Smidth & Co. A/S (au Danemark), mettent en application la théorie de la logique floue dans le contrôle de fours à ciment,
- **Dans les années 80**, plusieurs applications commencent à immerger (notamment au Japon). [1]
- **1985** : les premiers, les japonais introduisent des produits grand public « Fuzzy Logic Inside »

- **En 1987**, l'explosion du flou au Japon (avec le contrôle du métro de Sendai), et qui atteint son apogée en 1990.
- **Aujourd'hui**, une vaste gamme de nouveaux produits ont une étiquette « produit flou » (Fuzzy). [1]

I.1.2. Domaines d'application :

Lorsque la logique floue connu beaucoup de succès et devenus un sujet principal dans le domaine de la recherche des systèmes intelligents est rendue très intéressante grâce aux ces applications pratique efficace dans divers domaines ; on va citer quelque unes : [2]

1. La robotique	2. La sismologie	3. La communication homme-machine
4. La météorologie	5. La linguistique	6. L'informatique
7. L'informatique	8. La médecine	9. L'intelligence artificielle

I.2. Principes et définitions de la logique floue :

La logique floue (Fuzzy logic) propose, une approche des problèmes beaucoup plus pragmatique que mathématique, dans certains problèmes où les mathématiques peinent par impossibilité ou difficulté de modélisation, la logique floue apporte une étonnante efficacité.

La logique floue est très proche du processus de la pensée humaine. Elle met en œuvre un jeu de règles comme, implicitement, nous en utilisons chaque jour.

Elle apprécie les variables d'entrées de façon approximative (faible, élevée, loin, proche), fait de mêmes pour les variables de sorties (freinage léger ou fort) et édicte un ensemble de règles permettant de déterminer les sorties en fonction des entrées.

I.2.1 Logique classique et logique floue :

Dans la logique classique, les variables gérées sont Booléennes. C'est à dire qu'elles ne prennent que deux valeurs 0 ou 1. La logique floue a pour but de raisonner à partir de connaissances imparfaites qui opposent résistance à la logique classique. Pour cela la logique floue se propose de remplacer les variables booléennes par des variables flous, nous présentons un exemple simple pour comprendre la différence de la logique floue sur la logique classique.

Exemple :

Dans la logique classique, **L'Age** d'un être humain peut être qualifiée par le terme « vieux » ou « jeune » ; par contre dans la logique floue, des échelons d'appréciation intermédiaires de la variable Age sont possibles. « **L'Age** » devient une variable linguistique ces valeurs (termes) linguistique sont par exemple : « vieux », « moyen », « jeune ». L'Age de 33 ans par exemple dans la logique classique correspond au seul ensemble « moyen », alors que dans le modèle flou, elle appartient à la fois aux ensembles « jeune » et « moyen » comme le montre la figure ci-dessous.

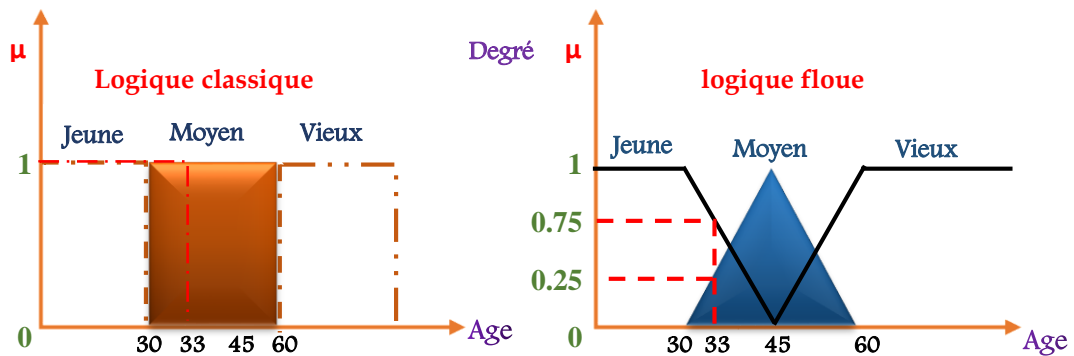


Figure I.1 : La différence entre les deux types de la logique.


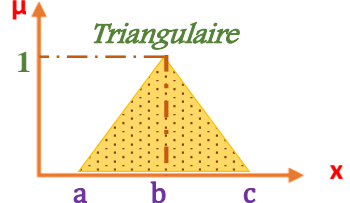

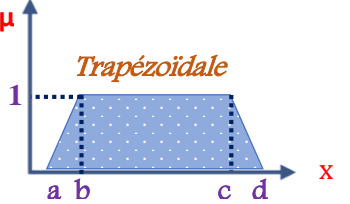

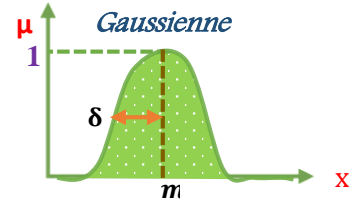

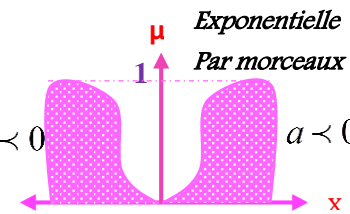

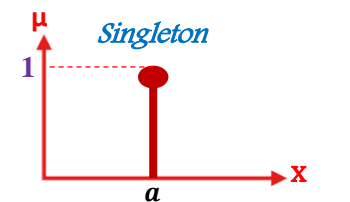
I.3. Les concepts de bases.

I.3.1. Fonction d'appartenance type-1.

Une définition des variables linguistiques type-1 à l'aide des fonctions d'appartenance type-1 est nécessaire dans le but de traiter des déductions floues par ordinateur.

Dans ce contexte, est attribuée à chaque valeur de la variable linguistique type-1 une fonction d'appartenance type-1, dont la valeur varie entre 0 et 1. Le plus souvent, nous utilisons des fonctions d'appartenance de type triangulaire ou trapézoïdale gaussienne. [3]

Tableaux I.1 : les formes les plus utilisées de la fonction d'appartenance type-1

Fonction	La Forme Algébrique	Forme
 <u>Triangulaire</u>	$u(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right)$	
 <u>Trapézoïdale</u>	$u(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right)$	
 <u>Gaussienne</u>	$u(x) = \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\delta^2}\right)$	
 <u>Sigmoïdale</u>	$u(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a(x-c))}$	
 <u>Singleton</u>	$\mu_A(x) = \begin{cases} m & \text{pour } x = a \\ 0 & \text{pour } x \neq a \end{cases}$	

I.3.2. Univers de discours :

L'univers de discours représente l'ensemble de référence ou le domaine de la variation de la variable linguistique. [4]

I.3.3. Ensembles flous type-1 :

Soient U l'univers du discours.

A : un sous-ensemble de U

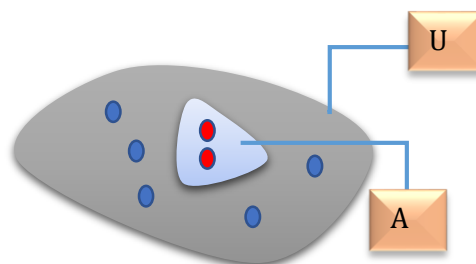


Figure I.2 : Ensembles flous type-1

Définition : Un sous ensemble flou A de U est défini par une fonction d'appartenance qui associe à chaque élément de U le degré $\mu_A(x)$, compris entre 0 et 1.

$$A = \sum_{u_i \in U} \mu(u_i)/u_i \quad \text{I.1}$$

- Si U est discret, A est représenté par :

$$A = \sum_{u_i \in U} \mu(u_i)/u_i \quad \text{I.2}$$

- Si U est continue, A est représenté par :

$$A = \int_u \mu(u)/u_i \quad \text{I.3}$$

I.3.3.1. Opérateur de base sur les sous ensemble floue type-1.

Supposons que **A** et **B** sont deux sous-ensembles flous définis dans un univers discours X par les fonctions d'appartenance μ_A et μ_B . On peut définir des opérations ensemblistes telles que l'intersection, l'union et le complément grâce à des opérations sur les fonctions d'appartenance.

Tableaux I.2 : Les opérateurs de base sur les sous ensemble floue type-1

Opérateur	Forme Algébrique	Schéma Significatif
▪ Intersection	$\forall x \in X$ $\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$	
▪ Union	$\forall x \in X$ $\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$	
▪ Complément	$\forall x \in X$ $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$	

I.3.3.2. Caractéristiques des sous-ensembles flous type-1 :

On peut décrire les caractéristiques d'une fonction d'appartenance type-1 qui représente un sous-ensemble A sur un univers de discours U par : [5].

- Sa hauteur : hauteur : $h(A) = \sup_{x \in X} (\mu_A(x))$ I.4

- Son support : $\text{supp}(A) = \{x \in X / \mu_A(x) \neq 0\}$ I.5

- Le noyau : $\text{noyau}(A) = \left\{x \in \frac{X}{\mu_A(x) = 1}\right\}$ I.6

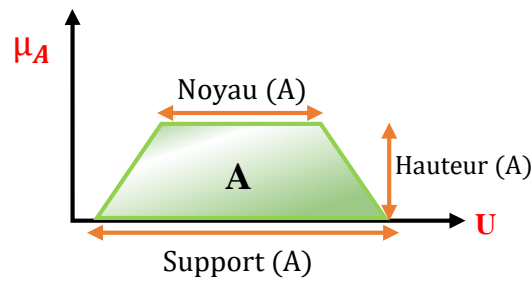


Figure I.3 : Caractéristiques des sous-ensembles flous type-1

I.3.3.3. Opérations sur les ensembles flous type-1 :

Comme dans le cas des ensembles « classiques », les opérations logiques d'union (ou), d'intersection (et) et de complémentarité (non) peuvent être appliquées aux ensembles flous type-1. Leur définition n'est pas unique. Les définitions les plus souvent rencontrées sont : le max et la min (**Mamdani**), le produit et la somme-produit (**Sugeno**) [6]. :

$$\text{Mamdani: } \mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \text{I.7}$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \text{I.8}$$

$$\text{Sugeno: } \mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - (\mu_A(x) \cdot \mu_B(x)) \quad \text{I.9}$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = (\mu_A(x) \cdot \mu_B(x)) \quad \text{I.10}$$

$$\text{Dans les deux cas } \overline{\mu_A(x)} = 1 - \mu_A(x) \quad \text{pour } x \in U \quad \text{I.11}$$

I.3.4. Variable linguistique type-1 :

Une variable linguistique type-1 est définie par un triplet (V, U, T_v) où V représente une variable classique (vitesse, température,) définie sur l'univers de discours U . T_v désigne le sous-ensemble flou repérés par leur label A_i : on écrit ainsi

$$T_v = (A_1, A_2, \dots, A_N)$$

Une variable linguistique peut être représentée graphiquement, comme dans la figure (I.4) qui représente une variable définie comme $\{V, U, T_v = (A_1, A_2, A_3, A_4)\}$.

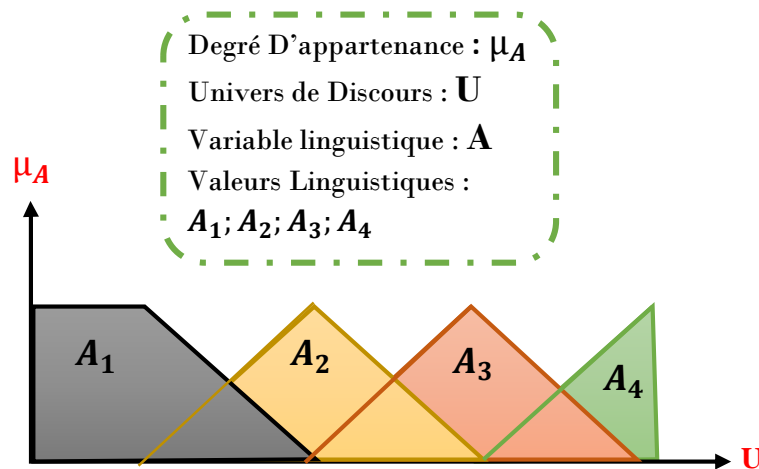


Figure I.4 : Variable linguistique type-1

I.4. Commande par logique floue :

I.4.1. Structure du réglage par logique floue :

Le contrôle par logique floue est chargé de calculer à chaque instant la commande réelle R_s (non floue) à appliquer au système afin de réaliser l'objectif de contrôle qui est l'annulation de l'erreur de réglage $e(k) = I_{ref}(k) - y(k)$ (la sortie mesurée-la référence). [3].

Les entrées de réglage sont en général :

- | e : l'erreur, elle est définie par la différence entre la consigne et la grandeur à réguler.
- | de : la dérivée de l'erreur.

La sortie du régulateur est donnée par :

$$\Rightarrow R_s(k) = R_s(k-1) + dR_s(k) \quad \text{I.12}$$

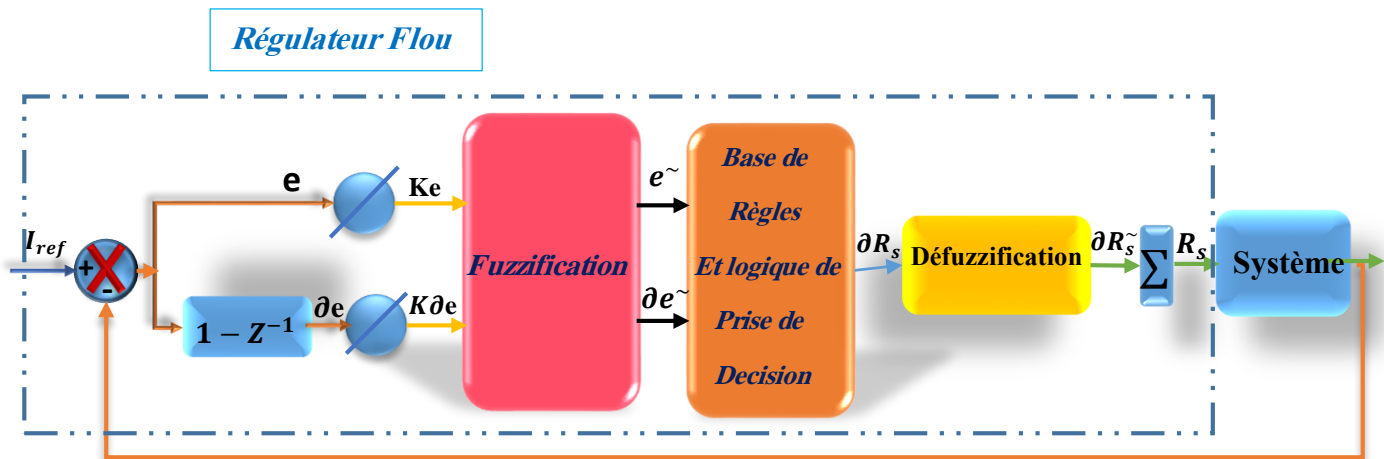


Figure I.5 : Système à commande floue

I.4.2. Structure d'un régulateur Flou type-1 :

Un régulateur flou type-1 est composé de 4 blocs principaux (fig. I.6)

- ⊗ Interface de Fuzzification.
- ⊗ Base de Connaissances.
- ⊗ Moteur D'inférence.
- ⊗ Interface de Défuzzification.

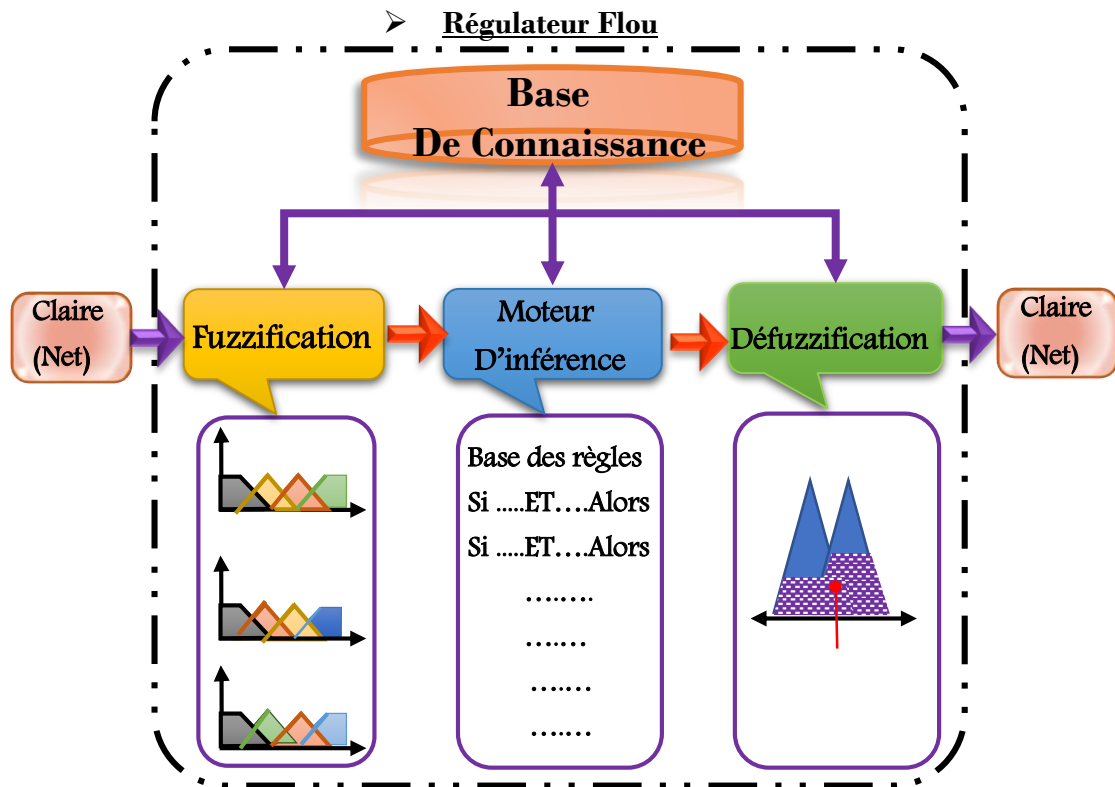


Figure I.6 : Schéma synoptique générale d'un Régulateur flou type-1

I.4.2.1. Fuzzification

C'est l'opération de projection des variables physiques réelles sur des ensembles flous caractérisant les valeurs linguistiques prises par ces variables. le choix de la forme des fonctions d'appartenance (triangulaires, trapézoïdales, exponentielles, gaussiennes,) est arbitraire.

Les formes triangulaires facilitent la programmation ce qui explique qu'elles soient le plus fréquemment utilisées. Quant au nombre de fonctions d'appartenance, il est généralement impair car elles se répartissent autour de zéro. [5].

I.4.2.2. base de connaissance

La base de connaissance est composée de deux blocs :

- | la base de données : qui fournit les définitions nécessaires utilisées pour définir les règles de contrôles linguistiques et la manipulation des données floues dans le contrôleur.
- | la base de règles : qui caractérise les buts et stratégies de commande émis par les experts du domaine au moyen d'un ensemble de règles linguistiques du contrôle.

a)- Table De Décision:

La table de décision contient l'ensemble des règles floues nécessaire dans la commande du système. Parmi Les tables standards la table *Mac Vicar - Whelan* (TAB. I-3) peut être appliquée à Plusieurs problèmes de commande floue.

Tableaux I.3 : La table de *Mac Vicar-Whelan*

<i>e</i> <i>de</i>	<u>NG</u>	<u>N</u>	<u>EZ</u>	<u>P</u>	<u>PG</u>
<u>NG</u>	<i>NG</i>	<i>NG</i>	<i>NG</i>	<i>N</i>	<i>EZ</i>
<u>N</u>	<i>NG</i>	<i>NG</i>	<i>N</i>	<i>EZ</i>	<i>P</i>
<u>EZ</u>	<i>NG</i>	<i>N</i>	<i>EZ</i>	<i>P</i>	<i>PG</i>
<u>P</u>	<i>N</i>	<i>EZ</i>	<i>P</i>	<i>PG</i>	<i>PG</i>
<u>PG</u>	<i>EZ</i>	<i>P</i>	<i>PG</i>	<i>PG</i>	<i>PG</i>

I.4.2.3. Moteur d'inférence :

a) -Les méthodes d'inférence :

C'est le mécanisme de décision. Il permet à partir d'un fait observé de la base des règles floues une décision en exploitant le raisonnement approximatif.

Dans les inférences de régulateur par logique floue interviennent les opérateurs ET et OU. L'opérateur ET s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle tandis que l'opérateur OU lie les différentes règles. [5].

Il existe plusieurs méthodes pour réaliser ces opérateurs dans une inférence et qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance à savoir :

- ♣ **Méthode Max-Min (Mamdani)**
- ♣ **Méthode Max-Produit (Larsan)**
- ♣ **Méthode Somme-Produit(Sugeno)**, la plus utilisée car son temps de calcul est court.

I.4.2.4. Défuzzification :

La défuzzification consiste à transformer l'ensemble flou résultant de l'agrégation des règles en une grandeur de commande précise. Là aussi il existe plusieurs méthodes, parmi lesquelles. [7]

✓ La méthode de la hauteur	✓ La moyenne des maximas	✓ Le centre des maximas
✓ Le premier des maximas	✓ Le centre de gravité	✓ Le centre de la plus
✓ Le dernier des maximas	✓ Le centre des aires	grande surface

Tableaux I.4 : Les deux méthodes les plus utilisées de Défuzzification

Méthode	Formule	Schéma Significatif
• <i>La moyenne des maximas</i>	$u = \frac{\sum_{i=1}^n h_A(x_i) * x_i}{\sum_{i=1}^n h_A(x_i)}$	
• <i>Centre de gravité</i>	$u = \frac{\sum_{i=1}^n x_i * v_i}{\sum_{i=1}^n v_i}$	

☞ **Remarque** : la méthode de Centre de Gravité est la plus utilisée car quoiqu'elle est coûteuse en termes de calcul, mais elle est plus performante que les autres méthodes.

I.4.3. Types de régulateurs flous.

I.4.3.1. Régulateur flou de type *Mamdani* :

Dans ce type, les conclusions sont symboliques ou linguistiques et le calcul de la sortie nécessite l'utilisation d'une méthode de défuzzification.

I.4.3.2. Régulateur flou de type *Sugeno* :

Ce modèle de T-S [8]. Devient la technique la plus utilisée car sa simplification de représenter n'importe quel système non-linéaire complexe avec des règles floues réduite par rapport au type de Mamdani, et aussi la conséquence qu'elle est fonction numérique. Un modèle Takagi-Sugeno flou est défini par la notion des règles floues sous la forme suivante :

$$\text{Règl} : \text{Si } z_1(t) \text{ est } M_{i1} \text{ et } \dots \text{ et } z_p(t) \text{ est } M_{ip}$$

$$\text{Alors } y_i = a_0^i + a_1^i z_1(t) + a_2^i z_2(t) + \dots + a_p^i z_p(t) \quad \text{I.12}$$

Alors, que M_{i1}, \dots, M_{ip} sont les ensembles flous, a_0^i, \dots, a_p^i , sont les coefficients des i ème conséquence linéaire et aussi c'est la sortie de i ème valeur numérique de la sortie pour le modèle flou de T-S est calculée comme suit :

$$y = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(t) y_i}{\sum_{i=1}^r w_i(t)} \quad \text{II.13}$$

Avec, $0 < (t) < 1$, $\sum_{i=1}^r w_i(t) > 0$ et $w_i(t) = \prod_{j=1}^p M_{ij}(z_j(t))$, $M_{ij}(z_j(t))$ est le degré de la fonction d'appartenance de $z_j(t)$ en M_{ij} . (I.13) donne un modèle T-S flou affine, pour $a_0^i = 0$, on obtient un modèle T-S linéaire. Le modèle T-S représente un système dynamique, avec des règles floues Si-Alors (If-Then) qui représente des relations localement linéaire entre l'entrée et la sortie du système dynamique non-linéaire. L'aspect principal du modèle T-S flou est de représenter chaque règle floue locale dynamique par un sous-modèle linéaire, après le système flou global est obtenu par le calcul de la somme floue des sous-modèles linéaires. [9].

I.5. Les Avantages et les Inconvénients de la commande par logique flou type-1 :

Le réglage par logique floue réunit un certain nombre d'avantages et d'inconvénients essentiels.

a)-Les Avantages:

- ✦ Le non nécessité d'une modélisation mathématique du système à régler.
- ✦ La possibilité d'implémenter des connaissances (linguistique) de l'opérateur de processus.
- ✦ La maîtrise du système à régler avec un comportement complexe (fortement non linéaire et difficile à modéliser).
- ✦ L'emploi possible aussi pour les processus rapides (grâce à des processeurs dédiés).
- ✦ La disponibilité de systèmes de développement efficaces soit pour microprocesseurs ou PC (solution logicielle), soit pour circuit intégrés (processeur dédiés, solution matérielle). [10]

b)-les Inconvénients:

- ✦ Le manque de directive précise pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification).
- ✦ L'approche artisanale et non systématique (implémentation des connaissances de l'opérateur souvent difficile).
- ✦ L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toute généralité (en l'absence d'un modèle valable).
- ✦ La possibilité d'apparition de cycles limites à cause du fonctionnement non linéaire.
- ✦ La précision de réglage souvent peu élevée

- ☒ La cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible).

I.6. Généralités sur la logique floue type-2 :

Comme il est connu dans la littérature, les systèmes flous sont constitués par des règles, la connaissance utilisée pour construire ces règles est d'une nature incertaine, cette incertitude mène alors à obtenir des règles dont les prémisses ou les conséquences soient incertaines, ce qui donne des fonctions d'appartenance incertaines ; généralement ces informations qui sont entachées d'incertitudes peuvent parvenir de trois principales sources :

- ☒ Le sens des mots utilisés dans la construction des règles peut être incertain (un mot veut dire différentes choses pour différentes personnes).
- ☒ Les mesures qui activent les systèmes flous type-1 peuvent être bruitées, ce qui introduit une incertitude.
- ☒ Les données utilisées pour ajuster les paramètres des systèmes flous type-1 peuvent être aussi bruitées.

Toutes ces incertitudes apparaissent au niveau des fonctions d'appartenance ce qui rend les systèmes flous type-1 dont les fonctions d'appartenance sont des ensembles flous type-1, sont incapables de prendre en compte de telles incertitudes de règles.

Nous introduisons dans ce qui suit une nouvelle classe de systèmes flous appelée système flou type-2 dans laquelle les valeurs d'appartenance des prémisses ou des conséquences sont elles-mêmes des ensembles flous type-1.

I.6.1. Représentation d'un ensemble flou type-2

Une fonction d'appartenance de type-2 peut être vue comme une fonction à deux variables. Pour chaque A de l'univers du discours et degré d'appartenance primaire μ_1 , nous aurons une appartenance secondaire μ_2 qui est un nombre ordinaire dans l'intervalle $[0,1]$. Ainsi, une fonction d'appartenance peut être définie par :

$$\text{☒ } \mu_2(A, \mu_1): A \in [0,1] \rightarrow [0,1] \quad \text{I.14}$$

On considère un ensemble flou type-1 caractérisé par une fonction d'appartenance gaussienne de moyenne M et d'écart type. σ_x Le degré d'appartenance pour chaque élément x est donné par :

$$\text{☒ } m(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-M}{\sigma_x}\right)^2\right) \quad \text{I.15}$$

Dans le concept des ensembles flous type-1, le degré d'appartenance d'un élément est un nombre ordinaire qui appartient à l'intervalle $[0,1]$. On suppose que cette appartenance n'est pas un nombre mais un ensemble flou type-1. On note les éléments du domaine de cet ensemble μ_1 et on l'appelle appartenance primaire de x . On note l'appartenance de ces appartenances primaires $\mu_2(x, \mu_1)$ et on l'appelle appartenance secondaire de x .

↪ Si les appartenances secondaires sont des gaussiennes de moyenne $m(x)$ et de variance σ_m alors :

$$\mu_2(x, \mu_1) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\mu - m(x)}{\sigma_m}\right)^2\right) \quad \text{I.16}$$

$$\text{Avec } \mu_1 \in [0,1] \text{ et } m(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-M}{\sigma_x}\right)^2\right)$$

$$\text{D'où : } \mu_2(x, \mu_1) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\mu_1 - \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-M}{\sigma_x}\right)^2\right)}{\sigma_m}\right)^2\right) \quad \text{I.17}$$

Le degré d'appartenance de chaque élément pour le cas d'un ensemble flou type-2 représente toutes les appartenances primaires ainsi que les appartenances secondaires correspondantes et peut être écrit sous la forme :

$$\mu(x) = \int_{\mu_1 \in [0,1]} \mu_2(x, \mu_1) / \mu_1, x \in A \quad \text{I.18}$$

La Figure (I.7) est une représentation en trois dimensions d'un ensemble flou type-2 gaussien, dont la fonction d'appartenance principale est gaussienne.

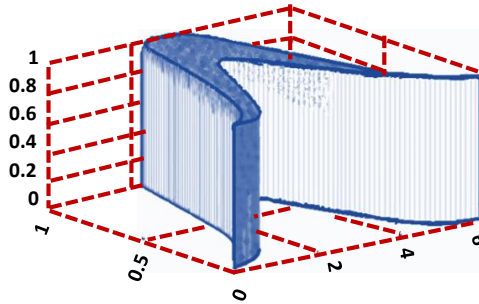


Figure I.7. Représentation tridimensionnelle d'un ensemble flou type-2 gaussien.

I.6.2. Types d'ensembles flous type-2 :

Selon la forme de l'appartenance primaire, on distingue principalement trois sortes d'ensembles flous type-2 : **intervalle**, **Gaussienne**, et **triangulaire**.

🌿 **Ensemble flou type-2 gaussien :** Le degré d'appartenance de chaque point est un ensemble flou type-1 gaussien dont le domaine de définition est inclus dans l'intervalle $[0,1]$. Notons qu'il n'est pas nécessaire que la fonction d'appartenance principale soit aussi Gaussienne.

✿ **Ensemble flou type-2 triangulaire** : Le degré d'appartenance de chaque point est un ensemble flou type-1 triangulaire dont le domaine de définition est inclus dans l'intervalle $[0,1]$.

✿ **Ensemble flou type-2 intervalle** : Le degré d'appartenance de chaque point est un ensemble ordinaire dont le domaine de définition est inclus dans l'intervalle $[0,1]$.

Dans ce cas, les appartenances secondaires sont égales à 1. Notons que malgré chaque degré d'un ensemble type-2 intervalle est un ensemble ordinaire, l'ensemble lui-même est de type-2, parce que les degrés d'appartenance sont des ensembles et non pas des nombres ordinaires.

La Figure (I.8) schématise une fonction d'appartenance floue type-2 avec une zone d'incertitude.

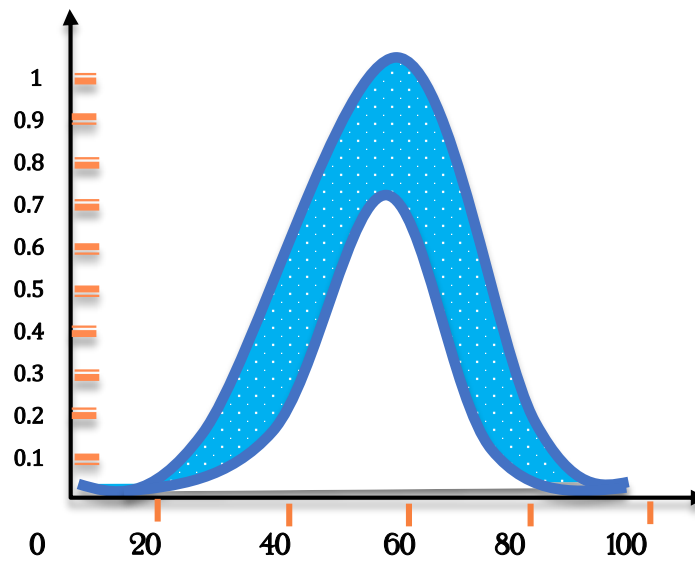


Figure I.8. Fonction d'appartenance d'un ensemble flou type-2

I.6.3. Opération sur les ensembles floue type-2 :

Considérons $\tilde{A} \in A$ et $\tilde{B} \in A$ deux ensembles flous type-2 et $\mu_{\tilde{A}}$ et $\mu_{\tilde{B}}$ leurs appartenances floues respectives (ensembles flous type-1 dans $J \subseteq [0,1]$) de ces deux ensembles, représenté pour chaque x par :

$$\otimes \mu_{\tilde{A}}(x) = \int_w f_x(u)/u ; u \in J \quad \text{I.19}$$

$$\otimes \mu_{\tilde{B}}(x) = \int_w g_x(w)/w ; w \in J \quad \text{I.20}$$

✿ Où : $u \in J$ et $w \in J$ indique les degrés d'appartenance primaire de x .

$f_x(u) \in [0,1]$ et $g_x(x) \in [0,1]$ indique les degrés d'appartenance secondaire de x .

Pour définir les opérations fondamentales : union, intersection et complément des ensembles flous \tilde{A} et \tilde{B} , on utilise le principe d'extension de Zadeh [11].

☒ Enoncé du principe d'extension monodimensionnel :

Le principe d'extension des ensembles flous est essentiellement une identité de base qui permet à un domaine de définition d'une relation à être étendu de quelques points de U à des sous-ensembles flous de U . Particulièrement, supposons que f est une relation de U vers V et A est un ensemble flou défini par :

$$☒ A = \sum_i \frac{\mu_A(U)}{U_i} \text{ cas discret} \quad \text{I.21}$$

$$☒ A = \int_u \mu_A(U)/U \text{ cas continu} \quad \text{I.22}$$

Alors le principe d'extension affirme que l'image de A sous la relation f est un ensemble flou $f(A)$ de W défini par :

$$☒ f(A) = [\int_U \mu_A(U)/U] = \int_w \mu_A(U)/f(U) \quad \text{cas continu.} \quad \text{I.23}$$

$$☒ f(A) = f[\sum_i \mu_A(U_i)/U_i] = \sum_i \mu_A(U_i)/f(U_i) \quad \text{cas discret.} \quad \text{I.24}$$

Par conséquent, l'image de A sous f peut être déduite en connaissant les images de U ou U_i sous f . Par application du principe d'extension aux ensembles flous \tilde{A} et \tilde{B} , on aura :

Tableaux I.5 : Les opérateurs de base sur les sous ensemble floue type-2

Opérateur	Forme Algébrique
☒ Union de \tilde{A} et \tilde{B}	$\begin{aligned} \mu_{\tilde{A} \cup \tilde{B}}(x) &= \mu_{\tilde{A}}(x) \cup \mu_{\tilde{B}}(x) = (\sum_i f_x(U_i)/U_i) \cup \\ &(\sum_j g_x(w_j)/w_j) \\ &= \sum_{i,j} (f_x(U_i) * g_x(w_j))/U_i \vee w_j \end{aligned}$
☒ Intersection de \tilde{A} et \tilde{B}	$\begin{aligned} \mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}}(x) &= \mu_{\tilde{A}}(x) \cap \mu_{\tilde{B}}(x) = (\sum_i f_x(U_i)/U_i) \cap (\sum_j g_x(w_j)/w_j) \\ &= \sum_{i,j} (f_x(U_i) * g_x(w_j))/U_i * w_j \end{aligned}$
☒ Complément de \tilde{A}	$\mu_{\tilde{A}^c}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x) = \sum_i f_x(U_i)/(1 - U_i)$

☒ Où \vee représente le maximum t-conorme et $*$ représente la t-norme.

I.6.4. Structure d'un système flou type-2 :

Un contrôleur flou type-1 est composé d'une interface de fuzzification, une base de règles, un système d'inférence et une interface de défuzzification. La structure du contrôleur flou type-2 est similaire à celui de type-1 avec la particularité de l'utilisation d'un réducteur de type pour convertir les ensembles flous type-2 à la sortie du système d'inférence en ensembles flous type-1 avant la phase de défuzzification. Ses différentes opérations sont illustrées sur la figure suivante [12] :

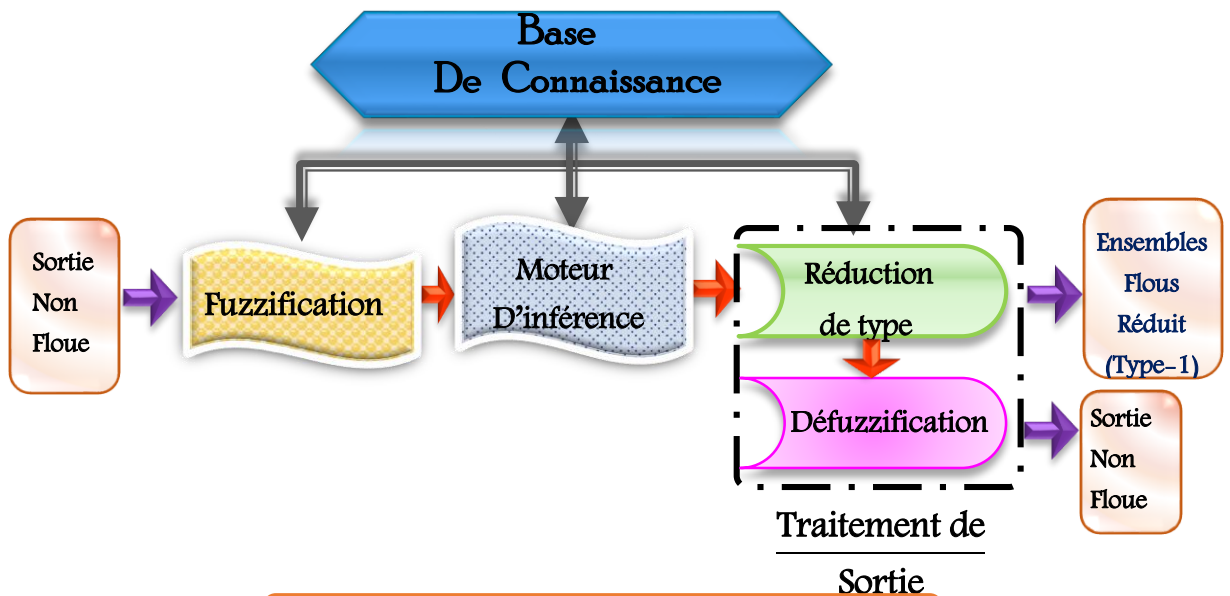


Figure I.9. Structure d'un système flou type-2

I.6.4.1. Fuzzification :

Contrairement à la fonction d'appartenance type-1, La fonction d'appartenance type-2 donne plusieurs degrés d'appartenance (ou dimensions) pour chaque entrée. Par conséquent, l'incertitude sera mieux représentée. Cette représentation va nous permettre de tenir compte de ce qui a été négligé par le type-1.

Dans ce mémoire, seule la fuzzification de type gaussien sera utilisée [13], en d'autres termes, l'entrée floue est un point singulier possédant une valeur d'appartenance unitaire.

I.6.4.2. Base de règle :

La différence entre le type-1 et le type-2 réside seulement dans la nature des fonctions d'appartenance, donc, la structure des règles dans le cas du type-2 va rester exactement la même.

La seule différence étant que quelques (ou toutes) les fonctions d'appartenance seront de type-2 ; alors, la $j^{\text{ème}}$ règle d'un système flou type-2 aura la forme :

$$\clubsuit \text{ Si } X_1 \text{ est } \tilde{F}_1^j \text{ et } X_2 \text{ est } \tilde{F}_2^j \text{ et } \dots \text{ et } X_n \text{ est } \tilde{F}_n^j \text{ Alors } y = \tilde{G}^j \quad \text{I.25}$$

Où X_i ($i = 1, \dots, n$) sont les entrées du système flou, \tilde{F}_i^j est l'ensemble flou de type-2 correspondant à l'entrée X_i , \tilde{G}^j est un singleton de type-2 et y est la sortie. Il n'est pas nécessaire que toutes les fonctions d'appartenance des prémisses et des conséquences soient de type-2. Il suffit qu'une seule fonction d'appartenance dans une prémisse

ou dans une conséquence soit de type-2 pour que tout le système soit de type-2 [14].

I.6.4.3. Mécanisme d'inférence :

Dans le cadre de ce mémoire et pour des raisons de simplifications de calcul, seuls les ensembles flous type-2 intervalle sont employés.

Le système d'inférence dans un système flou type-2 utilise la base de règles floues (I.25) pour effectuer une relation entre un vecteur d'entrée $X = (x_1, \dots, x_n)^T$ et la sortie scalaire u .

La première étape dans l'opération d'inférence floue est le calcul de l'intervalle d'activation associé au $j^{\text{ème}}$ ensemble flou de sortie :

$$\clubsuit F(x) = \prod_{i=1}^n \mu_{\tilde{F}_i^j}(x_i) \quad \text{I.26}$$

$\mu_{\tilde{F}_i^j}(x_i)$: est l'intervalle d'activation associé à la variable X_i .

Si l'on note l'ensemble flou de sortie correspondant à la $j^{\text{ème}}$ règle R^j par \tilde{B}^j . Lorsqu'une entrée x' est appliquée, comme nous utilisons une fuzzification de type singleton, qui veut dire que l'ensemble \tilde{X}' auquel appartient x' possède un degré d'appartenance unitaire à $x=x'$ et zéro ailleurs, par conséquent l'ensemble de sortie correspondant à la $j^{\text{ème}}$ règle est calculé à l'aide de l'opérateur t-norme choisie \cap comme suit :

$$\clubsuit \mu_{\tilde{B}^j}(y) = \mu_{\tilde{G}^j}(y) \cap \left[\prod_{i=1}^n \mu_{\tilde{F}_i^j}(x_i) \right] \quad \text{I.27}$$

Comme seulement les ensembles flous type-2 intervalle sont utilisés et l'opération t-norme produit est mise en œuvre, alors l'intervalle d'activation associé au $j^{\text{ème}}$ ensemble flou de sortie est l'ensemble flou type-1 intervalle défini par :

$$\clubsuit F^j(x) = \left[\underline{f}^j(x), \bar{f}^j(x) \right] \quad \text{I.28}$$

$$\text{Où } \underline{f}^j(x) = \underline{\mu}_{\tilde{F}_1^j}(x_1) * \underline{\mu}_{\tilde{F}_2^j}(x_2) * \dots * \underline{\mu}_{\tilde{F}_n^j}(x_n) \text{ et } \bar{f}^j(x) = \bar{\mu}_{\tilde{F}_1^j}(x_1) * \bar{\mu}_{\tilde{F}_2^j}(x_2) * \dots * \bar{\mu}_{\tilde{F}_n^j}(x_n)$$

Les termes $\underline{\mu}_{\tilde{F}_i^j}(x_i)$ et $\bar{\mu}_{\tilde{F}_i^j}(x_i)$ sont respectivement des degrés d'appartenance inférieur et supérieur relatifs à $\mu_{\tilde{F}_i^j}(x_i)$

I.6.4.4. Réduction de type :

Etant donné que la sortie du système d'inférence est un ensemble flou type-2, elle doit être réduite avant qu'elle soit défuzzifiée. Pour transformer la sortie floue type-2 en un ensemble flou type-1, la méthode des centres d'ensembles (center of sets en anglais (cos)) est utilisée. L'expression de l'ensemble flou de type réduit par cette méthode est donnée par [15]:

$$\text{Où } Y_{cos}(Y^1, \dots, Y^K, F^1, \dots, F^K) = \int_{Y^1} \dots \int_{Y^K} \int_{F^1} \dots \int_{F^K} 1 / \frac{\sum_{j=1}^K y^j f^j}{\sum_{j=1}^K f^j} \quad \text{I.29}$$

Étant donné que chaque ensemble dans l'équation (I.29) est un ensemble type-1 intervalle alors Y_{\cos} est aussi un ensemble type-1 intervalle dont le domaine est situé sur l'axe des réels

$$\otimes Y_{\cos}(Y^1, \dots, Y^K, F^1, \dots, F^K) = [y_l, y_r] \quad \text{I.30}$$

y_l et y_r sont deux points de gauche et de droite caractérisant l'ensemble réduit Y_{\cos} . $f^1(x)$ est l' $i^{\text{ème}}$ élément de l'intervalle d'activation de (I.29) et y_j est un élément de l'intervalle type-2 $Y^j = [Y_l^j, Y_r^j]$

Afin de calculer les points extrêmes y_l et y_r Karnik et Mendel [16] ont développé un algorithme itératif dont la procédure est donnée comme suit :

✦ Le calcul de y_l :

1. Discrétiser l'espace de sort Y en un nombre n suffisant de points en choisissant comme segment les centroïdes des ensembles flous impliqués dans l'activation des règles.
2. Trier y^j dans un ordre croissant : $y^1 \leq y^2 \leq \dots \leq y^k$
3. Initialiser f^j en prenant comme point de départ : $f^j = \frac{f^j + \bar{f}^j}{2}$, $j = 1, \dots, k$

ensuite calculer : $y_l = \frac{\sum_{j=1}^k y^j f^j}{\sum_{j=1}^k f^j}$

et poser $y_l' = y_l$

4. Trouver un point de commutation N ($1 \leq N \leq k-1$) qui satisfait : $y^k \leq y_l \leq y^{k+1}$
5. Pose :

$$f^j = \begin{cases} \bar{f}^j, & j < N \\ f^j, & j > N \end{cases}$$

Calculer : $y_l = \frac{\sum_{j=1}^k y^j f^j}{\sum_{j=1}^k f^j}$

et poser : $y_l'' = y_l$

6. Si $y_l'' \neq y_l'$ aller à l'étape 6. Si $y_l'' = y_l'$, arrêter et poser $y_l = y_l''$
7. Poser $y_l = y_l''$ et aller à l'étape 3.

✦ Le calcul de y_r :

1. Discrétiser l'espace de sort Y en un nombre n suffisant de points en choisissant comme segment les centroïdes des ensembles flous impliqués dans l'activation des règles.
2. Trier y^j dans un ordre croissant : $y^1 \leq y^2 \leq \dots \leq y^k$
3. Initialiser f^j en prenant comme point de départ : $f^j = \frac{f^j + \bar{f}^j}{2}$, $j = 1, \dots, k$

ensuite calculer : $y_r = \frac{\sum_{j=1}^k y^j f^j}{\sum_{j=1}^k f^j}$

et poser $y_r' = y_r$

4. Trouver un point de commutation N ($1 \leq N \leq k-1$) qui satisfait : $y^k \leq y_1 \leq y^{k+1}$

5. Pose : $f^j = \begin{cases} \bar{f}^j, & j < N \\ \underline{f}^j, & j > N \end{cases}$

calculer : $y_r = \frac{\sum_{j=1}^k y^j f^j}{\sum_{j=1}^k f^j}$

et poser : $y_r'' = y_r$

6. Si $y_r'' = y_r$ aller à l'étape 6. Si $y_r'' \neq y_r$, arrêter et poser $y_r'' = y_r$

7. Poser $y_r'' = y_r$ et aller à l'étape 3.

I.6.4.5. Défuzzification :

Le type réduit (I.30) sera déterminé par ses deux points extrêmes de droite et de gauche respectivement y_1 et y_r . En appliquant le centre de gravité au type réduit, la sortie numérique sera donnée par :

$$\text{⊗ } Y = \frac{y_1 + y_r}{2} \quad \text{I.31}$$

Contrairement aux systèmes flous type-1 où la sortie est caractérisée par un seul vecteur de fonctions de bases flous (FBF), un système flou type-2 est caractérisé par deux vecteurs de FBF. Dans ce cas y_1 peut être écrit comme suit :

$$\text{⊗ } y_1 = \frac{\sum_{j=1}^k y_1^j f_1^j}{\sum_{j=1}^k f_1^j} = \sum_{j=1}^k y_1^i \xi_1^j = \underline{y}_1^T \underline{\xi}_1(x) \quad \text{I.32}$$

Où f_1^j désigne le degré d'activation (soit \underline{f}_1^j ou \bar{f}_1^j) contribuant au point extrême de gauche y_1

$$\xi_1^j = \frac{f_1^j}{\sum_{j=1}^k f_1^j} \text{ sont les composantes du premier vecteur de FBF, } \underline{\xi}_1^T(x) = [\xi_1^1, \dots, \xi_1^k]$$

et $\underline{y}_1^T = [y_1^1, \dots, y_1^k]$ est la conclusion du système flou type-2.

De même,

$$\text{⊗ } y_r = \frac{\sum_{j=1}^k f_r^j y_r^j}{\sum_{j=1}^k f_r^j} = \sum_{j=1}^k y_r^i \xi_r^j = \underline{y}_r^T \underline{\xi}_r(x) \quad \text{I.33}$$

où f_r^j désigne le degré d'activation (soit \underline{f}_r^j ou \bar{f}_r^j) contribuant au point extrême de

$$\xi_r^j = \frac{f_r^j}{\sum_{j=1}^k f_r^j} \text{ sont les composantes du premier vecteur de FBF, } \underline{\xi}_r^T(x) = [\xi_r^1, \dots, \xi_r^k] \text{ et}$$

$\underline{y}_r^T = [y_r^1, \dots, y_r^k]$ est la conclusion du système flou type-2.

Finalement, l'équation (1.26) après substitution de (1.27) et (1.28) peut être donnée par :

$$\text{⊗ } Y = \frac{\underline{y}_1^T \underline{\xi}_1 + \underline{y}_r^T \underline{\xi}_r}{2} \quad \text{I.34}$$

I.7.conclusion :

Dans ce chapitre, on a introduit la théorie des ensembles flous extrêmes fructueuse sur laquelle repose la logique floue ; après un passage bref, sur l'historique et les différents domaines d'application de la logique floue, nous revenons au principe et étapes de mise en œuvre des mécanismes d'inférence floue. Plusieurs notions de base de la théorie de la logique floue type-1 sont présentées, ainsi leur extension à la logique floue type-2 telle que, les propriétés des ensembles flous, les opérations sur ces ensembles, les relations floues et leur composition, la structure des systèmes flous type-1 et type-2 ainsi les deux types des contrôleurs flous et la différence entre les deux.

Le Chapitre suivant sera consacré à la représentation d'un autre type de commande classique qui appartient au type de commande à structure variable (Commande par Mode Glissant) dans le but de concevoir une commande hybride floue mode glissant pour bénéficier des avantages de chacun d'eux.

II.1. Introduction :

La commande par mode glissant (SMC) est une méthodologie de commande robuste pour les systèmes linéaires et non linéaires en raison de sa robustesse aux changements des paramètres, des perturbations externes et de la dynamique non modélisée, le principal inconvénient de cette approche est la fréquence de commutation élevée (chattering) , le phénomène de chattering n'est pas souhaitable car il peut exciter les modes non modélisés à haute fréquence dans le système de contrôle non linéaire.

Pour remédier ce phénomène une commande qui fournira prévision de la performance même si le modèle du système n'est pas très connu est nécessaire, cette commande doit également s'adapter aux variations des paramètres ou des perturbations externes, ces types de commandes sont généralement appelés « commande intelligente », travaillant essentiellement sur les principes de la logique floue, réseaux de neurones et algorithmes génétiques.

Dans ce chapitre nous appliquons donc une commande hybride par mode glissant flou (FSMC) pour réédier au phénomène de chattering

II.2. Systèmes à structure variables

Lorsque la structure du système ou du correcteur (régulateur) utilisé prend d'une façon discontinue deux ou plusieurs expressions, la notion de système à structures variables intervient, il en découle la définition suivante.[15]: « *La commande à structure variable (CSV) est par nature une commande non linéaire. La caractéristique principale des systèmes à structure variable est que leur loi de commande se base sur la commutation de fonctions de variables d'état, utilisées pour créer une variété de glissement (ou hyper surface), dont le but est de forcer la dynamique du système à correspondre avec celle définie par l'équation de l'hyper surface. Quand l'état est maintenu sur cette hyper surface, le système se trouve en régime glissant. Sa dynamique est alors insensible aux perturbations extérieures et paramétriques tant que les conditions du régime glissant sont assurées* ».

II.2.1. Configuration de base pour les systèmes à structure variable :

Soit le système dynamique non-linéaire analytique suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot U(t) \\ y = C^T x(t), \quad y \in R^m \end{cases} \quad \text{II.1}$$

➤ Où $x \in X$, un ouvert de R^m et y est la fonction de commande (discontinue).

$v : R^m \rightarrow R, A. x(t)$ et $B. U(t)$; les champs des vecteurs définis dans un ouvert de R^m ,

➤ avec $B \neq 0, \forall x \in X$

👉 On peut distinguer trois configurations de base pour les systèmes à structure variable :

II.2.1.1. Structure par commutation d'une contre réaction d'état :

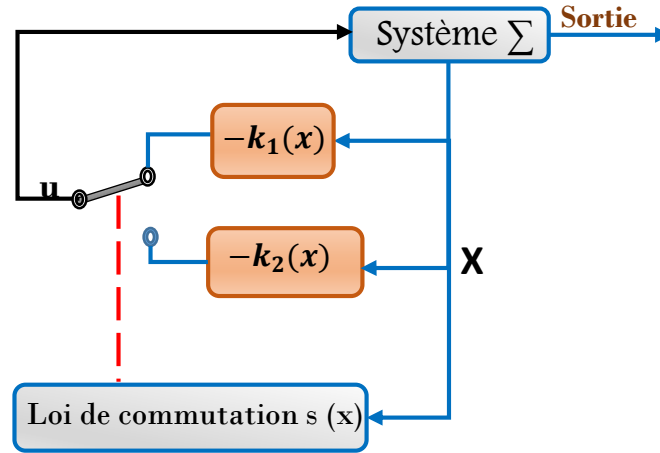


Figure II.1. : Configuration par changement de retour d'état

Suivant que $S(x)$ est positif ou négatif, la commande U est donnée par

$$\begin{cases} U = -k_1(x) & \text{si } S(x) > 0 \\ U = -k_2(x) & \text{si } S(x) < 0 \end{cases}$$

II.2

II.2.1.2. Structure niveau de l'organe de commande :

Doit être conçu de sorte que la grandeur de commande U ne prenne que deux valeurs constantes U_{max} et U_{min}

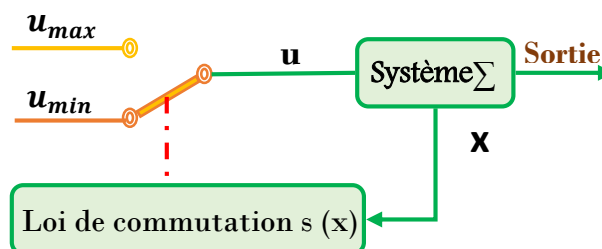


Figure II.2. : Configuration avec loi de commutation au niveau de l'organe de commande

Cette configuration nécessite un organe de commande qui possède une action à deux positions avec une commutation rapide d'une position à l'autre. La commutation entre ces deux valeurs est imposée par la loi de commutation selon :

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

II.3

II.2.1.3. Commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande équivalente :

Le schéma d'une telle structure est représentée à la figure II.3 Cette structure de commande est simple à réaliser et a été utilisée dans beaucoup d'applications [16], [17]. L'ajout de la commande équivalente permet de pré-positionner le système dans un état désiré stable et en plus de réduire le phénomène de chattering.

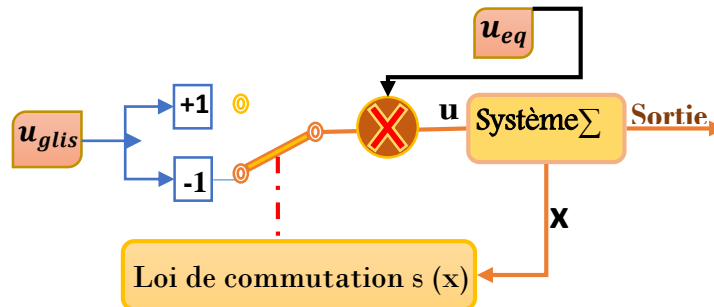


Figure II.3. : Changement de structure avec ajout de la commande équivalente.

II.3. Théorie de la commande par modes glissants

L'idée de base de la commande par mode glissant est premièrement d'attirer les états du système dans une région convenablement sélectionnée, puis de concevoir une loi de commande qui maintiendra toujours le système dans cette région.

II.3.1. Principe et Conception de la commande par mode de glissement.

La technique de la commande par mode glissant (MG) consiste à ramener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée jusqu'au point d'équilibre.

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

➤ **Le mode de convergence (MC) :**

le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase, et tend vers la surface de commutation $S(x,y)=0$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et de critère de convergence. [18]

➤ **Le mode de glissement (MG) :**

C'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $S(x, y) = 0$. [18]

➤ Le mode de régime permanent (MRP) :

Ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine de plan de phase), il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande .[18]

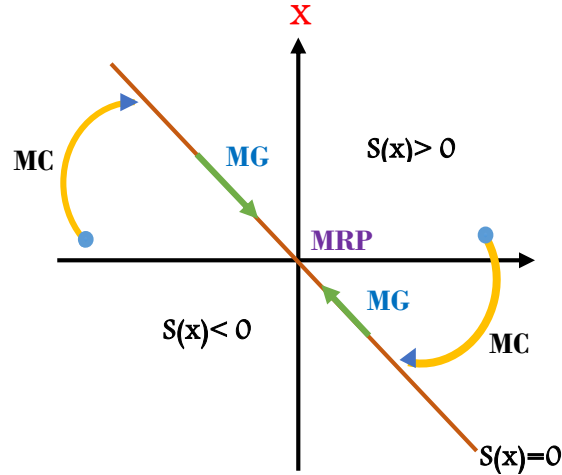


Figure II.4. : Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase

II.3.2. Synthèse de commande par modes glissants

La synthèse de la commande par modes glissants se fait en trois étapes :

- ✚ Choix de la surface de glissement
- ✚ Etablir la condition de convergence
- ✚ Déterminer la loi de commande qui permet d'atteindre la surface et d'y demeurer.

II.3.2.1. Choix de la surface de glissement

Il est déterminé sur la base du système et des performances désirées. Dans le cas plus générale, considérons le système décrit par la représentation d'état non linéaire suivant :

$$\begin{cases} \dot{x} = A. x(t) + B. U(t) \\ y = c. x(t) \end{cases} \quad \text{II.4}$$

La forme d'équation générale pour la surface de glissement, proposée par "J.Jslotinie"[19] et assurant la convergence d'une variable vers sa valeur désirée, est donnée par :

$$s(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right)^{r-1} e(x) \quad \text{II.5}$$

Et l'erreur de poursuite définie par état référentiel de système

$$e(x) = x - x_d \quad \text{II.6}$$

- x : état référentiel de système et x_d : état désirée

- $e(x)$: écart de la variable à régler (l'erreur)
- λ : Constante positive qui interprète la bande passante du contrôle désiré.
- r : degré relatif, égale au nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître la commande

↳ Donc on aura pour les différentes valeurs de r :

- **pour $r = 1$** , $S(x) = e(x)$.
- **Pour $r = 2$** , $S(x) = \dot{e}(x) + \lambda e(x)$

$S(x) = 0$: est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x) = 0$. En d'autres termes, la difficulté revient à un problème de poursuite de trajectoire dont l'objectif est de garder $S(x)$ à zéro. Ceci est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart en respectant la condition de convergence. La linéarisation exacte de l'écart a pour but de forcer la dynamique de l'écart (référence – sortie) à être une dynamique d'un système linéaire autonome d'ordre « r ».

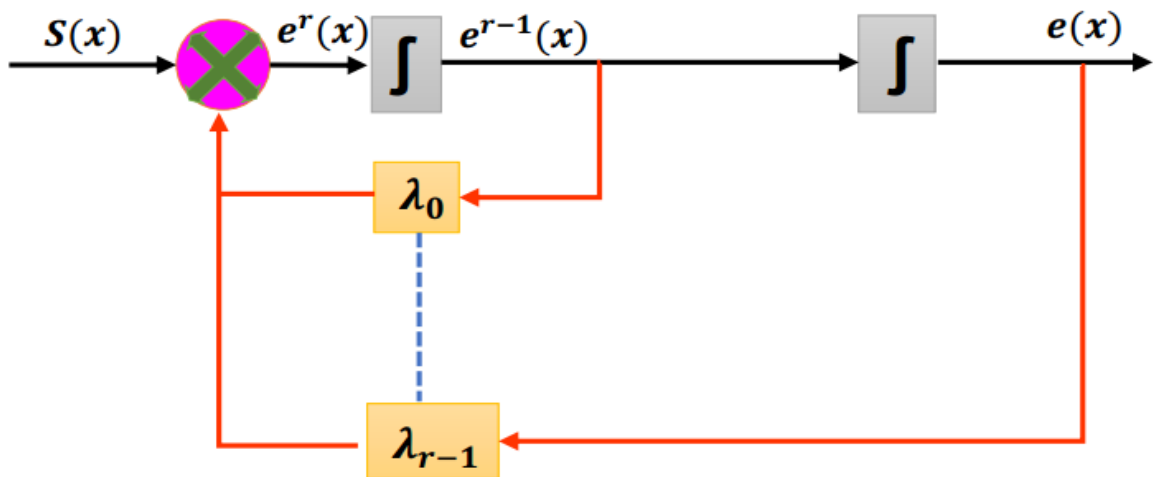


Figure II.5 : Linéarisation exacte de l'écart.

II.3.2.2 condition d'existence du mode de glissement.

Les conditions de convergence permettent à la dynamique du système, dans le plan de phase, de converger vers la surface de glissement, nous citons deux conditions :

a) -La condition directe de commutation :

C'est la première condition de convergence, elle est sous la forme :

$$\dot{s}(x) \cdot s(x) < 0$$

II.7

Dans cette condition, il faut introduire pour $S(x)$ et sa dérivée $\dot{S}(x)$, les valeurs justes à gauches et à droites de commutation. Elle est équivalente à exiger à $S(x)$ de changer de signe lorsqu'on passe d'un côté à l'autre de la droite. Ceci s'exprime par :

$$\text{Signe } \dot{S}(x, V_{max}) = -\text{Signe } \dot{S}(x, V_{min}) \quad \text{II.8}$$

b) -La fonction de Lyapunov :

Il s'agit de formuler une fonction scalaire positive $V(x) > 0$ pour les variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction $\dot{v}(x) < 0$

En définissant la fonction de Lyapunov :

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

Sa dérivée sera :

$$\dot{v}(x) = \dot{s}(x) \cdot s(x) \quad \text{II.10}$$

☒ pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer que :

$$\dot{v}(x) = \dot{s}(x) \cdot s(x) < 0 \quad \text{II.11}$$

Si la condition (II.11) est vérifiée, alors la surface de glissement et sa dérivée sont de signe contraire quel que soit le temps et que est un centre attracteur pour \mathbf{S} . Le temps de convergence, ou le temps d'atteinte « reaching time » t_r dépend directement du choix de \mathbf{S}

Pour une convergence en temps fini, la condition (II.11) qui ne garantit qu'une convergence asymptotique vers la surface de glissement est remplacée par une condition plus restrictive dite de η -attractivité et donnée par :

$$\dot{s} \cdot s \leq -\eta |s|, \quad \eta > 0 \quad \text{II.12}$$

II.3.2.3. Loi de commande

Dans notre cas, la méthode choisie est celle de la commande équivalente, schématisée sur la figure (II.6).

La commande équivalente est une fonction continue qui sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement $\{s = 0\}$ Elle est obtenue grâce aux conditions d'invariance de la surface :

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

- Où U_{eq} est déduite de la relation $\dot{s} = 0$

Physiquement la commande équivalente présente la valeur moyenne de la commande U . Cependant, cette commande ne force pas les trajectoires du système à converger vers la surface de glissement. Ainsi, la commande U est la somme de la commande équivalente et d'une composante discontinue assurant une convergence et un régime glissant.

$$U = U_{eq} + U_d$$

II.13

U_d : est la commande discontinue.

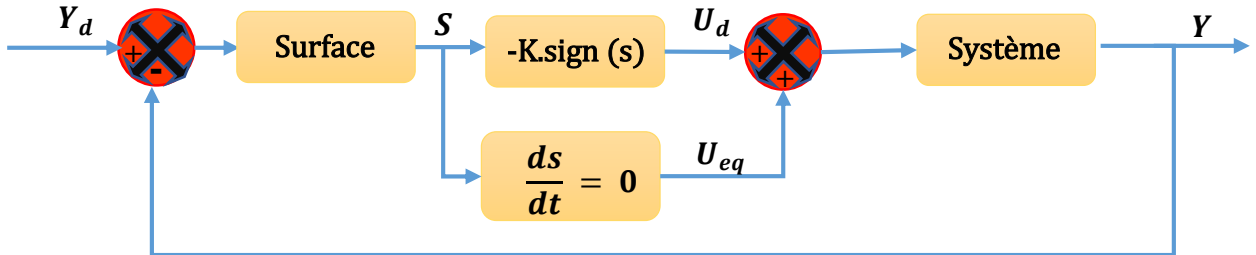


Figure II.6 : Principe de la commande en mode glissant avec commande équivalente

❖ a)-Commande équivalente :

Un vecteur x de la commande équivalente U_{eq} se définit comme étant que des équations en régime glissant idéale. On suppose que les relais n'ont ni hystérésis, ni retard de commutation et que le modèle mathématique de l'application n'a pas négligé aucune constante de temps, ce régime n'ayant lieu que sur :

$$s_i = 0 \quad i = 1,2,3, \dots, m$$

On exprime la condition pour l'obtention de la commande équivalente comme :

$$\frac{ds_i}{dt} = s_i = 0$$

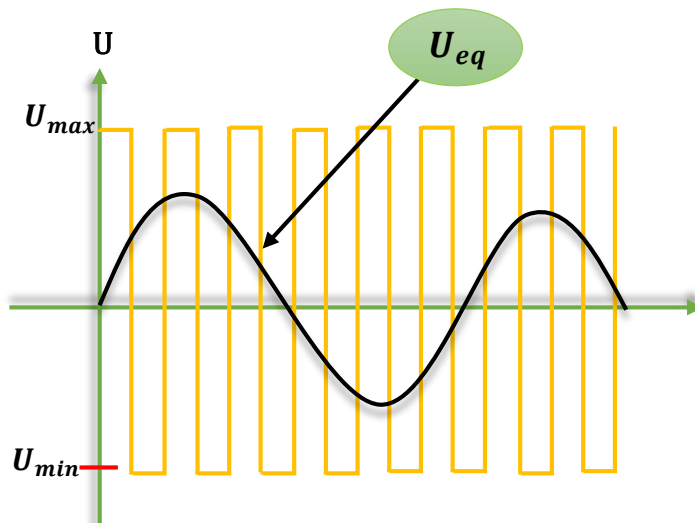


Figure II.7 : Interprétation d'Ueq

Donc :

A partir de $\dot{s}(x) = 0$

$$\dot{s}(x) = \left[\frac{\partial s}{\partial x} \right]^T [A.X + B.U_{eq}] = 0 \quad \text{II.14}$$

$$\left[\frac{\partial s}{\partial x} \right]^T [A.X] + \left[\frac{\partial s}{\partial x} \right]^T [B.U_{eq}] = 0 \quad \text{II.15}$$

$$U_{eq} = - \left[\frac{\partial s}{\partial x} \right]^T [A.X] \cdot \left[\left[\frac{\partial s}{\partial x} \right]^T \cdot B \right]^{-1} \quad \text{II.16}$$

Avec la condition de transversalité :

$$\det \left[\left[\frac{\partial s}{\partial x} \right]^T \cdot B \right] \neq 0 \quad \text{II.17}$$

❖ **b) -Commande discontinue :**

Le régime idéal n'est pratiquement jamais réalisable, on doit ainsi faire usage du deuxième terme de la commande pour ramener l'état du système vers la surface à chaque fois qu'il s'en écarte. Il convient donc de prendre :

$$U_d = -K \cdot \text{sign}(S(x)) \quad \text{II.18}$$

Où $S(x, t)$ est la fonction définie par :

$$\text{sign } S(x, t) = \begin{cases} -1 & \text{si } S(x, t) < 0 \\ +1 & \text{si } S(x, t) > 0 \end{cases} \quad \text{II.19}$$

où $K = \text{diag}(K_1, K_2, \dots, K_m)$ et la fonction *sign* est représentée sur la figure II.8

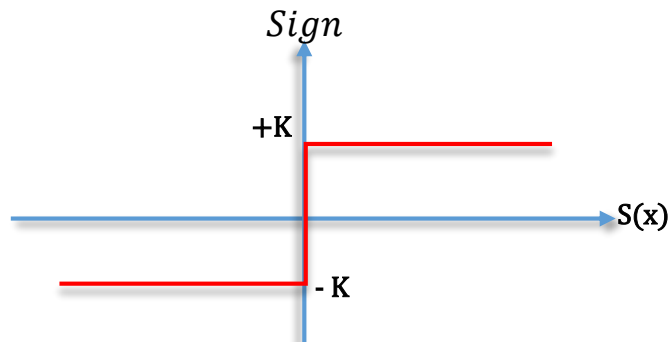


Figure II.8 : Représentation de la fonction Sign

L'utilisation de la fonction *Signe* signifie que la commande U_d commute entre deux valeurs $\pm k$ avec une fréquence théoriquement infinie. Si le gain k est très petit, le temps de réponse sera long, si k est très grand, le temps de réponse sera rapide mais des oscillations indésirables risquent d'apparaître (couramment appelées Chattering) sur les réponses en régime permanent.

II.4. Phénomène de broutement (chattering) :

En pratique, le terme discontinu à droite de l'équation peut exciter des dynamiques hautes fréquences non modélisées qui entraînent l'apparition de ce qu'on appelle "réticence" ou "

broutement'' ou **chattering**'' en anglais, et qui se caractérise par des fortes oscillations autour de la surface.

Du point de vue de la synthèse de commande, on procède généralement au choix de la surface de commutation $s(x) = 0$ en fixant le plus souvent la dynamique de glissement, puis on en déduit une commande discontinue qui rend cette surface attractive et assure ainsi l'apparition du mode de glissement.

Ce mode de **glissement idéal** est illustré par **la figure (II.9)**. Un mode de glissement idéal correspond à une commande qui commute à une fréquence infinie or il n'existe aucun organe de commande pouvant réaliser cette opération.

Malgré les différents avantages de la commande par modes de glissement, son utilisation a été entravée par un inconvénient majeur lié au phénomène de réticence **figure (II.9)**.

Ce phénomène est une conséquence naturelle du comportement **dynamique réel** de l'ensemble actionneur système à commander.

La réticence peut provoquer une détérioration anticipée de l'organe de commande ou exciter des dynamiques hautes fréquences non considérées dans la modélisation du système.

Ainsi, nous allons chercher par différentes méthodes à limiter ce phénomène. Une approche consiste à remplacer la fonction signe par une fonction plus lisse.[22]

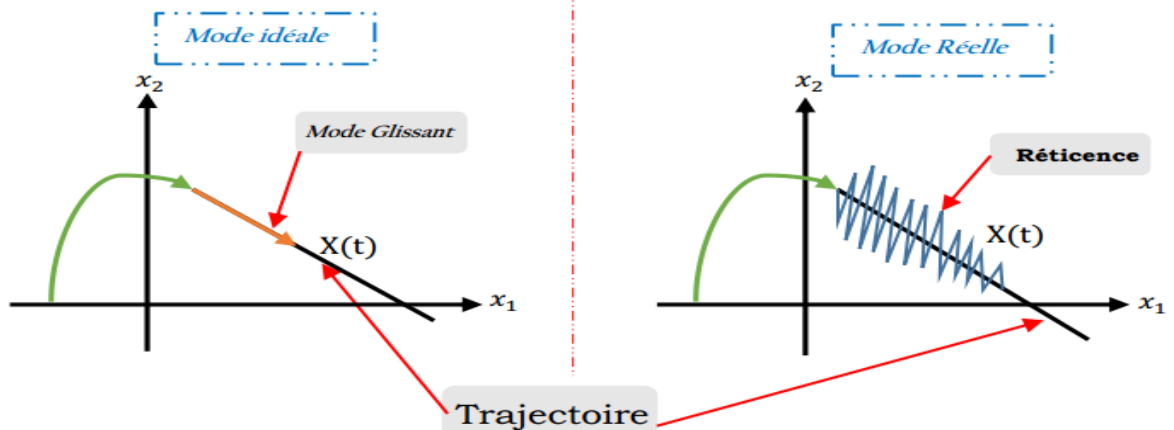


Figure II.9 : Phénomène de Chattering

II.5. Elimination du phénomène de broutement

Dans le but de réduire ou d'éliminer ce phénomène, de nombreuses solutions ont été proposées, comme la solution de couche limitée, mode glissant d'ordre supérieur, approach law...etc.

II.5.1. Loi d'approche 'approach law' :

Dans "l'approach law "atteinte, la dynamique de la fonction de glissement est directement

Exprimé. Laisser la dynamique de la fonction de commutation être spécifiée par l' équation différentiel

$$\dot{s} = -q f(s) - k \cdot \text{sign}(s) \quad \text{II.20}$$

$$q \text{ et } k > 0 \quad s \cdot f(s) > 0, \forall s \neq 0.$$

❖ La loi de contrôle peut être obtenue directement par la condition $\dot{s} = 0$ pour le système

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x(t) + B u(t) \\ y = C \cdot x(t) \end{cases} \quad \text{II.21}$$

$$u(t) = -(C \cdot B)^{-1}(C \cdot A \cdot x(t) + q \cdot f(s) + k \cdot \text{sign}(C \cdot x(t))) \quad \text{II.22}$$

👉 Il y a d'autre méthode pour élimination de chattering :

1) – Constant. proportionnel

$$\dot{s} = -q \cdot s - k \text{sign}(s) \quad \text{II.23}$$

2) – loi d'atteignant de taux de pouvoir

$$\dot{s} = -k \cdot |s|^\alpha \cdot \text{sign}(s), \quad 0 < \alpha < 1 \quad \text{II.24}$$

II.5.2. Solution de couche limite :

Cette solution, connue aussi sous le nom de “boundary layer solution”, consiste à remplacer la fonction signe par une approximation continue, de type grand gain, uniquement dans un voisinage de la surface, parmi les fonctions utilisées nous citerons la fonction de saturation.[20]

$$\bullet \quad \text{sat}(S) \begin{cases} 1 & \text{si } S > \mu \\ -1 & \text{si } S < -\mu \\ \frac{S}{\mu} & \text{si } |S| < \mu \end{cases} \quad \text{sat}(S) \begin{cases} 0 & \text{si } |S| < \mu_1 \\ \frac{S-\mu_1}{\mu_1-\mu_2} & \text{si } \mu_1 < S < \mu_2 \\ \text{sign}(S) & \text{si } |S| > \mu_2 \end{cases} \quad \text{II.25}$$

D'autres fonctions existent telles que les fonctions $\frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{s}{\mu}\right)$, $\tanh\left(\frac{s}{\mu}\right)$...etc.

🚦 Fonction smooth :

On peut aussi remplacer la fonction « signe » par une fonction «Smooth». On donne ci-dessous un exemple de ce type de fonction

$$\text{Smooth}(S) = \frac{S}{|S| + \mu} \quad \text{II.26}$$

μ : Un paramètre petit et positif

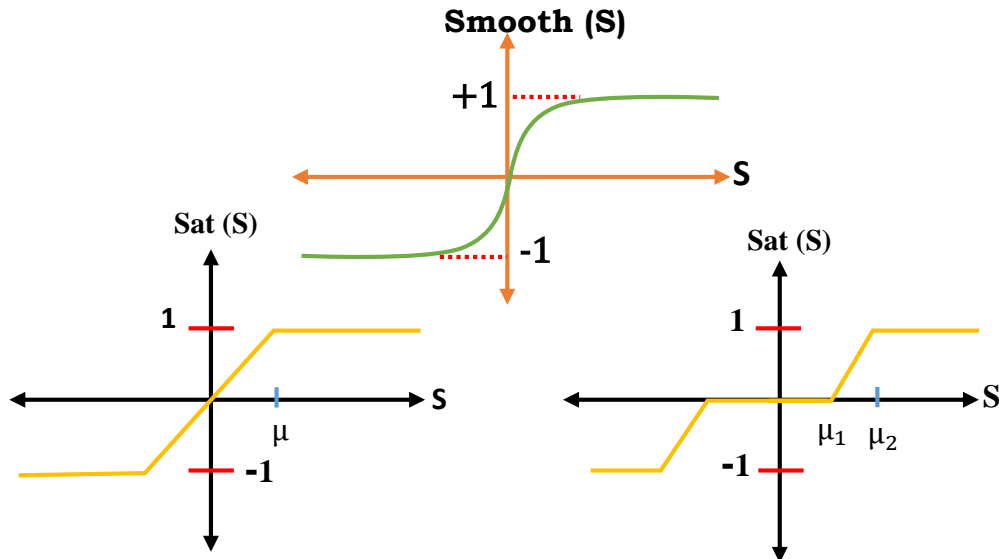


Figure II.10 : Les différentes solutions pour éliminer le chattering

II.6. Domaine d'application du réglage par mode glissant :

La technique du réglage par mode glissant a connu des développements importants dans tous les domaines de la commande. Dans le domaine des commandes hydrauliques ou pneumatiques, il existe des valves fonctionnant par tout ou rien qui ne possèdent que deux états stables, complètement ouvertes ou complètement fermées. Ces valves admettent des fréquences de commutation de quelques 10Hz.

Les entraînements électriques pour des machines-outils ou des robots, entraînements qui nécessitent, soit un réglage de la vitesse de rotation, soit un réglage de position ; dans ce cas le comportement dynamique à haute performance et la possibilité de limiter facilement certaines grandeurs (comme le courant et la vitesse de rotation) sont des avantages incontestables en faveur du réglage par mode glissant, il faut mentionner que dans certains domaines tels que : les processus chimiques et métallurgies, où il y'a des réglages qui font appel à des régulateurs à deux positions. [21]

II.7 Les avantages et les Inconvénients de la commande par mode glissant :

+ Avantages :

La réponse du système est insensible et robuste aux variations de certains paramètres et aux effets troubles de la charge, et perturbations ;

- ✿ Il suffit de connaître une borne pour u , ce qui simplifie le réglage ;
- ✿ Le choix de la surface de commutation est assez libre ;

- ❁ La commande est adoucie par la présence de la commande équivalente, celle-ci peut être supprimée au prix d'une augmentation de u .

✚ Inconvénients :

- ❁ Les retards purs en série avec le système en boucle ouverte (retards inhérents au système, échantillonnage...)
- ❁ Les dynamiques non modélisées des capteurs et des observateurs, qui retardent le moment où le régulateur prend conscience qu'il faut inverser la commande,
- ❁ Les dynamiques non modélisées des actionneurs et autres dynamiques rapides du système, qui retardent le moment où la commande est suffisamment forte pour rapprocher le système de la surface de glissement.

Remarque : et parmi les solution efficace pour éliminer le phénomène de chattering utilisation de la commande hybride glissant-flou que va être présenter suivant.

II.8. La Command hybride glissante-floue. (FSMC)

L'approche proposée la commande par mode de glissante-floue est basée essentiellement sur deux parties :

- ❁ La commande discontinue : ou les variables d'état du système sont utilisés pour créer une « surface de glissement », et qui sert aussi a gardé la trajectoire sur cette surface, de tel sorte que la dynamique désirée du système soit obtenue.
- ❁ La commande floue (Fuzzy) : cette dernière assure la résolution du problème de Chattering et élimine l'erreur.

Dans ce qui suit, on utilise un régulateur mode glissant-flou pour obtenir une commande performante robuste. Une partie de commande discontinue (SMC) et une partie de commande floue (FLC) sont contenues dans la présente commande (FSMC) proposée par l'équation suivante : $U_{FSMC} = U_{fuzzy} + U_d$ II.27

Les deux parties sont combinées pour assurer la stabilité et la robustesse du système [23]

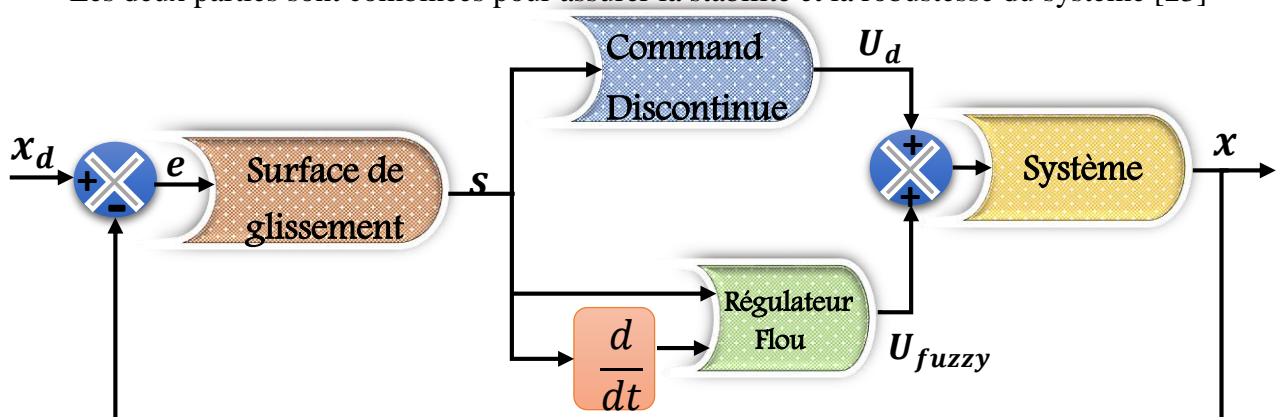



Figure II.11 : Schéma de la commande hybride

II.8.1. Application :

Pendule Inversé

Dans cette partie on applique notre commande SMC pour commander le pendule inversé, puis on va appliquer une commande hybride FSMC dans le but de suivre une trajectoire de référence sinusoïdale et la stabilisation du système en un point d'équilibre pour l'obtention des bons résultats ; la fig. (II.12) représente le système de pendule inversé ($x_1 = \theta, x_2 = \dot{\theta}$) avec une masse m et de longueur $2l$, placé sur un chariot, de masse M .

 Le système est décrit par les équations différentielles suivantes :

$$\begin{aligned} \bullet \quad \ddot{\theta} &= f(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta, \dot{\theta}) + d & \text{II.28} \\ \bullet \quad y &= \theta & \text{II.29} \end{aligned}$$

Avec

$$f(\theta, \dot{\theta}) = \frac{(m + \Delta m)l\dot{\theta}^2 \sin(\theta)\cos(\theta) - (m + \Delta m + M + \Delta M)g\sin(\theta)}{(m + \Delta m)l\cos^2(\theta) - (4/3)l.(m + \Delta m + M + \Delta M)} \quad \text{II.30}$$

$$g(\theta, \dot{\theta}) = \frac{-\cos(\theta)}{(m + \Delta m)l\cos^2(\theta) - (4/3)l.(m + \Delta m + M + \Delta M)} \quad \text{II.31}$$

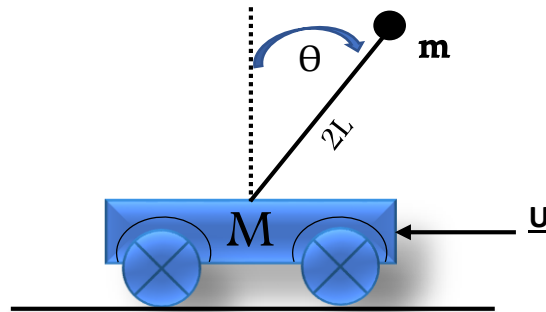


Figure II.12 : pendule inverse

θ : L'angle du pendule par rapport à la verticale.

g : la constante de gravitation

U : l'effort appliqué au chariot.

d : les perturbations externes

$\Delta(m ; M)$: les incertitudes des masses

$f(\theta, \dot{\theta}), g(\theta, \dot{\theta})$: Des fonctions non linéaires bornées. La forme canonique d'un système non linéaire de second ordre peut être écrite sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(X) + g(X) + d \\ y = x_1 \end{cases} \quad \text{II.32}$$

La sortie du système $y = \theta$

- ↪ Les paramètres utilisés dans cette simulation sont : $M=1 \text{ kg}$; $m=0.1 \text{ Kg}$; $l=0.5 \text{ m}$; $g=9.8 \text{ N/Kg}$
- ↪ Les perturbations et les incertitudes sont de la forme : $\Delta m = \pm 0.1 \text{ m}$; $\Delta M = \pm 0.1 \text{ M}$ et $d(t) = 0.1 \sin(2t)$
- ↪ État initial : $[\theta \ \dot{\theta}]^T = [0.2 \ 0]^T$
- ↪ La trajectoire désirée : $x_d = \frac{\pi}{30} \sin(t)$
- ↪ L'erreur de poursuite est donnée par : $e = \theta - \theta_d$

🔍 Calcul de la commande :

Le problème major de poursuite de trajectoire consiste à déterminer une loi de commande $U(x)$ qui permet d'assurer la convergence de l'état du système vers l'état désiré x_d

1) La commande par mode glissant :

- La surface de glissement est $s = \dot{e} + \lambda e$
- \dot{e} : La dérivée de l'erreur.

La commande par mode glissant d'ordre un assure la convergence asymptotique de l'erreur vers zéro en un temps fini est donnée par la relation suivante :

$$U = U_{eq} + U_d \quad \text{II.33}$$

U_{eq} : est déterminée à partir de la relation : $\dot{s} = 0$

$$U_{eq} = g(x)^{-1} \cdot (\ddot{x} - f(x) - d) \quad \text{II.34}$$

$$\dot{s} = \ddot{e} + \lambda \dot{e} = (\ddot{x} - \ddot{x}_d) + \lambda(\dot{x} - \dot{x}_d) = 0 \text{ donc } \ddot{x} = \ddot{x}_d - \lambda(\dot{x} - \dot{x}_d) \quad \text{II.35}$$

$$\text{Donc : } U_{eq} = g(x)^{-1} \cdot (\ddot{x}_d - \lambda(\dot{x} - \dot{x}_d) - f(x) - d) \quad \text{II.36}$$

La commande discontinue est donnée par :

$$U_d = -k \cdot \text{sign}(s) \quad \text{II.37}$$

Les constantes k et λ sont choisies par le concepteur de manière à garantir la convergence de la trajectoire vers la surface de glissement. La commande est donnée par :

$$U = g(x)^{-1} \cdot (\ddot{x}_d - \lambda(\dot{x} - \dot{x}_d) - f(x) - d) - k \cdot \text{sign}(s) \quad \text{II.38}$$

Cette commande assure la convergence de l'état du système vers la surface de glissement [24]. Les résultats en simulation faites au Matlab sont présentés par les figures suivantes :

II.8.1.1 Résultats de la simulation :

Pour les paramètres : $k = 18$ et $\lambda = 9$

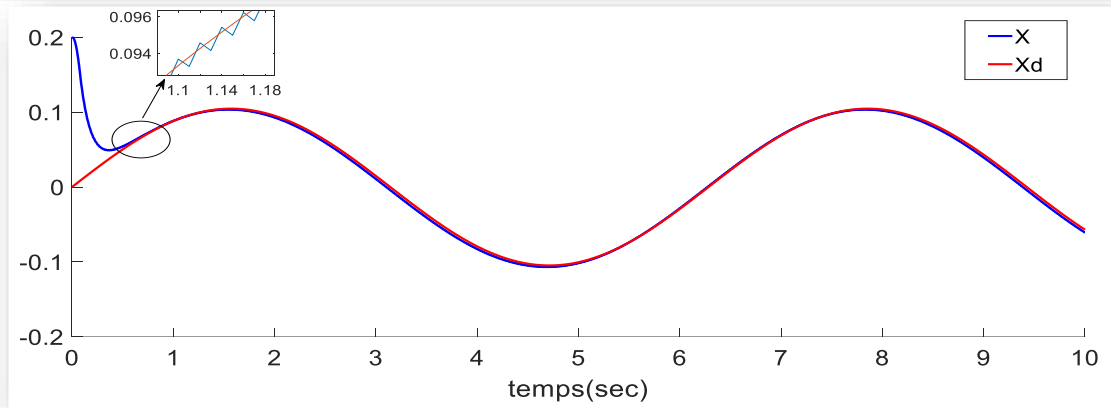


Figure II.13.a: La trajectoire du système.

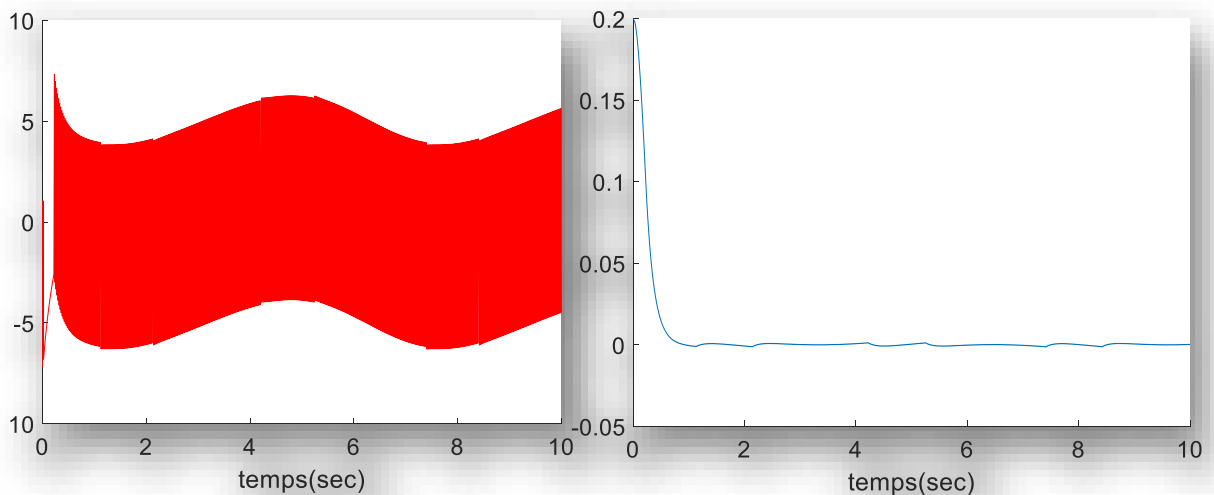


Figure II.13.b : la commande de système

Figure II.13.c : l'erreur de poursuit

✿ Les résultats de simulation pour le problème de la convergence de l'état du système vers la surface de glissement (trajectoire), sont montrés dans les figures (II.13 a-c).il est clair que le système glisse sur la surface de glissement ce que nous donne une poursuit parfait du système d'autre part on voit que la commande est très compris l'erreur de poursuit converge vers une bonde très étroite autour de zéro

✿ Mais notamment le problème major de la commande par mode glissante (**Chattering**) apparaîtra toujours à cause de présence de la fonction signe dans les expressions des différentes lois de commande ; cette dernière est la cause principale du phénomène de chattering.

✿ Parmi les solutions pour éliminer ce phénomène on remplace la fonction **sign(s)** par **sat(s)** dans la commande discontinue ; les résultats obtenus sont présentés par les figures suivants :

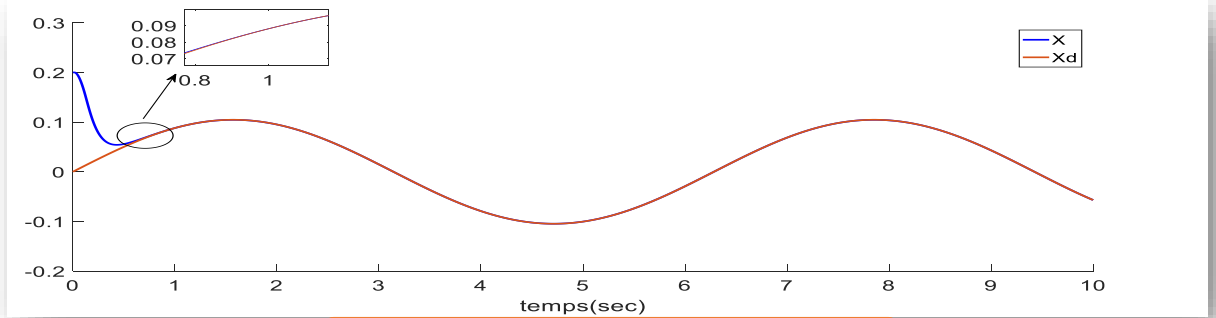


Figure II.14.a: La trajectoire du système

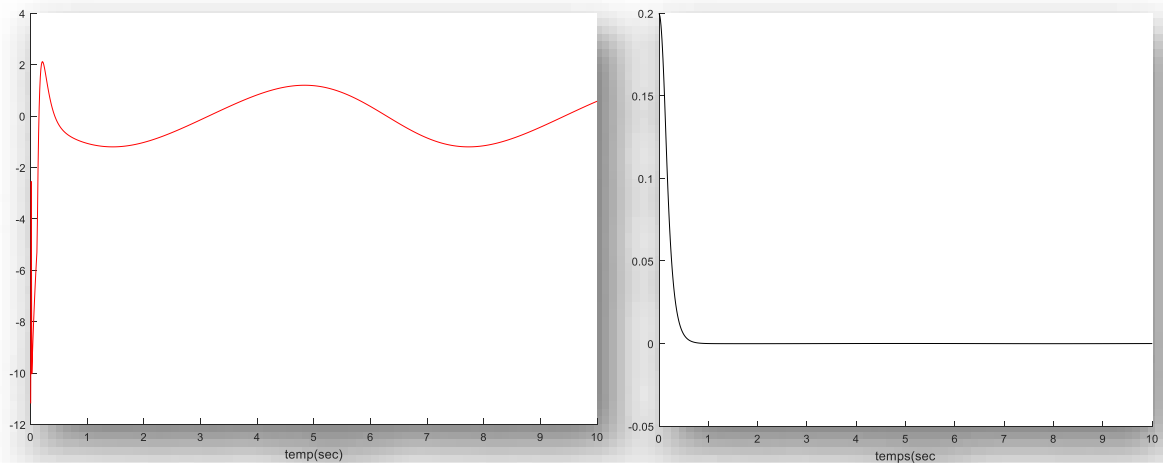


Figure II.14.b : la commande du système

Figure II.14.c : l'erreur de poursuite

✿ Il est clair qu'après le remplacement de la fonction $sign(s)$ par $sat(s)$ on a résolu le problème de chattering fig. (II.14.a) ; la commande du système rendre plus lisse Fig. (II.14.b) et force la sortie à suivre le signal de référence, cette poursuite s'effectue, donc en assure la convergence de l'erreur vers le zéro en temps fini d'une part Fig. (II.14.c) ; et la stabilité de notre système d'autre part .

2)-La commande hybride glissant floue (FSMC)

L'application de cette commande fait améliorer les résultats obtenus, une poursuite rapide de trajectoire et assure la stabilité du système.

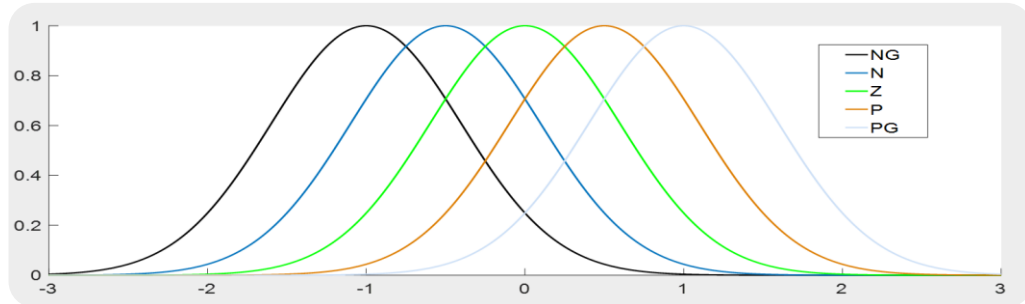
✿ Les paramètres de FLC

Le type de régulateur flou (FLC) qui on utilise pour cette application est de type (T-S)

Les variables linguistiques de l'entrée sont :

✿ NG : négative grande	✿ N : négative	✿ Z : zéro
✿ P : positive	✿ PG : positive grand	

Les fonctions d'appartenance utilisées sont normalisées dans l'univers [-1 1] et sont de forme gaussienne pour les contrôleurs FLC 1 et FLC 2



FigureII.15 : fonction d'appartenance

a)- FLC 1 avec les entrées (\dot{e} ; e)

Le jeu des règles dans le tableau suivant :

TABLEAUX II.1 : matrice d'inférence ($e \dot{e}$)

$\dot{e} \backslash e$	NG	N	Z	P	PG
NG	NG	NG	NG	N	Z
N	NG	NG	N	Z	P
Z	NG	N	Z	P	PG
P	N	Z	P	PG	PG
PG	Z	P	PG	PG	PG

♣ Les résultats sont présentés par les figures suivantes :

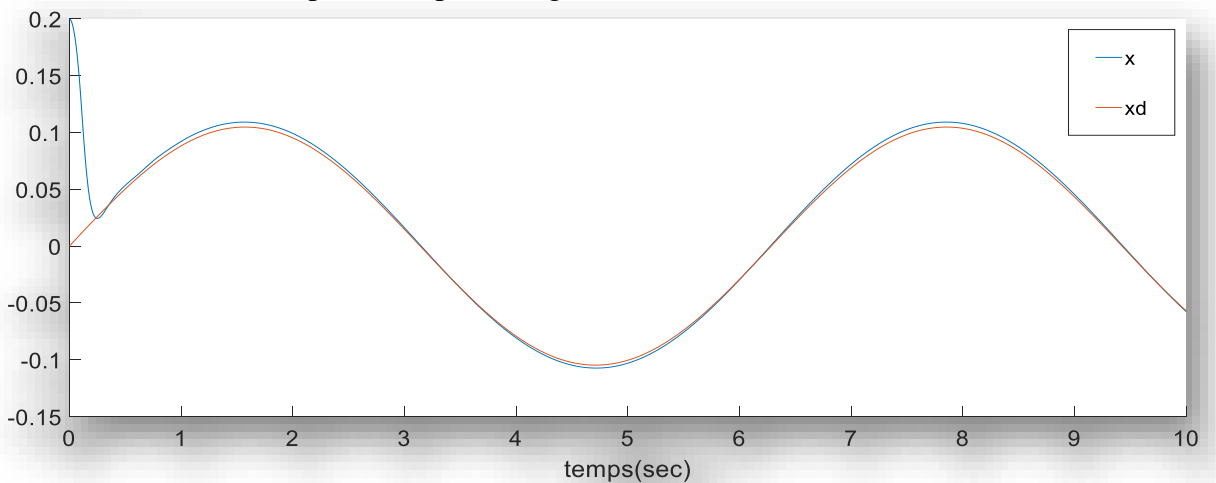


Figure II.16.a : la trajectoire de système

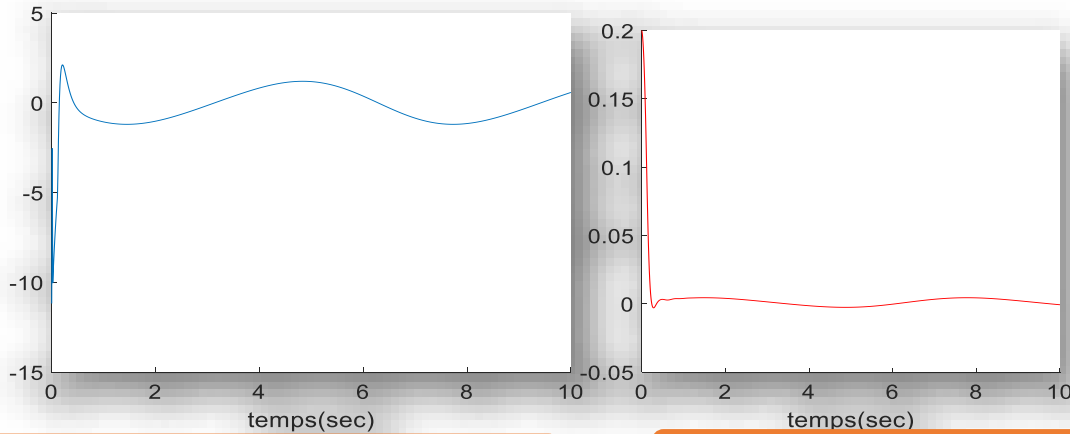


Figure II.16.b : la commande de système

figure II.16.c : l'erreur de poursuite

✿ On notera qu'un régulateur avec des entrées ($\dot{e}; e$) nous remarquons une excellente rapidité au temps de réponse et une poursuite satisfaisant du système Fig. (II.16.a) avec une commande lisse Fig. (II.16.b) et une erreur de poursuite tends vers zéro dans un temps fini Fig. (II.16.c) autrement la disparition de chattering grâce au logique floue

b) - FLC 2 avec une entrée ($\dot{s}; s$)

Le jeu des règles dans le tableau suivant :

TABLEAUX II.2 : matrice d'inférence ($s \dot{s}$)

$\dot{s} \backslash s$	NG	N	Z	P	PG
NG	NG	NG	NG	N	Z
N	NG	NG	N	Z	P
Z	NG	N	Z	P	PG
P	N	Z	P	PG	PG
PG	Z	P	PG	PG	PG

✿ Les resultats obtenu :

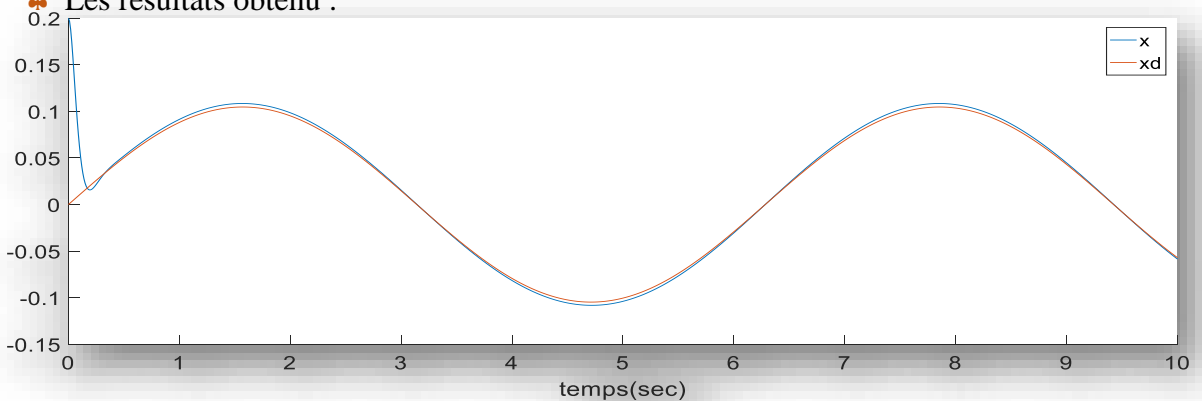


Figure II.17.a la trajectoire de système

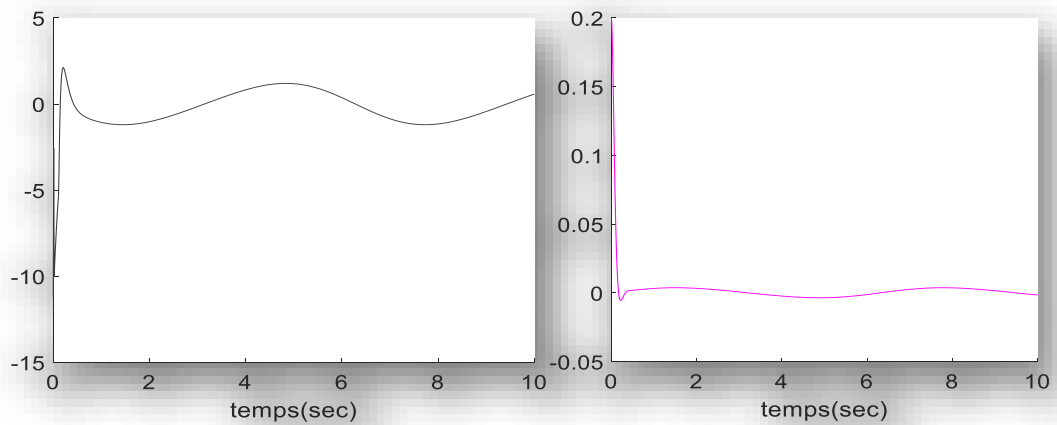


Figure II.17.b : la commande de système

figure II.17.c : l'erreur de poursuite de système

✿ On notera qu'un régulateur à des entrées $(\dot{s}; s)$ nous remarquons une excellente rapidité au temps de réponse et une poursuite satisfaisant du système Fig (II.17.a) avec une commande lisse Fig (II.17.b) et une erreur de poursuite tend vers zéro dans un temps fini Fig (II.17.c) autrement la disparition de chattering grâce au logique floue

🌸 Finalement on note que, toutes les résultats de simulation obtenues pour les deux régulateurs flous (entrées $(\dot{s}; s)$ et $(\dot{e}; e)$) sont réalisés afin d'avoir une régulateur approche suffisamment à la dynamique d'un régulateur optimal et ces résultats sont très proches et suffisante pour les deux régulateurs flous mais les plus satisfaisantes pour nous sont les résultats obtenues pour le régulateur à entrées $(\dot{s}; s)$ à cause de :

- 1- un temps de réponse plus rapide dans le régime transitoire.
- 2 -un dépassement minimum des allures des poursuites moins de 5%.
- 3 -moins d'oscillations et de perturbations de l'allure de la commande.

II.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à la commande par modes glissants, notre démarche a été d'un rappel sur les fondements théoriques, nous nous sommes attachés à exposer les notions essentielles telles que l'attractivité des surfaces de glissement, les conditions d'existence, les propriétés de robustesse, la commande équivalente et la dynamique en régime glissant ; l'inconvénient majeur de cette méthode est l'apparition du phénomène de réticence qui se manifeste dans les grandeurs asservies. Les fonctions d'adoucissement permettent sa réduction, cependant elles font apparaître un compromis entre la robustesse de la commande et les performances du système.

Afin de remédier au problème de chattering ou broutement engendré par la composante discontinue, une combinaison de la logique floue (FLC) et la commande par mode glissant (SMC) fut adoptée (FSMC), et on a appliqué cette hybridation entre les deux commandes pour atteindre une meilleure commande, rapide et bon poursuite de trajectoire désiré.

Pour mettre en évidence ces performances de la structure de commande floue par mode glissant développé, un exemple de simulation est présenté, les résultats de simulation obtenus ont permis de valider cette structure de commande, en outre, l'étude des performances du contrôleur FSMC a mis en évidence l'efficacité des systèmes étudiés.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter l'essentiel de notre travail qui vise à commander une grue à cinq degrés de liberté sur laquelle on va appliquer la commande hybride FSMC pour contrôler cette dernière et minimiser au maximum les balancements de la masse en état de déplacement.

III.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter un exemple d'application pour mettre en évidence la performance de la commande décrite au chapitre précédent (FSMC) et mieux appréhender leurs limitations. Nous prenons pour l'expérimental un exemple non-linéaire (Grue 3D a interface avec MATLAB) pour tester la fiabilité de la méthode développée. En se basant sur une expérience pratique pour visualiser puis résoudre les problèmes de la stabilisation de la grue et l'élimination des balancements dans le traitement de l'exemple étudié. Nous utiliserons pour la simulation « MATLAB/Simulink » et les résultats sont présentés et discutés.

III.1.1.Définition de système de la grue

Le système de grue est un système électromécanique, qui est utilisé pour soulever, abaisser des matériaux et les déplacer à partir d'un endroit à un autre. Utilisé pour soulever des objets lourds. Il existe plusieurs types de systèmes de grue, dans notre travail le système « **3D Crane** » de « **Inteco** » présente la plateforme expérimentale utilisé, dans ce dernier, la charge utile est attachée à l'extrémité d'un fil et peut se déplacer librement dans les trois dimensions.

Le modèle mathématique de « **3DCrane** » est assez compliqué. De nombreuses tentatives ont été faites pour introduire des modèles simplifiés ou d'utiliser des techniques de contrôle pour faire face aux incertitudes de la modélisation du système. L'objectif principal dans le contrôle du système de grue 3D est de positionner la charge à un endroit désiré avec un minimum d'oscillations. (Sway controlle) [27].



Figure III.1 : Le système 3D crane de laboratoire

III.1.2. Le modèle mathématique du system « 3DCrane »

Un élément important dans la construction du modèle mathématique est le choix approprié du système des coordonnées. Malgré le fait que le système cartésien est simple d'interpréter, il n'est pas pratique pour la description de la dynamique du mouvement de rotation, de telle sorte, que nous choisissons le système sphérique. Comme nous pouvons le voir sur la figure (III.2), la position de la charge utile est décrite par deux angles α et β . La position de la charge utile est décrite par les équations suivantes:

- ✿ $x_c = x_w + R \cos \alpha$
- ✿ $y_c = y_w + R \sin \beta$
- ✿ $z_c = z_w + R \sin \alpha \cos \beta$

Où x_w représente la distance du rail avec le chariot du centre du cadre de la construction, et y_w est la distance entre le chariot et le centre du rail. De manière similaire, la dynamique de la grue peut être obtenue comme suit:

- ✿ $m_c \ddot{x}_c = -s_x$
- ✿ $m_c \ddot{y}_c = -s_y$
- ✿ $m_c \ddot{z}_c = -s_x - m_c g$
- ✿ $m_w \ddot{x}_w = F_x - T_x + s_x$
- ✿ $(m_w + m_s) \ddot{y}_w = F_y - T_y + s_y$

a) Où s_x et s_y sont les composantes du vecteur de s [27].

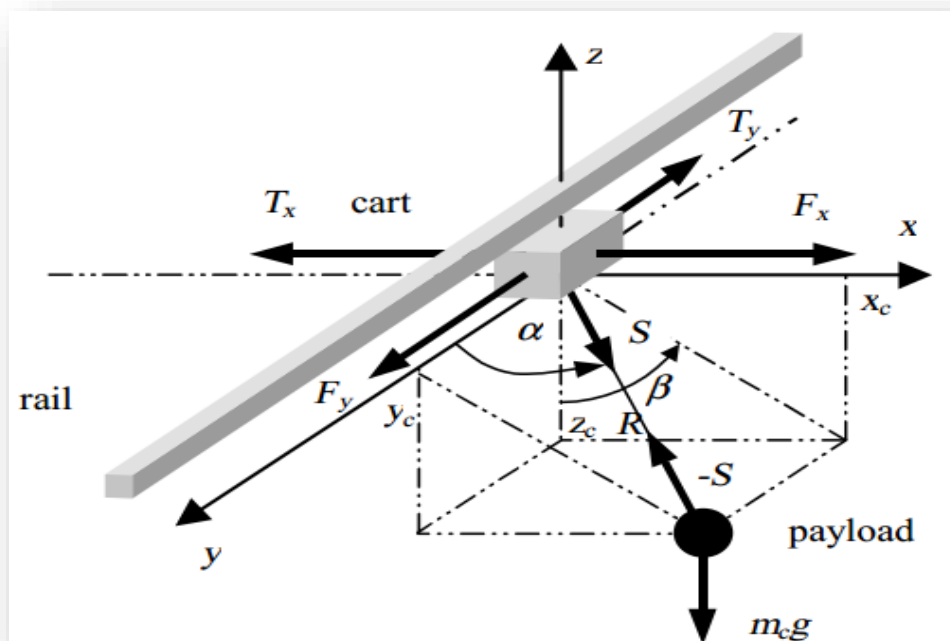


Figure III.2 : le système de la grue 3D leurs coordonnées et forces

❁ Objectif de travail :

L'objectif de cette section est l'implémentation et la commande hybride FSMC développé dans le chapitre précédent sur la plateforme expérimentale « 3D crane » à 5 degrés de liberté, afin d'évaluer les performances de suivi de trajectoires, le rejet de perturbation et les balancements dues au déplacement de la charge ainsi la robustesse aux variations paramétriques. Les expériences sont effectuées au niveau de laboratoire du centre de recherche avec tous les commodités du travail.

III.2. Résultats expérimentaux et interprétation

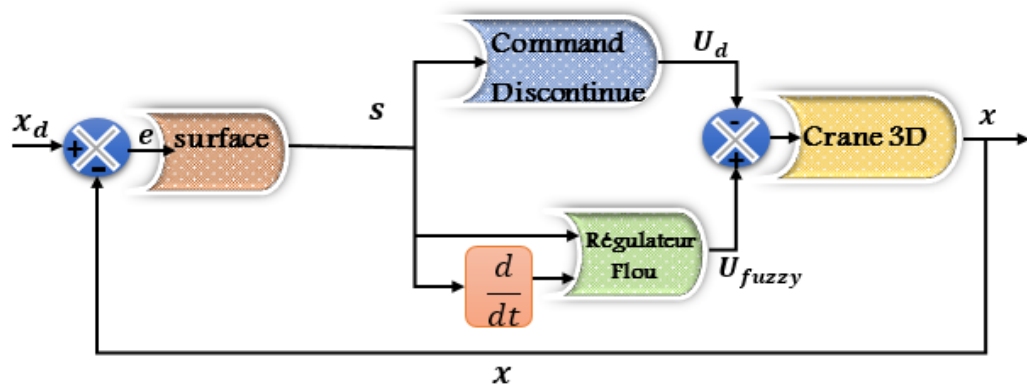


Figure III.3 : schéma de régulateur FSMC avec entre $s; \dot{s}$

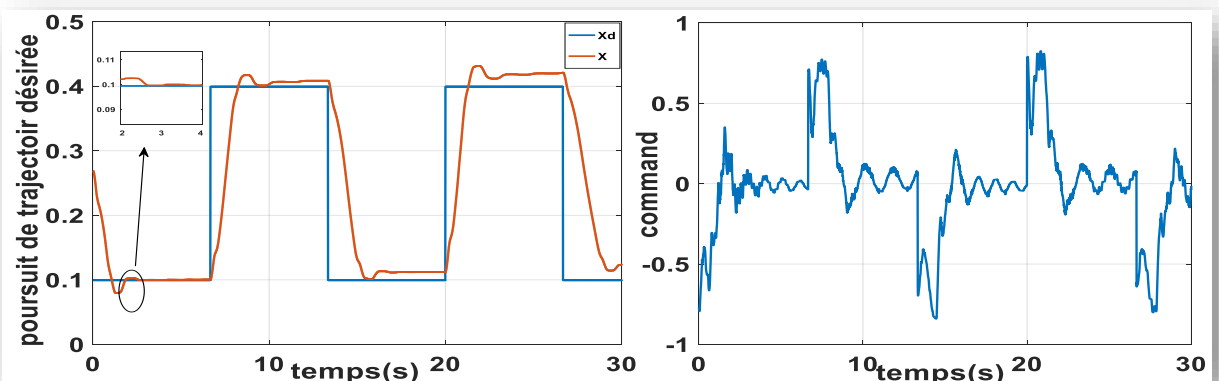
Pour cette expérience pratique on a utilisé la technique de FSMC afin de commander la grue (5 DOF) ; les deux types de régulateur flou qui sont utilisés dans cette technique sont de (type 1 et type 2) avec des entrées ($s; \dot{s}$ et $e; \dot{e}$) pour contrôler les trois axes X et Y et Z, et deux régulateur PID pour contrôler les deux angles α et β , les résultats obtenus sont présentés au-dessous :

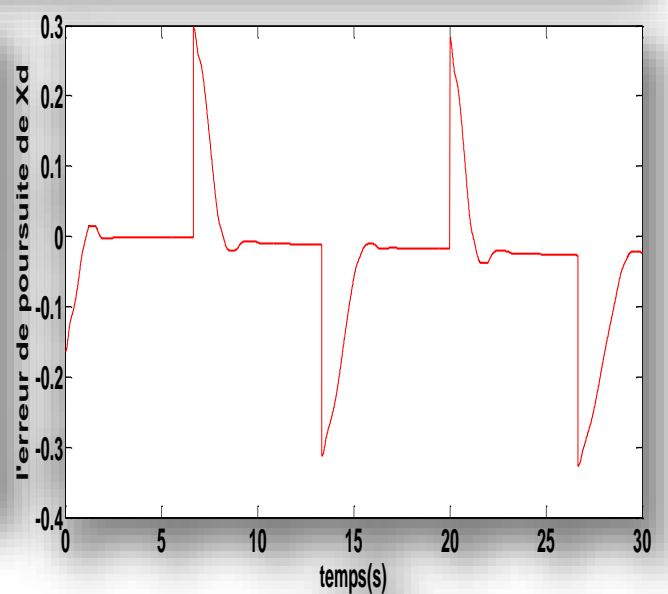
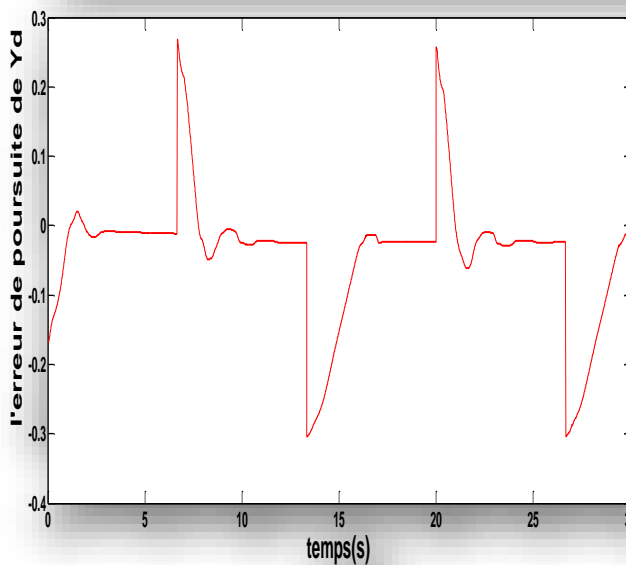
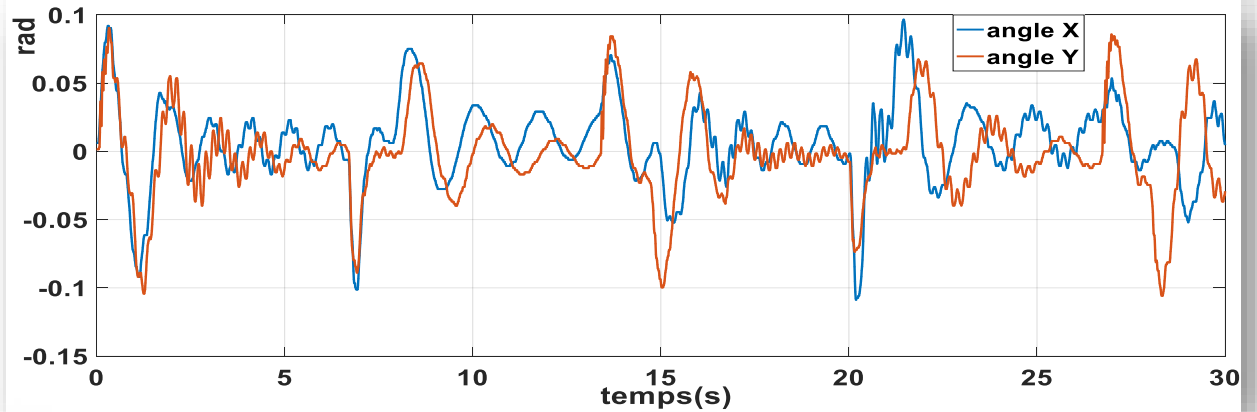
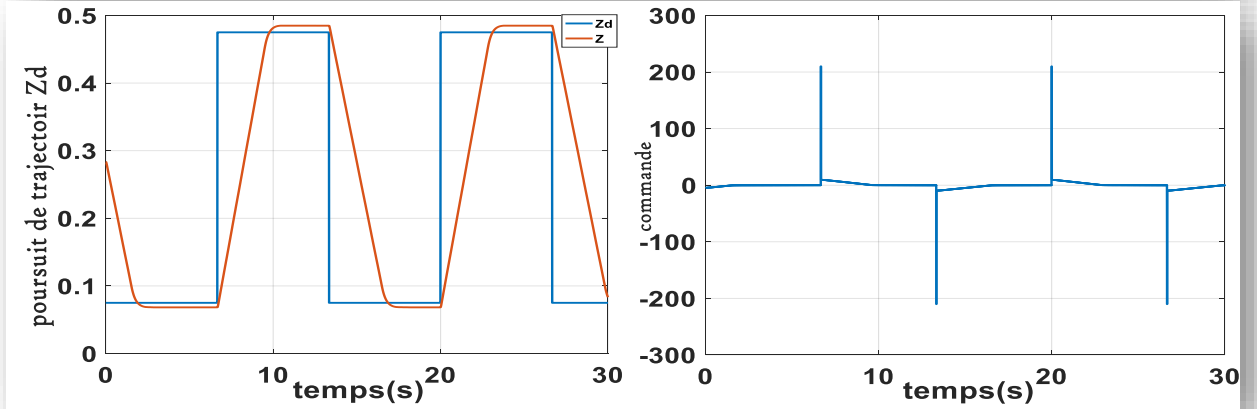
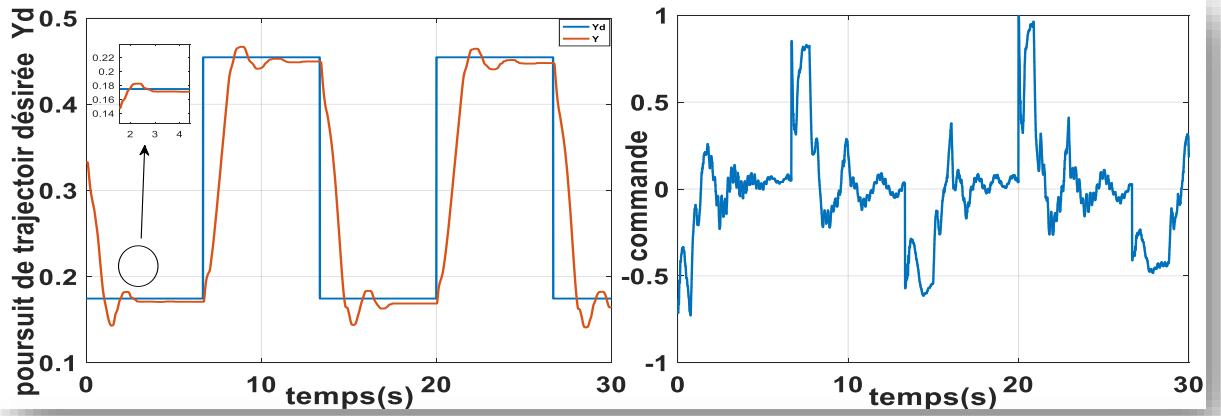
III.2.1 Résultats obtenus sans perturbation du régulateur FSMC-type1

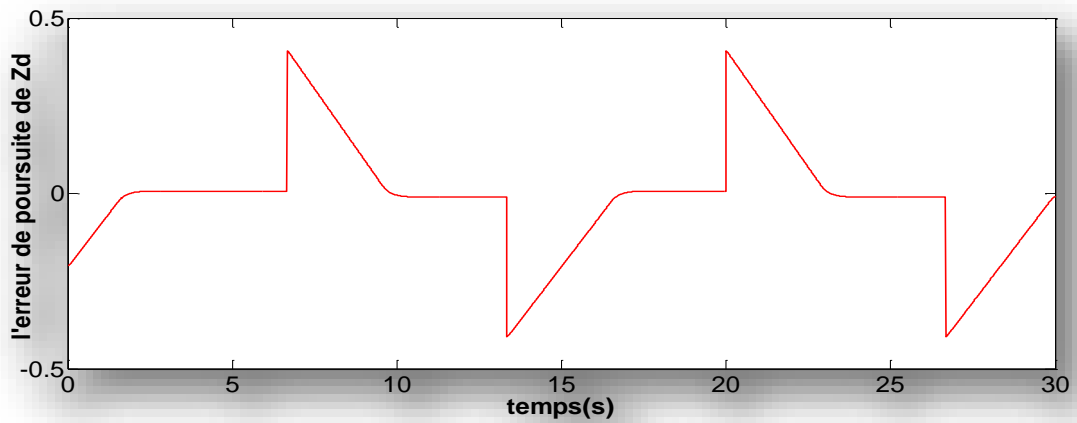
a) Pour des entrées ($s; \dot{s}$) du régulateur les résultats obtenus sont :

Les paramètres utilisés pour le régulateur (FSMC) type-1 sont :

- ❁ $FSMC(X) : k = 15, \lambda = 15$
- ❁ $FSMC(Y) : k = 15, \lambda = 22$
- ❁ $PID(Z) : P=25 ; I=5 ; D=5$
- ❁ $FLC = 49 \text{ règle}$







b) Pour des entrées ($e; \dot{e}$) du régulateur les résultats obtenus sont :

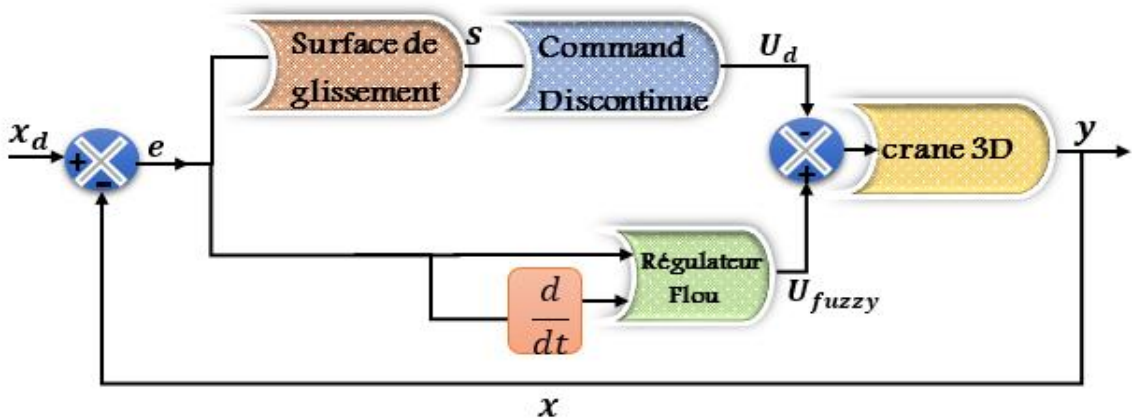
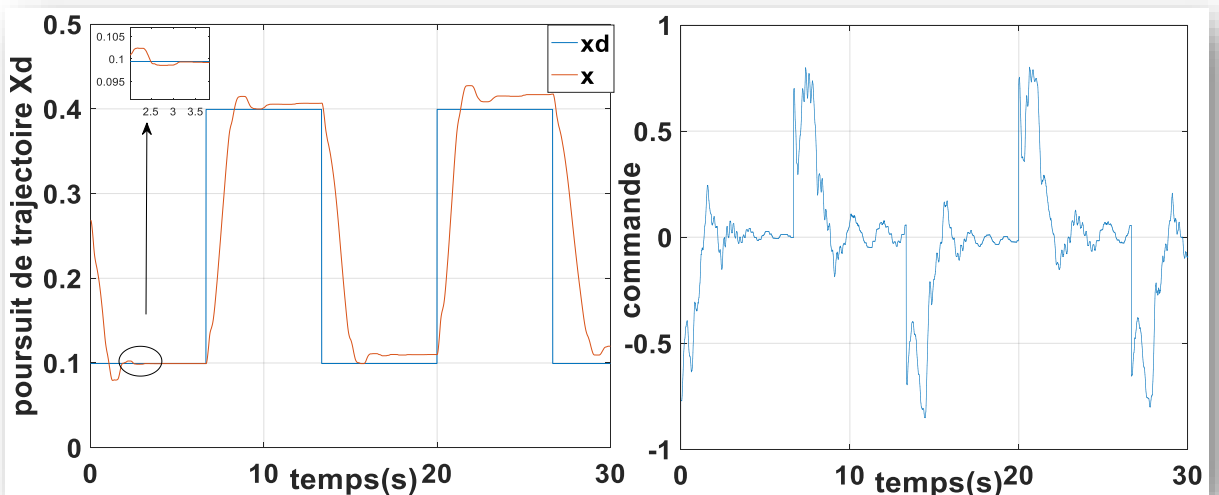
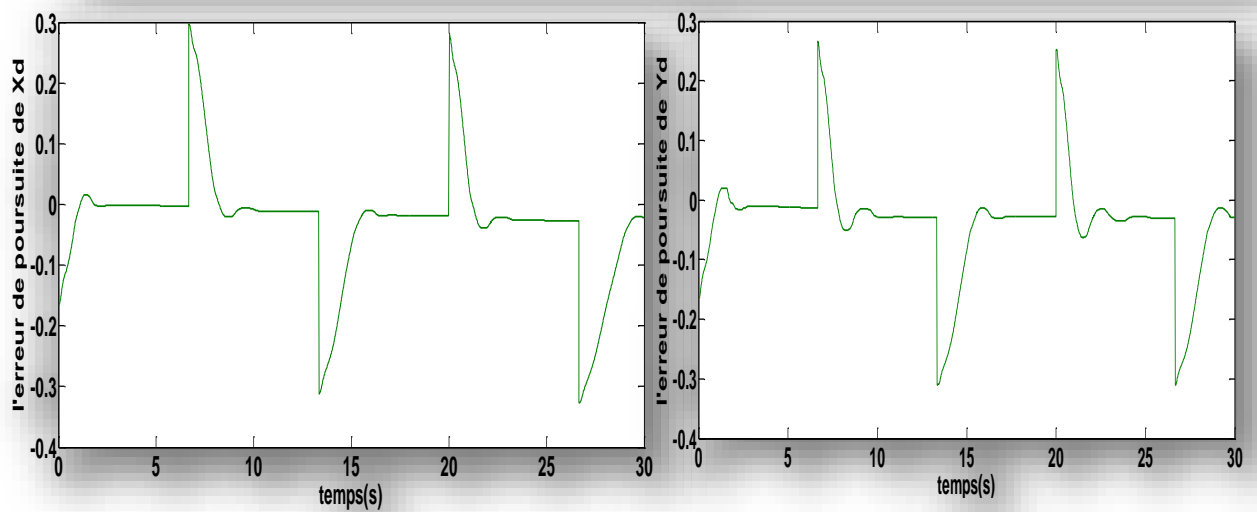
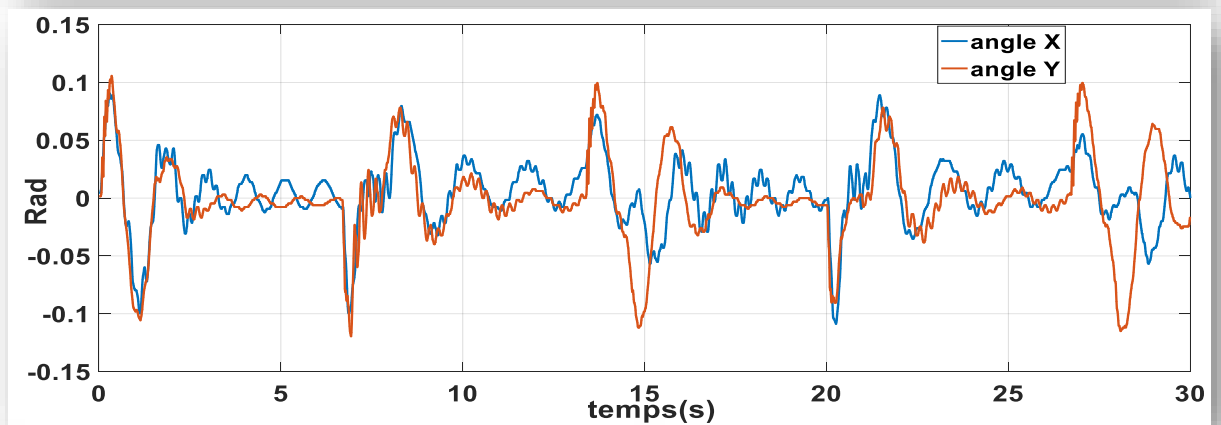
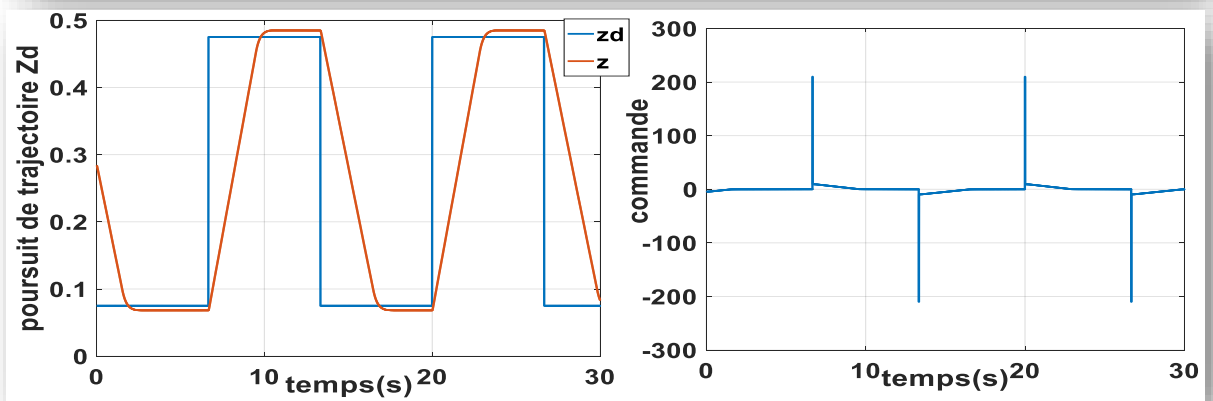
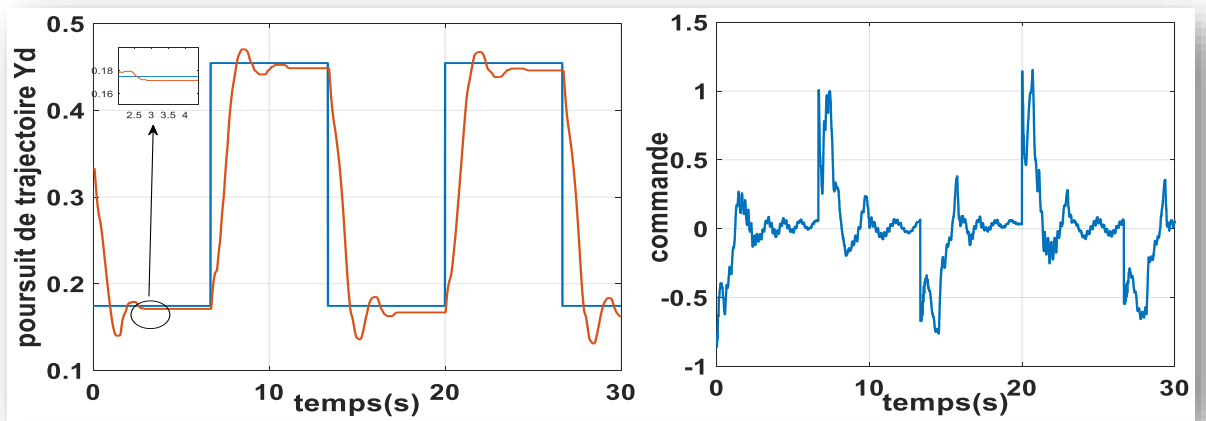


Figure III.4 : schéma de régulateur FSMC avec entre $e; \dot{e}$

Les paramètres utilisés pour le régulateur (FSMC) type-1 sont :

- ✿ $FSMC(X) : k = 15, \lambda = 15$
- ✿ $FSMC(Y) : k = 18, \lambda = 14$
- ✿ $PID(Z) : P=25 ; I=5 ; D=5$
- ✿ $FLC = 49 \text{ règle}$





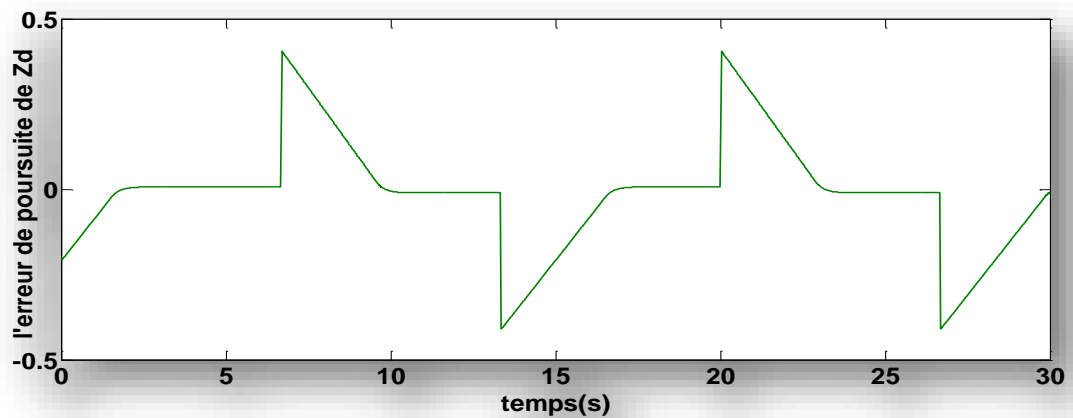


Figure III.5 : Comportement dynamique du (3D crane) poursuite trajectoire désiré et ces angles d'oscillations de la masse (FLC type 1)



a) FSMC type-1 entrées $s\dot{s}$

b) FSMC type-1 entrées $e\dot{e}$

Interprétation des résultats :

Les résultats de la commande en position des trois axes pour les entrées du régulateur FSMC type-1 ($s\dot{s}$ et $e\dot{e}$) en expérimental sont illustrés par la fig. (III.3). Montrent que les allures (la commande et la poursuite de trajectoire) entrées $s\dot{s}$ sont semblable à celles des entrées $e\dot{e}$, comme ils montrent aussi une bonne poursuite de trajectoire pour chaque axe qui regagne rapidement leurs allures de références.

Au début, l'erreur prend sa valeur maximale passant par un régime transitoire relativement long, et commence à décroître pour atteindre finalement la valeur zéro au régime permanent. L'allure de la commande pour chaque axes été lisse, les résultats obtenus par le régulateur aux entrées $s; \dot{s}$ sont mieux caractérisés que ceux obtenus par le régulateur aux entrées $e\dot{e}$ à savoir :

-  un dépassement minimum des allures de la commande et la poursuite.
-  moins d'oscillations au niveau des allures des angles α et β

III.2.2 Résultat obtenus avec perturbation du régulateur FSMC-type1

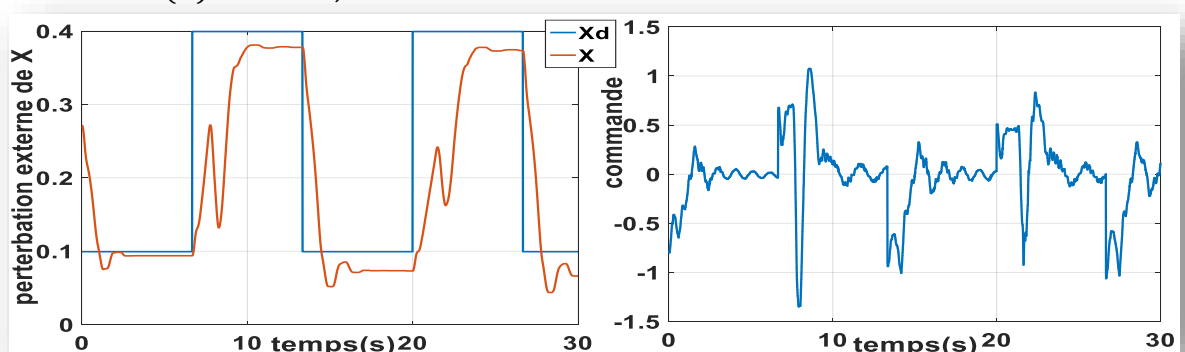
Pour des entrées ($s; \dot{s}$) du régulateur les résultats obtenus sont :

Les paramètres utilisés pour le régulateur (FSMC) type-1 sont :

♣ $FSMC(X) : k = 15, lamda = 15$

♣ $FLC = 49$ règle

♣ $FSMC(Y) : k = 15, lamda = 22$



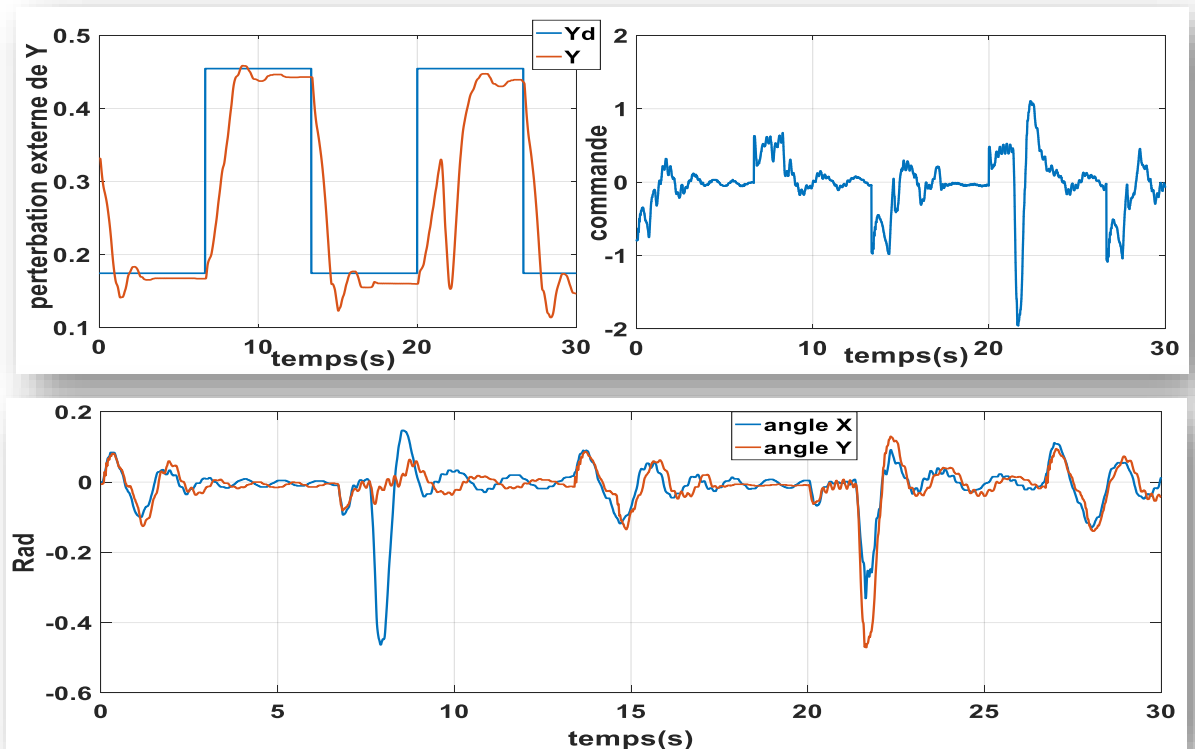


Figure III.6 : Comportement dynamique du (3D crane) poursuite trajectoire désiré et son angles d'oscillations de la masse avec une perturbation externe (FLC type 1)

✦ Interprétation des résultats :

Par l'ajout d'une perturbation externe (on pousse la masse manuellement) à l'instant (7.5s et 22.5s), à l'expérience pratique, il apparait clairement que les nouvelles commandes présentent des performances positives et une adaptation rapide aux perturbations externes et imposent au système de suivre la trajectoire désirée.

Au bout de cet essai expérimental, nous avons visualisés les oscillations de la masse durant l'expérience pratique. Les deux type du régulateurs proposées présentent une forte robustesse et assurent des bonnes performances même en présence des petites variations paramétriques avec des perturbations externes; cependant, la commande hybride (FSMC) présente une meilleure poursuite, avec une commande d'allure presque lisse.

✦ Remarque : a cause des problèmes dues aux applications de la commande FSMC/type2, sur la grue nous avons orienté notre expérience pratique a l'obtention des résultats par simulation sous MATLAB .

III.3.Résultats de Simulation et interprétation :

La simulation de la commande hybride FSMC/type-2 a été effectuée sous les mêmes hypothèses et les même conditions que ceux utilisées pour de FSMC/ type-1, et avec les mêmes profils dans le but de voir les nouvelles qualités de poursuite et de régulation ainsi que la

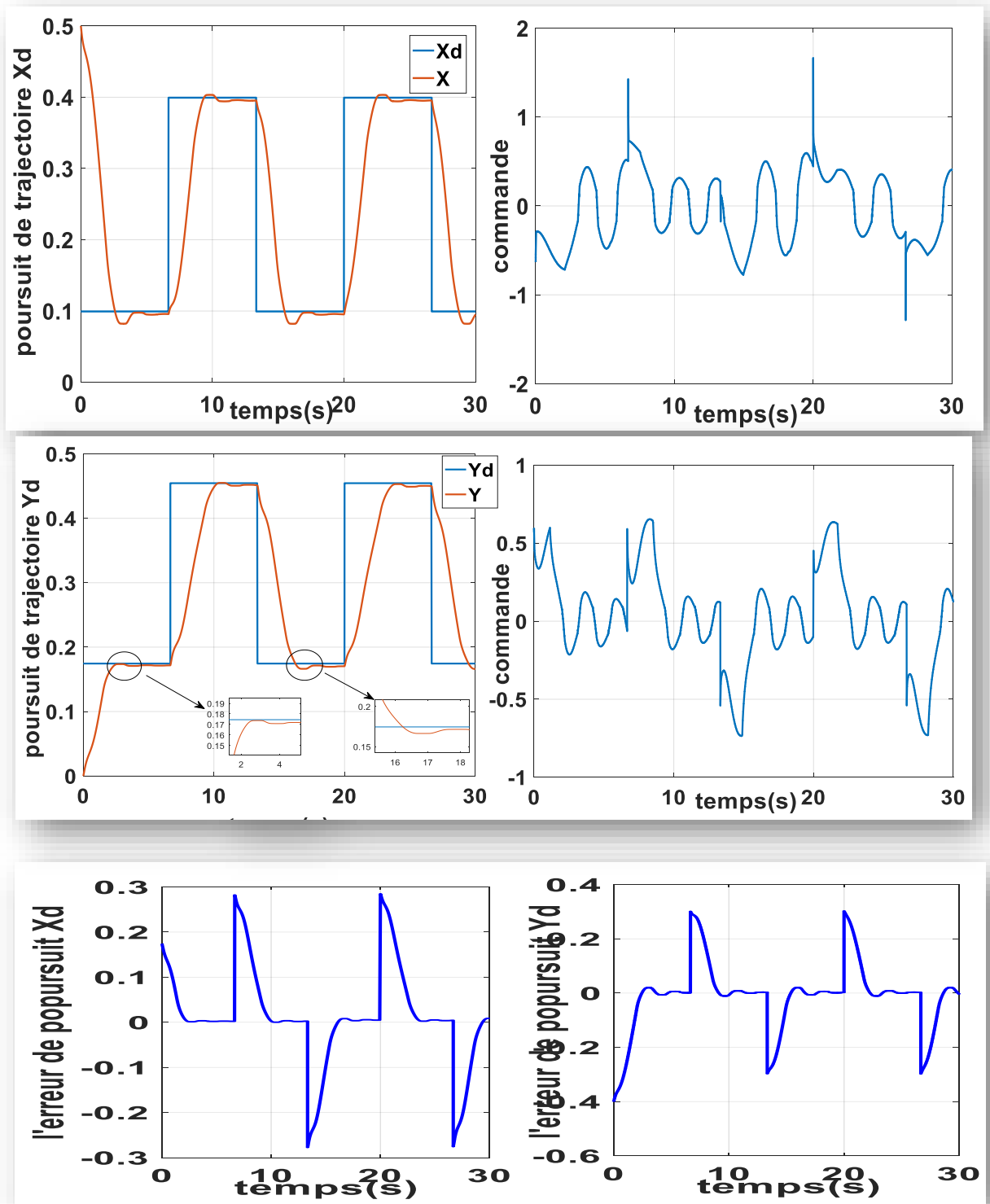
robustesse des deux nouvelles commandes. pour cela, nous avons appliqué une commande (FSMC-type2) sur le système ; les résultats de simulations sont montrés sur les figures (III.7)

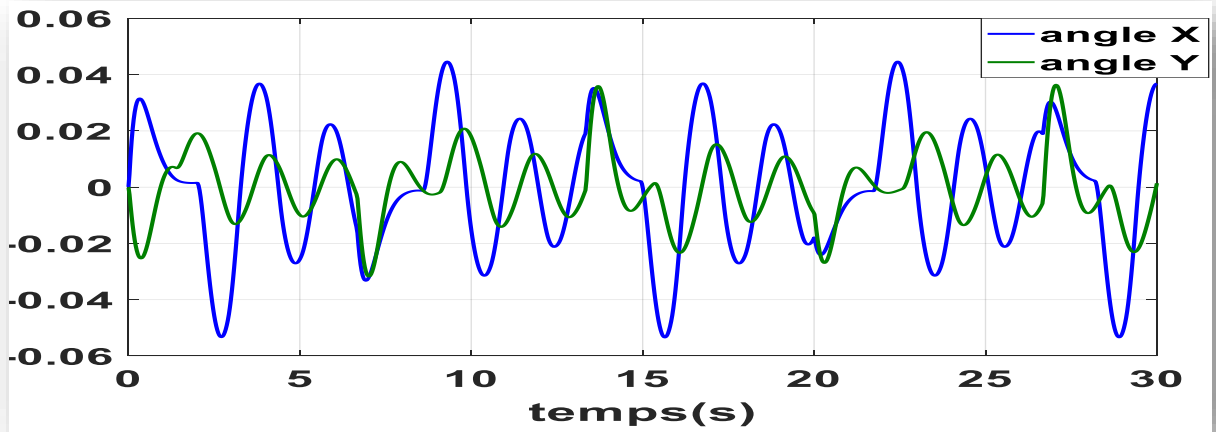
a) **Pour des entrées ($s; \dot{s}$) du régulateur, les résultats obtenus sont :**

Les paramètres utilisés pour le régulateur (FSMC) type-2 sont :

✿ $FSMC(X) : k = 16.5, lamda = 9$ ✿ $FLC = 25 \text{ règle}$

✿ $FSMC(Y) : k = 17, lamda = 14$

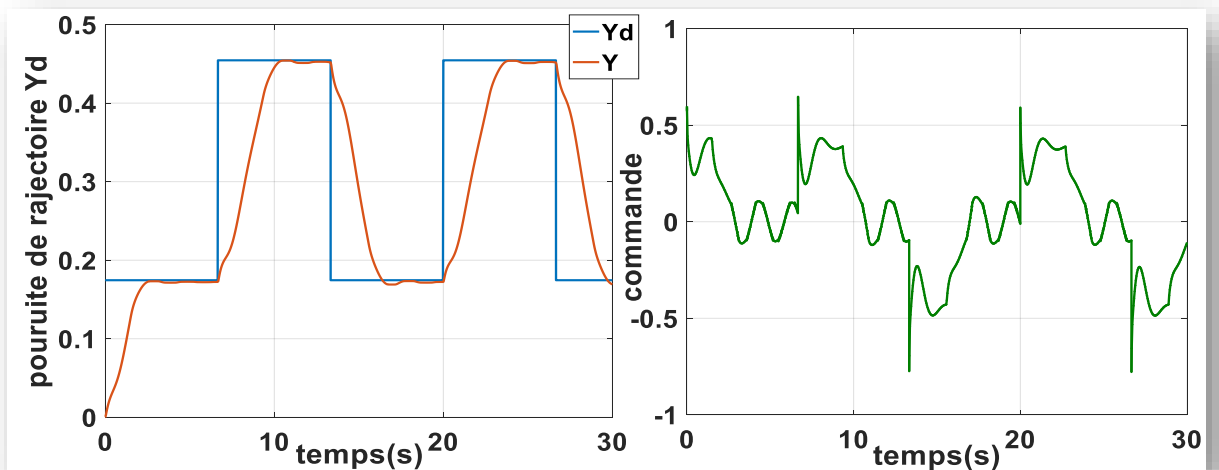
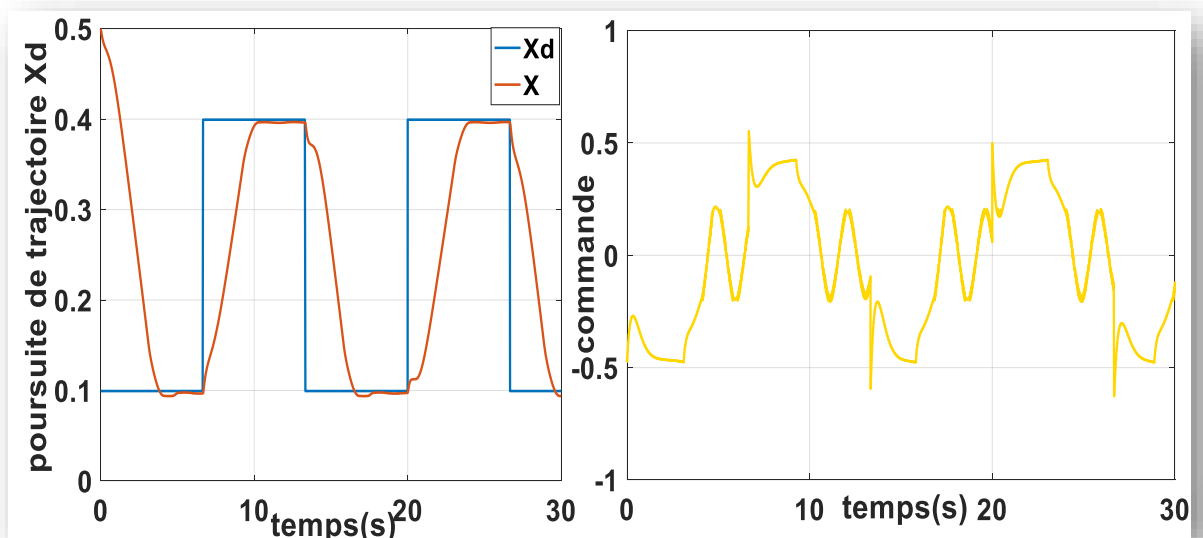




b-Pour des entrées ($e; \dot{e}$) du régulateur les résultats obtenus sont :

Les paramètres utilisés pour le régulateur (FSMC) type-2 sont :

- ♣ $FSMC(X) : k = 18, lamda = 12$ ♣ $FLC = 25 \text{ règle}$
- ♣ $FSMC(Y) : k = 17, lamda = 13$



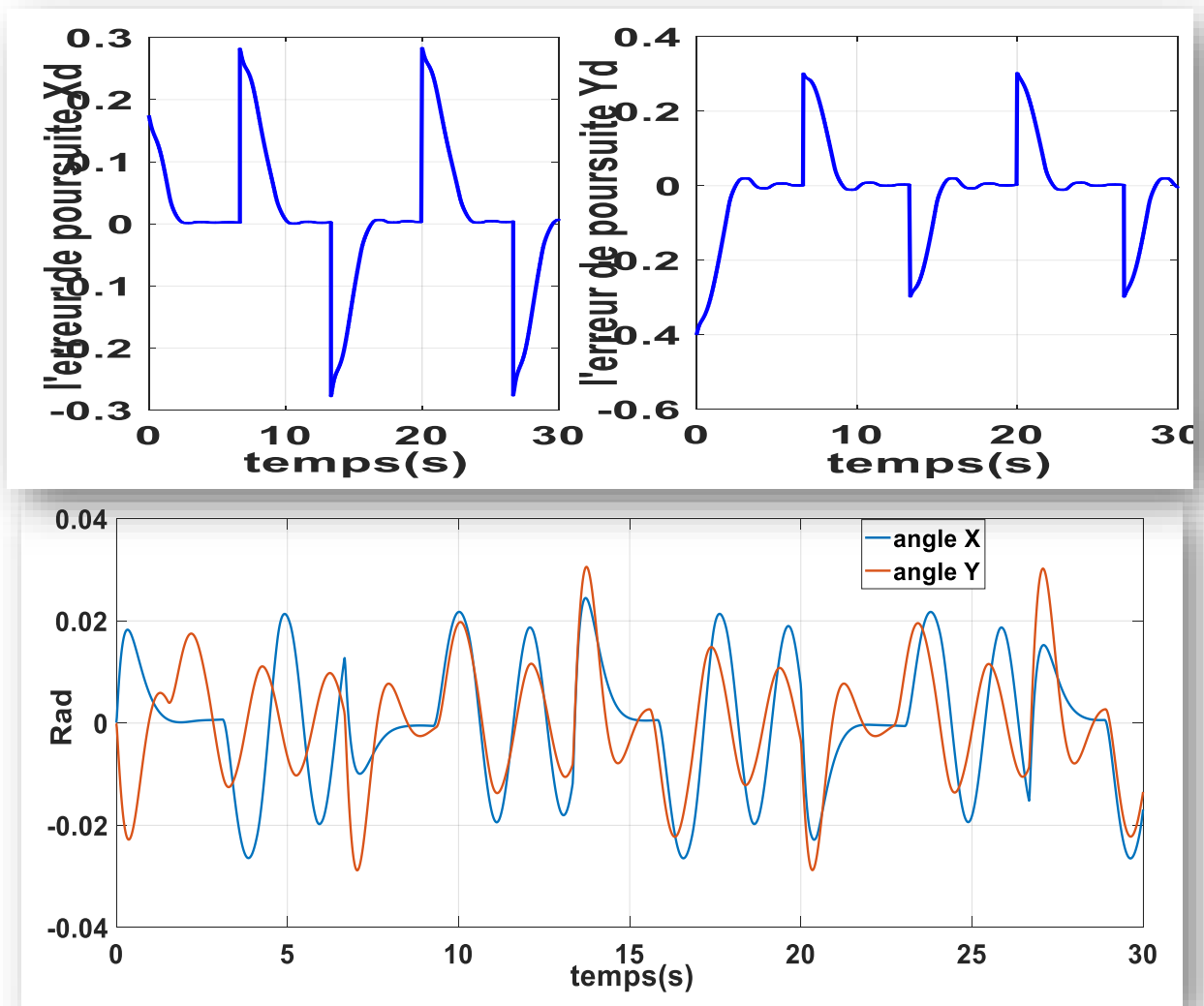


Figure III.7 : Comportement dynamique du (3D crane) poursuite de la trajectoire désiré et son angles d'oscillations de la masse (FLC type 2)

(a) FSMC entrées $s\dot{s}$

(b) FSMC entrées $e\dot{e}$

✦ **Interprétation des résultats :**

L'observation des résultats de simulation montre qu'il y a une poursuite très suffisante avec un dépassement presque nul mais avec un temps de réponse un peu lent ; et les oscillations sur les allures de commande sont éliminées. On remarque que les meilleures valeurs de ces derniers sont les valeurs obtenues lors de l'application de la commande à entrées $s\dot{s}$; \dot{s} , qu'on peut considérer comme la commande la plus performante et la plus efficace par rapport aux autres commandes.

✦ En fin le contrôleur proposé (FSMC) présente de bons résultats (simulation et expérimental) pour la régulation autour des consignes imposées. Les résultats obtenus dans la commande de la grue sont très satisfaisants. Puisque le réglage des paramètres des régulateurs

été manuel. les résultats obtenus ne sont pas idéales autrement dite (il était possible d'avoir des meilleur résultats avec un peu de réglage). Nous estimant qu'ils sont encourageants pour l'application des nouvelles technique.

III.4.CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présentés un exemple d'application pour mettre en évidence la performance de la commande décrite au chapitre précédent (FSMC) et mieux appréhender leurs limitations. Nous avons pris pour l'expérimental un exemple non-linéaire (Grue 3D) pour tester la fiabilité de la méthode développée. En se basant sur une expérience pratique pour visualiser puis résoudre les problèmes de la stabilisation de la grue et l'élimination des balancements dans le traitement de l'exemple étudié. Nous avons utilisées pour la simulation « MATLAB/Simulink » et les résultats sont présentés et discutés.

Conclusion Générale

Les travaux, présentés dans ce mémoire, traitent la modélisation et la commande d'une grue à trois axes de liberté, l'idée directrice de ce travail est d'apporter une commande efficace et robuste afin d'éliminer les balancements au niveau de la grue.

En effet une grue à trois axes à commander présente une architecture particulière, puisque il est destiné à des applications particulières et nécessite un outil de modélisation spécifiques; nos apports théoriques ont porté essentiellement sur l'étude des propriétés de la modélisation et la commande de ce type des grues.

L'objectif de ce mémoire était l'application d'une commande hybride Glissant-Floue (FSMC) à une grue 3D, l'annulation des balancements de la masse apportée et l'amélioration de ses performances et ce après avoir appliqué nous a permis de constater l'avantage d'une commande robuste par rapport à les commandes classiques.

En ce qui concerne la modélisation, nous avons établi tout d'abord, on a profité d'une commande floue élaborée par un régulateur flou type-1 puis en type-2 pour assurer un modèle bien déterminé pour le système.

Dans notre cas nous avons utilisé la commande à structure variable par mode glissement ; cette technique est connue par sa robustesse tant du point de rapidité, rejet de perturbation, performances qu'insensibilité aux variations paramétriques, le problème de Chattering a été résolu avec succès.

Pour la commande de la grue 3D nous avons montré la fiabilité des régulateurs hybrides utilisés en mode régulation et poursuite de trajectoire face aux variations paramétriques et aux perturbations de charge, ce qui justifie le recours aux techniques de commande dites robustes.

Des correcteurs hybrides combinant les avantages de la commande floue et la commande par mode glissant, cette combinaison a pour principe d'améliorer la qualité de poursuite de trajectoire à chaque instant et la commande totale prend une allure lisse et continue, cette dernière commande a été appliquée à un pendule inversé et on a réussi à stabiliser ce dernier d'une façon agréable et suffisante et les résultats de simulation confirment la fiabilité de ce genre de contrôleur hybride.

Enfin pour clore cette étude, on a tenté d'appliquer la commande (FSMC) type-1 au modèle expérimental du système étudié (Grue 3D), et malgré les difficultés qu'on a trouvées pour

trouver une combinaison entre les paramètres des 3 axes de la grue et le contrôle des angle de ces axes ; finalement on a atteint à annulé les balancements effectués la masse portée par la grue et d'autre part amélioré le système ; donc on y est arrivé à réaliser notre objectif ; ensuite on a appliqué la commande (FSMC) type-2 au simulation de Matlab et les résultats obtenus aussi confirme la robustesse de ces régulateurs.

Beaucoup de développements peuvent être envisagés comme extension de ce travail. Nous donnons ci-après quelques directions et perspectives :

- ✿ Dans un premier temps nous voyons que l'insertion des commandes de l'intelligence artificielle ou robotique peut aider à fournir une commande qui peut s'adapter rapidement avec les obstacles externes peuvent bloquer ou endommager la masse .
- ✿ L'implémentation d'une nouvelle commande peut prendre en considération le comportement de la masse (type, poids, dimensions...).
- ✿ L'étude et l'amélioration des régulateurs hybrides (FSMC) pour une implémentation sur site réel.
- ✿ L'utilisation des algorithmes d'optimisation pour la détermination des paramètres optimaux et des combinaisons entre eux afin de contrôler les 3 axes de la grue et éliminer les balancements.

Bibliographie

- [1] Antoine Cornuéjols, présentation, "*Introduction à la logique floue* ", janvier 2008.
- [2] Cahier technique N° 191 Francois CHEVRIE, Francois GUELY p4 edition mars 1998.
- [3] S. Merradi, "*Conception d'un régulateur flou pour la commande vectorielle de la machine asynchrone* ", mémoire Magister, Université Biskra, 2007.
- [4] Matthieu Lescieux, "*Introduction à la logique floue*", Octobre 2003.

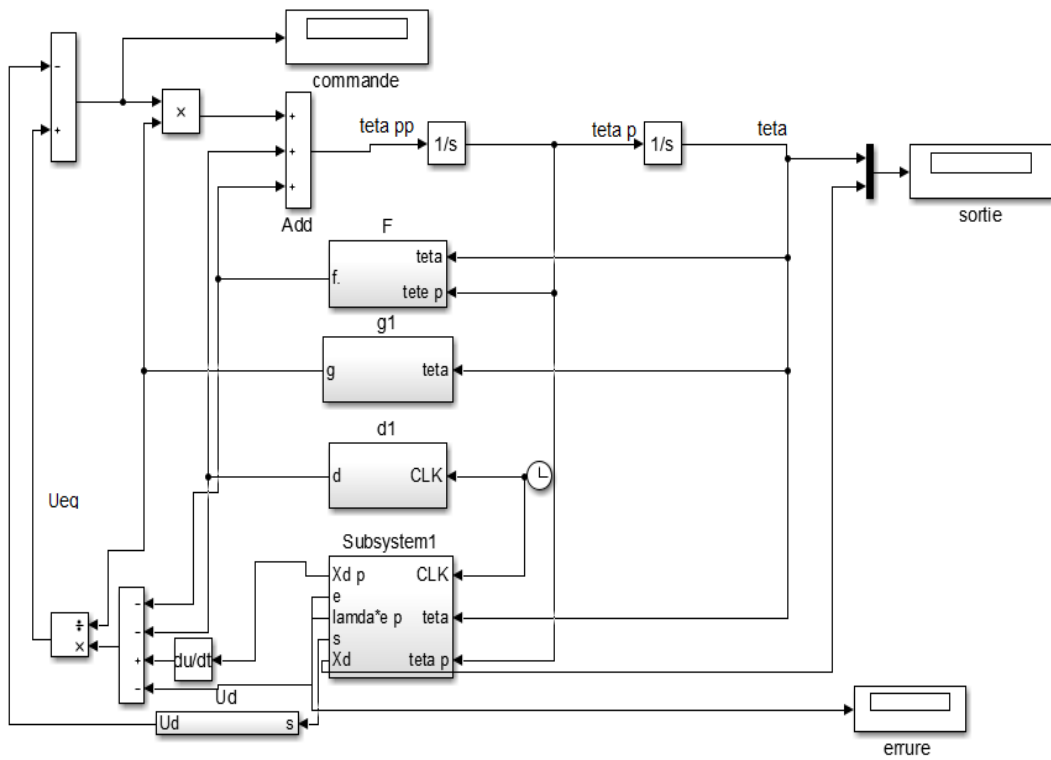
- [7] Défuzzification : Chapitre II La commande à base de la logique floue 14.
- [8] T. Takagi and M. Sugeno, "*Fuzzy Identification of Systems and its Application to Modeling and Control*", IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. SMC-15, no. 1, pp.116–132, Feb. 1985.
- [9] K. Tanaka, and H. O. Wang, "*Fuzzy Control Systems Design and Analysis. A Linear Matrix Inequalities Approach*". John Wiley and Sons Inc, 2001.
- [10] Concepts Fondamentaux de la Théorie des Ensembles Flous et la Logique Floue.

- [11] L. A. Zadeh. "*The concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning Inform*". Sci, vol. 8, pp. 199- 249, 1975.
- [12] A. El Ougli. "*Intégration des Techniques Floues à la Synthèse de Contrôleurs Adaptatifs*." Thèse de Doctorat. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès. 23 Mai 2009.
- [13] J.M. Mendel. "*Fuzzy Logic Systems for Engineering: a Tutorial*." Proceedings of the IEEE, 83(3):pp.345–377, 1995.
- [14] P. Ioannou, J. Sun. "*Robust Adaptive Control*." Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1996.
- [15] J.M. Mendel. "*Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems: Introduction and New Directions*." Prentice-Hall, 2001.
- [16] D. Wu, J.M. Mendel. "*Enhanced karnik–mendel Algorithms*." IEEE Transactions on Fuzzy Systems,17(4): pp.923–934, 2009.
- [17] Achour "*Réglage par mode glissant d'une machine asynchrone*". IEEE Trans. Indust. Applic. Vol.40, N°.1,pp45-55, 2005.
- [18] Buhler,H.(1986). "*Réglage par mode glissement*". Presses polytechnique Romandes.
- [19] Hamerlain, M (1993). "*commande hiérarchisée à modèle de référence et à structure variable d'un robot manipulateur à muscles artificiels*". Thèse de doctorat ,INSA, Toulouse.
- [20] W.Gao,J. C. hung, "*variable structure control system* ", IEEE Trans. Indust. Applic.Vol.40, N°.1, pp45-55, 1993.
- [21] J.J.E. Slotine and J.A. Coetsee, "*Adaptive sliding controller synthesis for non-linear systems*", Int.J. Control, N°6,p.1631-1651, 1986.

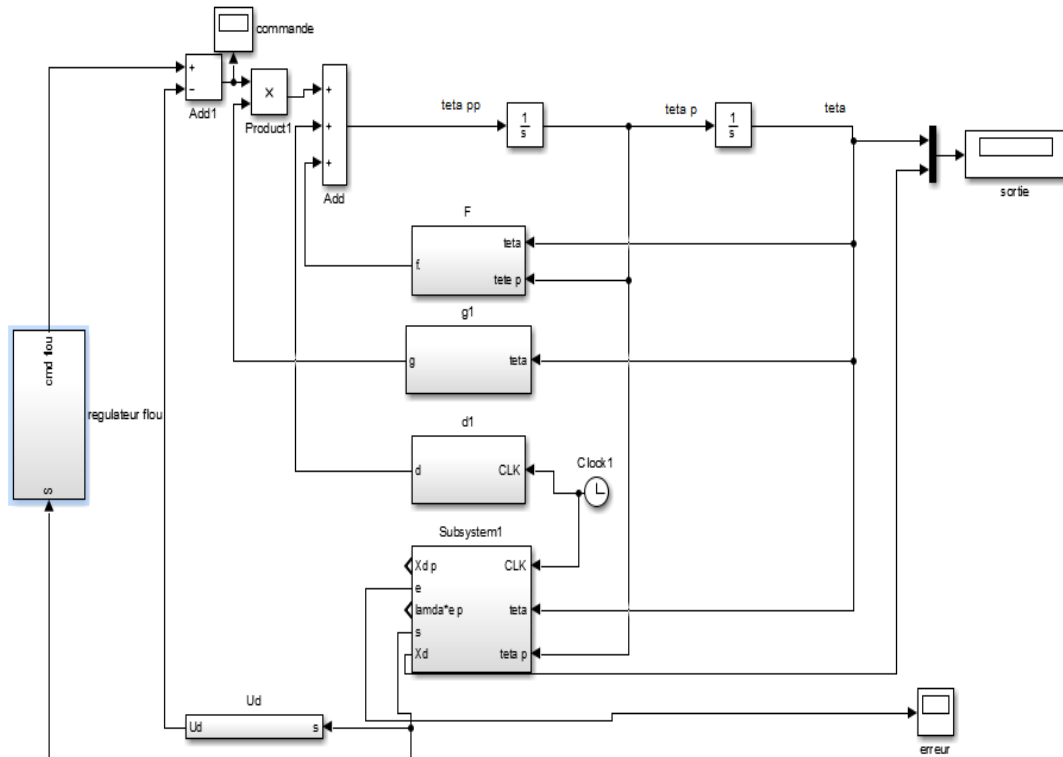
Bibliographie

- [22] Mohammed Chakib SOSSE ALAOUI, "*Commande et Observateur par Modes glissants d'un système de pompage et d'un bras manipulateur*", p6, 7, 2009.
- [23] J.J. Slotine and S.S. Sastry. "*Tracking control of nonlinear system using sliding surface, with application to robotic manipulators*". Int. Jour. of Cont., 38:465-492, 1983.
- [24] A. Dechoucha "*Commande par Mode de Glissement par Imposition des Pôles d'une Machine à Induction Linéarisée par orientation du Flux*" IEEE Trans. Indust. Applic. Vol.40, N°.1, pp45-55, 2005.
- [25] I. Bendaas, F. Nacéri, S. Belkacem, "*Improving Asynchronous Motor Speed and Flux Loop Control by Using Hybrid Fuzzy-SMC Controllers*", International Journal of Automation and Computing Vol. 11, No. 4, pp. 361-367, August 2014.
- [26] Slotine, J.-J. E., & Li, W. "*Applied Nonlinear Control*". London: Prentice-Hall, Inc. 1991.
- [27] Commande Neuro- Floue Mode Glissant, - Rahmani Yacine, Ferhi Brahim, univercity kasdi merbah ouargla-2013
- .

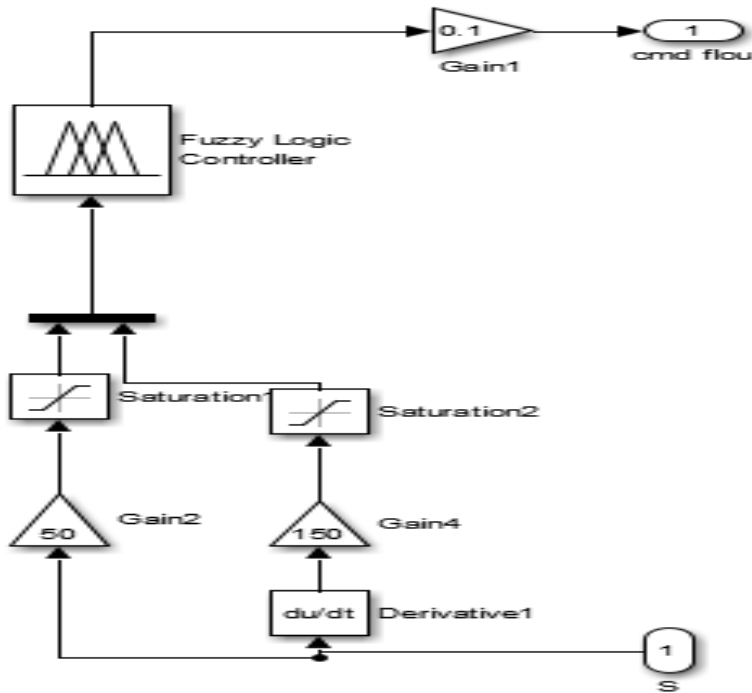
A-1-Pondule inverse par mode glissant



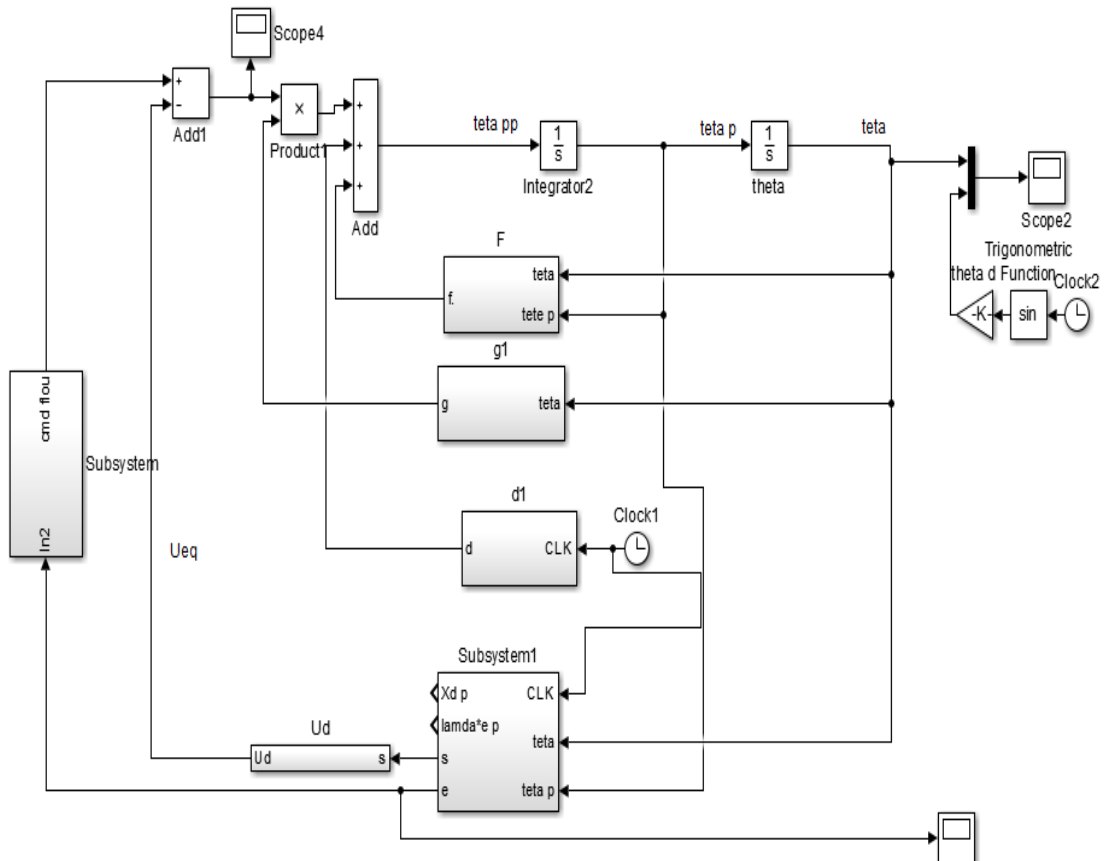
A-2-Pondule inverse par mode glissant-flou ($s; \dot{s}$)



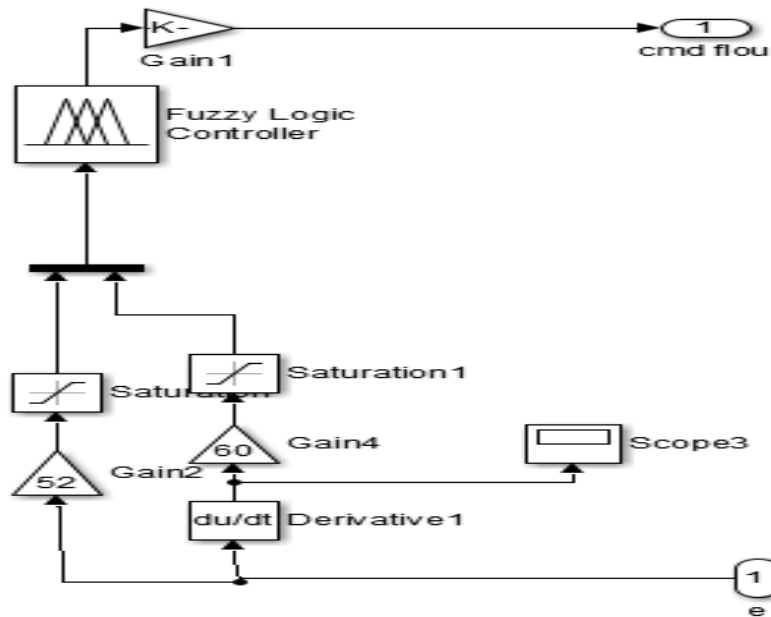
A-2-1-regulateur flou avec une entrée ($s; \dot{s}$)



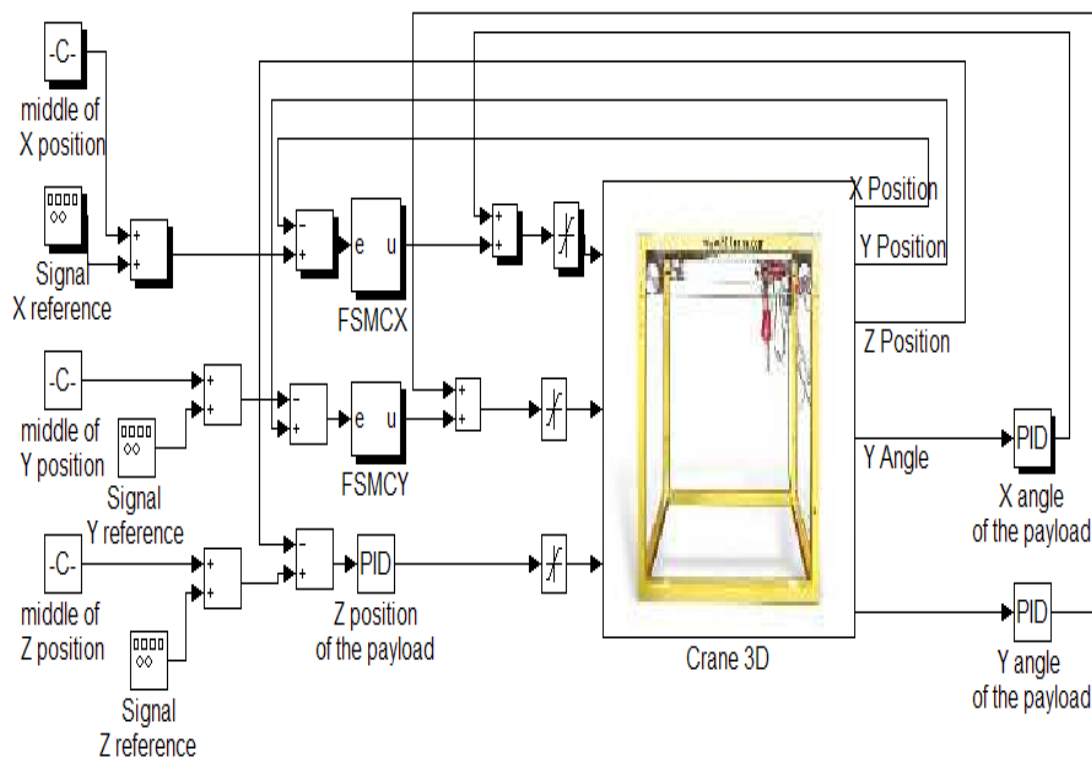
A-3- Pendule inverse par mode glissant-flou ($e; \dot{e}$).



A-3.1. Régulateur flou avec une entrée ($e; \dot{e}$).

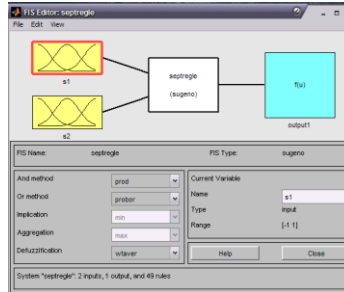


A-4-modoule simulation de système grue 3D.

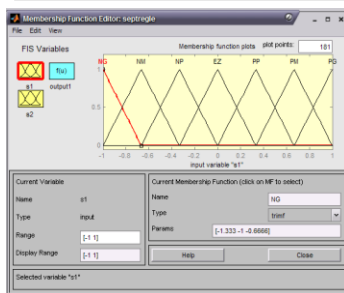


A-4-Synthèse des régulateurs par la logique floue.

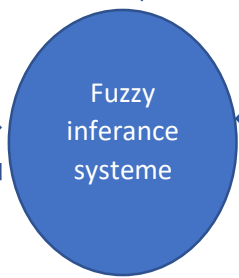
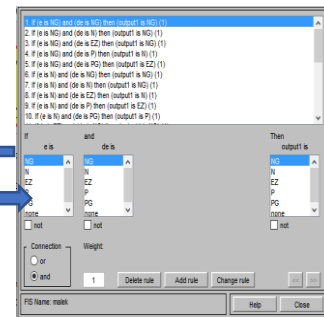
Interface du régulateur



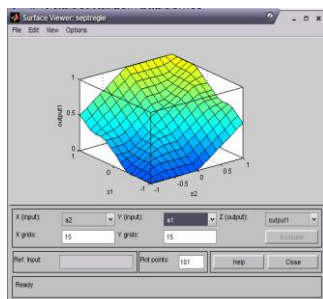
Fonction d'appartenance



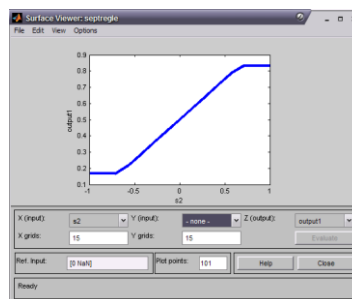
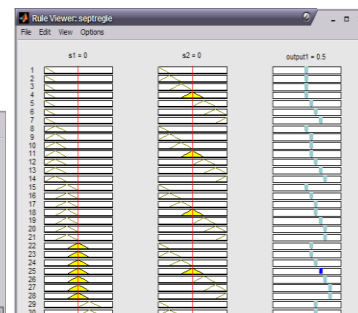
Règles floues



Visualisation d'un de lasurface



Visualisation de règles



Visualisation de la surface de la variation d'erreur

Etapas de conception d'un régulateur flou (RLF de type T-S)

المخلص

يهدف العمل المقدم في هذه الأطروحة للمساهمة في أساليب التحكم ومراقبة رافعة ثلاثية الأبعاد (5 درجات حرية). وفي هذا السياق تم وضع العديد من الخوارزميات وتنفيذها ، وقدمنا عرضاً موجزاً للتحكم الضبابي (النوع 1 والنوع 2) و التحكم عن طريق الوضع الانزلاقي ، لتحسين أداء الرافعة من خلال إنقاص تأرجح الكتلة قدر الإمكان، بإنشاء أسلوب جديد من الذكاء الاصطناعي : أكثر تحديداً عن طريق تقنية هجينة تجمع خاصية الوضع الانزلاقي و المنطق الضبابي (FSMC). للحد من ظاهرة التذبذب (chattering) في الوضع الانزلاقي والتحكم الأمثل للرافعة.

الكلمات المفتاحية:

المنطق الضبابي النوع -1، المنطق الضبابي النوع -2، الوضع الانزلاقي، التحكم الهجين ضبابي-انزلاقي-1، التحكم الهجين ضبابي-انزلاقي-2، رافعة ثلاثية الأبعاد.

Résumé

Le travail présenté dans cette mémoire a pour objectif d'apporter une contribution aux méthodes de commande d'une grue 3D (5degree liberté). Dans ce contexte, plusieurs théorèmes ont été développés et implémentés, on présenter rapidement la command floue (type 1 et type 2) et la commande par mode glissant. Afin de éliminé les balancements de la masse, de nouvelles technique de l'intelligence artificielle sont proposées : il s'agit plus précisément de la techniques hybrides mode glissant-floue pour éliminer le phénomène de chattering qui caractérise le mode glissant, et concevoir une commande performante de la grue.

Mots Clés :

Logique floue type-1, logique floue type-2, mode glissant, commande hybride mode glissant-flou-1, commande hybride mode glissant-flou-2, grue 3D

Abstract

The work presented in this memory to contribute in the methods of controlling 3D crane, (5 degree of freedom), in this context, several algorithms have been developed and implemented. a brief presentation of the fuzzy logic (type 1 and type 2) and sliding mode control for decrement vibration (sway) of the masse, new techniques of artificial intelligence are proposed: it is more specifically about the hybrid fuzzy sliding-mode to ensure the reduction of the chattering phenomenon in in sliding mode, and a better controlling of the crane.

Keywords: fuzzy logic type-1, fuzzy logic type-2, sliding mode, hybrid fuzzy sliding-mode-1, hybrid fuzzy sliding-mode-2, 3D crane.



*Introduction
générale*



Conclusion
Générale

Chapitre I

LA LOGIQUE ET LA COMMANDE FLOUE

Chapitre II

**COMMANDE
HYBRIDE
GLISSANTE FLOUE**

Chapitre III

DISCUSSIONS EXPÉRIMENTAL ET SIMULATION



Bibliographie



Annexe