

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



UNIVERSITE DE M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

SPECIALITE : AUTOMATIQUE

THEME

**Méthodes de Commande non Linéaires Appliquées
au Système Hydraulique CE105 à Réservoirs
Couplés et au Bras Manipulateur**

Proposé et dirigé par :

- Mr. BOUGUERRA Abderrahmen

Présenté par :

- CHERRAT Nidhal

Année Universitaire : 2012/2013

N° d'ordre : 068

Remerciements

Je remercie Dieu, le tout puissant, pour m'avoir donné, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaires, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, qui se sont hissés au travers de mon chemin, durant toutes mes années d'études.

Je adresse mes sincères remerciements à tous mes enseignants de gène électrique de L'université de M'sila, notamment à mon promoteur Mr. Abderrahmen BOUGUERRA, d'avoir proposé le sujet sur lequel j'ai travaillé, et qui a assuré la direction et l'encadrement du travail présenté dans ce mémoire.

Je tiens notamment, à adresser l'expression de ma sincère reconnaissance aux membres du jury d'examen, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Cette page ne serait être complète sans remercier mes meilleurs collègues et frères : B. Imad Eddine, B. Bilal, M. Imad, CH. Abdeanacer, A.youcef sans leurs soutiens je n'aurais sûrement pas pu mener à bien ce mémoire.

Enfin, mes remerciements vont à tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin à réussir ce travail.

Mes vives salutations.

Dédicace

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A mes frères

A mes chers amis

A tous les amis d'études surtout ceux de gène électrique promotion 2013

Introduction générale	1
I Aspects théoriques de la commande à structure variable	3
I.1 Introduction	3
I.2 Principe de la commande par mode de glissement.....	3
I.2.1 Régime glissant idéal.....	4
I.2.2 Régime glissant réel.....	4
I.3 Choix des surfaces de glissement	5
I.4 Conditions d'existence de la convergence	6
I.5 Méthodes de synthèse classiques de la commande	6
I.5.1 Méthodes de Philipov	7
I.5.2 Méthode d'Utkin (méthode de la commande équivalente).....	8
I.6 Le phénomène du Chatterings	9
I.6.1 La proposition de Slotine.....	9
I.6.2 La proposition de Harshima.....	10
I.7 Différentes structures du contrôle par mode de glissement.....	11
I.7.1 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande.....	11
I.7.2 Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état.....	11
I.7.3 Structure de régulation par ajout de la commande équivalente.....	12
I.8 Conclusion	12
II Modélisation et commande du robot PUMA 560 et réservoirs couplés.....	11
II.1 Introduction	11
II.2 Modélisation du robot PUMA 560.....	11
II.3 Mode de glissement avec de surface de glissement non linéaire	11
II.4 La surface de glissement non linéaire proposée.....	11
II.5 Commande du robot PUMA 560	11
II.5.1 La synthèse de la loi de commande.....	17
II.5.2 Résultats de simulation.....	20
II.5.3 Commentaires sur les résultats	25
II.6 Modélisation du système hydraulique CE105 à réservoirs couplés	25
II.6.1 Description du matériel	25
II.6.2 Modélisation du CE105.....	26

II.6.3	Détermination des caractéristiques de la pompe et des capteurs.....	27
II.6.4	Procédure de calcul K_Q et K_h	28
II.7	La commande VSC appliquée au système <i>CE105</i>	30
II.7.1	La synthèse de la loi de commande.....	31
II.7.2	Résultats de simulation.....	33
II.7.3	Commentaires sur les résultats.....	37
II.8	Conclusion.....	37
III	Mode de glissement et commande neuro-floue	38
III.1	Introduction.....	38
III.2	Introduction à la logique floue.....	38
III.2.1	Ensembles flous.....	39
III.2.2	Variables linguistiques.....	40
III.2.3	Opérateurs de la logique floue.....	40
III.2.3.1	L'opérateur ET.....	40
III.2.3.2	L'opérateur OU.....	40
III.2.3.3	L'opérateur NON.....	41
III.2.4	Présentation d'un régulateur par logique floue.....	41
III.2.5	Eléments de base d'un contrôleur a logique floue.....	41
III.2.5.1	Interface de fuzzification.....	42
III.2.5.2	Base de connaissance.....	42
III.2.5.3	Logique de prise de décision (Inférence).....	42
III.2.5.4	Agrégation.....	42
III.2.5.5	Interface de défuzzification.....	42
III.2.6	Propriétés d'un réglage par logique floue.....	43
III.3	Les réseaux de neurones.....	43
III.3.1	Introduction.....	43
III.3.2	Principe et définition.....	44
III.3.3	L'architecture d'un réseau.....	44
III.3.3.1	Réseaux statiques ou multicouches.....	44
III.3.3.2	Réseaux dynamiques ou récurrents.....	45
III.3.3.3	Réseaux topologiques.....	45

III.3.4	Apprentissage et adaptation	45
III.4	La logique floue dans la commande à structure variable.....	46
III.4.1	Synthèse de la commande hybride floue-glissante	46
III.4.2	Résultant de simulation.....	49
III.5	Les réseaux de neurones dans la commande à structure variable.....	51
III.5.1	La commande équivalente et la dynamique inverse d'un système.....	51
III.5.2	Synthèse de la commande hybride Neuro-floue-glissante.....	53
III.5.3	Résultant de simulation.....	57
III.5.4	Commentaires sur les résultats.....	59
III.6	Conclusion	60
IV	Mode de glissement et commande backstepping	61
IV.1	Introduction.....	61
IV.2	Méthodes d'analyse de la stabilité des systèmes	61
IV.2.1	La stabilité locale par la méthode de linéarisation	61
IV.2.2	Méthode direct de Lyapunov	62
IV.2.2.1	Théorème de Lyapunov	62
IV.2.2.2	La synthèse de la commande par la méthode directe de Lyapunov.....	63
IV.3	Technique de la commande par backstepping.....	63
IV.4	Application au robot PUMA 560.....	66
IV.4.1	La synthèse de la loi de commande	67
IV.4.2	Commande glissante-backstepping.....	68
IV.4.2.1	Résultats de simulation	69
IV.4.2.2	Commentaires sur les résultats.....	73
IV.5	Conclusion.....	73
V	Etude comparative	74
V.1	Introduction.....	74
V.2	Etude comparative.....	74
	Conclusion générale	80
	Bibliographie	81
	Annexe.....	84

Table des figures

Figure I.1	Convergence du systeme glissant.....	3
Figure I.2	Fonction signe	4
Figure I.3	Glissement idéal	4
Figure I.4	Glissement réel.....	5
Figure I.5	Illustration de la résolution de philipov	7
Figure I.6	Commande equivalente	9
Figure I.7	Phénomène de réticence	9
Figure I.8	Fonction de saturation « sat ».....	10
Figure I.9	Fonction de saturation « cont »	10
Figure I.10	Regulation par commutation au niveau l'organe de commande	11
Figure I.11	Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état	12
Figure I.12	Structure de regulation par ajout de la commande equivalente	12
Figure II.1	Présentation du robot manipulateur PUMA 560.....	14
Figure II.2	Schéma bloc de la commande VSC avec des surfaces non lineaires appliquee au robot manipulateur PUMA 560.....	19
Figure II.3	Trajectoire cycloïdale.....	20
Figure II.4	Commandes équivalentes de la commande VSC appliquée au bras manipulateur.....	21
Figure II.5	Positions articulaires et erreurs de poursuite de la commande VSC pour un test à vide...22	
Figure II.6	Surfaces de glissement et commandes effectives pour un test à vide.....	23
Figure II.7	Résultats de simulation de la commande VSC appliquée au robot PUMA 560 pour un test en charge.....	24
Figure II.8	Présentation du système hydraulique CE105 à réservoirs couplés	26
Figure II.9	Systeme hydraulique CE105 a reservoirs couples	26
Figure II.10	Caracteristiques de la pompe et des capteurs de niveau	27
Figure II.11	Variation du débit en fonction de la tension d'alimentation de la pompe	30
Figure II.12	La tension indiquée par le capteur en fonction du niveau du liquide	30
Figure II.13	Schema bloc de la commande par mode de glissement.....	33
Figure II.14	Signal de référence choisie	34
Figure II.15	Variation du coefficient de decharge 0 a de la valve C	34

Figure II.16	Résultats de simulation de la commande VSC appliquée au système CE105	35
Figure II.17	Résultats de simulation de la commande VSC avec un test de robustesse	36
Figure III.1	Exemple de fonction d'appartenance (a) logique classique (b) logique floue	40
Figure III.2	Représentation d'une variable linguistique	40
Figure III.3	Schéma synoptique général d'un contrôleur flou	41
Figure III.4	Représentation d'un neurone	44
Figure III.5	Architecture d'un réseau multicouche à interconnexion totale	45
Figure III.6	Schéma bloc de la commande hybride «floue-glissante»	46
Figure III.7	Partition floue de l'espace autour de la surface de glissement	47
Figure III.8	Fonctions d'appartenance de l'entrée et de sortie	47
Figure III.9	Résultats de simulation de la commande neuro-floue-glissante appliquée au système CE105	59
Figure III.10	Résultats de simulation de la commande floue-glissante avec un test de robustesse	50
Figure III.11	La commande équivalente et la dynamique inverse du système	53
Figure III.12	Schéma bloc de la commande neuro-floue-glissante appliquée au système CE105	54
Figure III.13	Réseau de neurones utilisé pour calculer la commande équivalente pour le système CE105	55
Figure III.14	Résultats de simulation pour la commande neuro-floue-glissante appliquée au système CE105	58
Figure III.15	Résultats de simulation pour la commande neuro-floue-glissante appliquée au système CE 105 avec test de robustesse	59
Figure IV.1	Interprétation géométrique du théorème de Lyapunov	63
Figure IV.2	Schéma bloc de la commande glissante-backstepping appliquée au bras manipulateur ..	69
Figure IV.3	Positions articulaires et erreurs de poursuite de la commande glissante backstepping pour un test à vide	70
Figure IV.4	Surfaces de glissement et commandes effectives de la commande glissante Backstepping pour un test à vide	71
Figure IV.5	Positions articulaires de poursuite de la commande glissante backstepping pour un test à en charge	72
Figure IV.6	Commandes effectives de la commande glissante backstepping pour un test en charge ..	73
Figure V.1	Commande et erreur de la commande VSC avec une surface non linéaire appliquée au système CE105	75

Figure V.2	Commande et erreur de la commande floue-glissante appliquee au systeme CE105	76
Figure V.3	Commande et erreur de la commande neuro- floue-glissante appliquee au système CE 105.....	76
Figure V.4	Commandes et erreurs de la commande vsc avec des surfaces non lineaires appliquée au robot PUMA 560	77
Figure V.5	Commandes et erreurs de la commande glissante-backstepping appliquée au robot PUMA 560	78

Liste des tableaux

Tableau II.1	Les fonctions non lineaires du type sigmoïde utilisees	17
Tableau II.2	La relation entre la tension d'alimentation et le débit d'entrée.....	29
Tableau II.3	La relation entre la tension indiquée par le capteur et le niveau dans le réservoir.....	29
Tableau V.1	Etude comparative entre les commandes développées pour le robot PUMA 560	74
Tableau V.2	Etude comparative entre les commandes développées pour système CE105	75

Variables

ci	Paramètres de design pour le backstepping
D	Domaine d'intérêt
∂	Dérivée partielle
e	Erreur de poursuite
s	Surface de glissement
t	Variable temps
u	Variable manipulée (Commande)
V	Fonction de Lyapunov
x	Variable d'état
x_e	Position d'équilibre
x_d	Etat désiré
y	Variable de sortie
y_d	Trajectoire de référence
z	Variable d'erreur dans le backstepping

Introduction Générale

La plupart des méthodes de synthèse de lois de commande se basent sur un modèle mathématique du système à commander. Certaines de ces techniques exigent une très bonne connaissance du modèle, sous peine de dégradation importante des performances, voire de perte de stabilité. Or, les systèmes réels ont très souvent un comportement différent des modèles mathématiques, à cause de variations de paramètres, de phénomènes physiques négligés, de perturbations extérieures, . . . Et même lorsque l'on a un très bon modèle à disposition, il arrive fréquemment qu'il soit trop complexe, et doive être simplifié pour pouvoir synthétiser une commande. Un remède consiste à calculer la loi de commande pour une famille de modèles à laquelle le système réel est censé appartenir. Cet ensemble est généralement constitué d'un système nominal et de variations limitées de paramètres de ce modèle, appelées incertitudes. Une telle famille est appelée modèle incertain. Si la loi de commande est synthétisée de manière à répondre aux exigences du cahier des charges pour tous les modèles de cette famille, elle est dite robuste.

Un type de lois de commande robuste simple à calculer et à mettre en œuvre, même pour des systèmes non linéaires, est la commande par modes glissants [1]. Elle a fait l'objet d'études détaillées au cours des trente dernières années [28-84], aussi bien par les chercheurs soviétiques, que par les chercheurs des autres pays. La discussion qui a eu lieu en 1960 entre Neimark et Philipov a été concluante dans la mesure où un nouveau problème sur la théorie des modes glissants a été posé.

La technique de commande par mode de glissement consiste à amener 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 autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre, d'où le phénomène de glissement.

Les systèmes de contrôle à structure variable (VSC) (ou par mode de glissement (SMC)) sont des systèmes de commande non linéaires discontinus où la structure du contrôleur varie entre deux structures, la commutation d'une valeur à l'autre se fait suivant le signe d'un hyperplan de l'espace d'état du système de façon à forcer le point représentatif de son mouvement à rester sur cet hyperplan d'où le nom de régime glissant idéal, ceci dans le but d'obtenir une meilleure stabilité et précision que celles obtenues généralement avec les régulateurs classiques [2].

Motivation de la recherche

La commande à structure variable est un sujet qui a attiré l'attention de plusieurs chercheurs depuis longtemps. Le principe de cette technique de commande est de forcer la dynamique du système à suivre, au mieux, une dynamique désirée, imposée par des systèmes autonomes stables, ce qu'on appelle les surfaces de glissement. Dans la littérature, les surfaces de glissement se trouvent comme des systèmes autonomes stables et souvent linéaires.

Dans la commande à structure variable, la commande par mode de glissement avec l'ajout de la commande équivalente est considérée comme une commande complète. Celle-ci contient un terme continu (commande équivalente) pour pré-positionner l'état futur de système et un terme discontinu de hautes fréquences (commande discontinue) pour assurer l'attractivité de la surface et la compensation

des erreurs de modélisation, et aussi pour réduire l'effet des perturbations exogènes. En effet, la commande discontinue donne naissance à une dynamique parasite appelée communément "chattering". Celle-ci se caractérise par des oscillations persistantes de hautes fréquences [3].ci se caractérise par des oscillations persistantes de hautes fréquences. Plusieurs techniques ont alors été proposées pour réduire ou éliminer ce phénomène. Les solutions par limitation de la condition de glissement sont les plus utilisées dans les applications en temps réel. Les différents points motivants notre recherche sont, principalement, les suivants :

- 1) Synthétiser des surfaces de glissement non linéaires stables, en se basant sur le critère de stabilité au sens de Lyapunov
- 2) Utiliser les outils de l'intelligence artificielle, notamment la logique floue et les réseaux de neurones pour remédier aux problèmes de la commande à structure variable classique. Ainsi, pour résoudre le problème de "broutement" dû au terme de correction, on fait appel à la logique floue. Pareillement, en utilisant les réseaux de neurones pour calculer la commande équivalente.
- 3) Faire appel à la commande récursive "backstepping" pour trouver une méthode systématique pour synthétiser les surfaces de glissement.

Organisation de la thèse

Cette thèse présente des résultats sur des commandes par modes glissants appliquées au robot manipulateur *PUMA 560* et au système hydraulique à réservoirs couplés *CE105*. Elle est constituée de cinq chapitres organisés de la façon suivante :

- La première partie, est consacré à des rappels de notions de base sur la théorie de la commande par mode de glissement Il y est discuté des conditions d'existence de tels phénomènes, des dynamiques en régime de glissement, et également de leur principal inconvénient : la réticence.
- Dans le deuxième chapitre, nous proposons des surfaces de glissement non linéaires du premier ordre et nous présentons la modélisation du robot manipulateur *PUMA 560* et le système hydraulique *CE105*. Ensuite, nous nous intéressons à la synthèse des lois de commande glissantes en utilisant les surfaces de glissement proposées. En premier temps, nous mettons en évidence la synthèse d'une loi de commande glissante, pour commander en poursuite des trajectoires du robot manipulateur *PUMA 560*, ensuite nous présentons la synthèse d'une loi de commande pour le système hydraulique à réservoirs couplés *CE105*.
- La troisième partie est consacrée à la commande glissante combinée avec les outils de l'intelligence artificielle. Après avoir présenté les fondements théoriques de la logique floue et le réseau de neurones, Ainsi, pour résoudre le problème de "broutement" dû au terme de correction, on fait appel à la logique floue. Pareillement, en utilisant les réseaux de neurones pour calculer la commande équivalente.
- Faire appel à la commande récursive "backstepping" pour trouver une méthode systématique pour synthétiser les surfaces de glissement.

I. ASPECTS THEORIQUES DE LA COMMANDE A STRUCTURE VARIABLE

I.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à une présentation générale et succincte de la commande à structure variable et de ses performances associées et pour but de fournir les éléments fondamentaux du formalisme de cette commande.

Une première partie présente le principe de cette commande à structure variable (CSV) fonctionnant en mode de glissement et les concepts de base de cette commande : la surface de glissement et les conditions d'existence de la convergence permettent à la dynamique du système, dans le plan de phase, de converger vers la surface de glissement. La deuxième partie nous allons présenter méthodes de synthèse classiques de la commande.

La dernière partie présente un des problèmes majeurs de la commande par modes glissants : le chattering, et les méthodes classiques permettant d'en réduire les effets.

Et finalement, nous présenterons les différentes structures de contrôle par modes glissants.

Dans un souci de clarté, les systèmes considérés ici seront non linéaires, continus, mono-entrée mono-sortie (SISO) et affines en la commande. Cependant, tous les résultats présentés peuvent être étendus aux systèmes de la forme $\dot{x} = f(x, u)$ où $u \in R^m$ [1,4].

I.2. Principe de la commande par mode de glissement

La commande par mode de glissement consiste à ramener la trajectoire d'état de système boucle vers un surface de glissement et la faire de comète autour de cette surface jusqu'à point d'équilibre [9] en résumé, La conception de la commande par mode glissant revient principalement à déterminer trois étapes (voir Figure I.1) :

- 1- Choix de la surface de commutation.
- 2- Condition de convergence.
- 3- Calcul de commande [5,6].

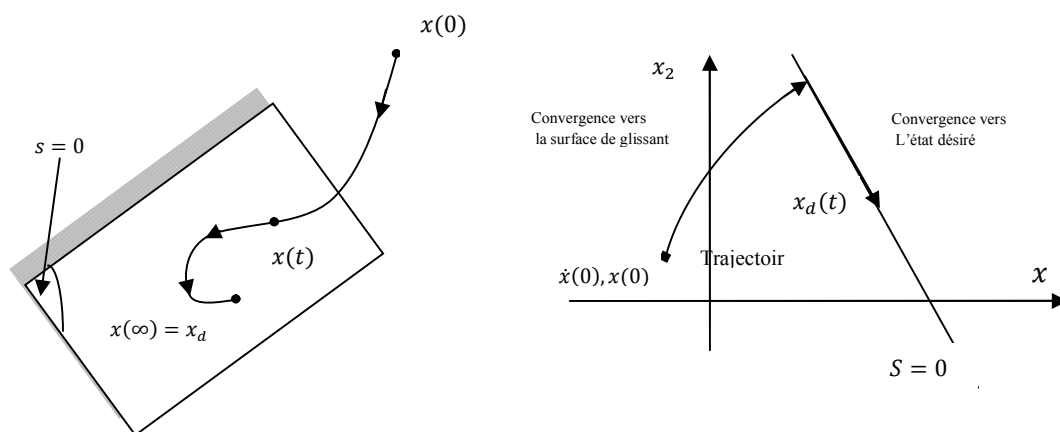


Figure I. 1. Convergence du système glissant

Les deux composants de la commande sont :

$$u = u_{eq} + u_{glis} \quad (\text{I. 1})$$

u_{eq} : La commande équivalente ou nominale est déterminée par le modèle du système, dans ce cas il s'agit d'un modèle en immersion linéaire ou non linéaire. Cette partie est conçue avec la méthode de la commande équivalente, dont le principe est basé sur la détermination du comportement du système lorsqu'il est sur la surface de glissement s .

u_{glis} : Le glissement est utile pour compenser les incertitudes du modèle. Il est constitué de la fonction signe "sign" de la surface de glissement s , multipliée par une constante k_{glis} . La surface de glissement est définie dans l'espace d'état des erreurs afin de garantir la convergence des états [2].

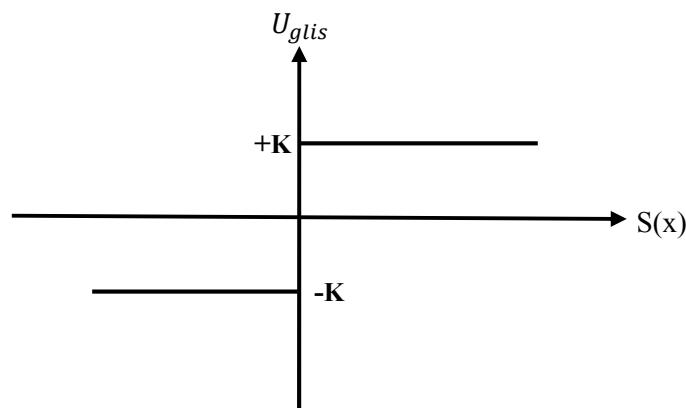


Figure .1.2 Fonction signe

I.2.1. Régime glissant idéal

En théorie l'organe de commutation est supposé insensible aux bruits, et la trajectoire en régime glissant décrit parfaitement l'équation $S(x) = 0$. Le régime glissant idéal à une oscillation de fréquence infinie et d'amplitude nulle, le point représentatif de l'évolution du système glisse parfaitement sur l'hypersurface de commutation s .

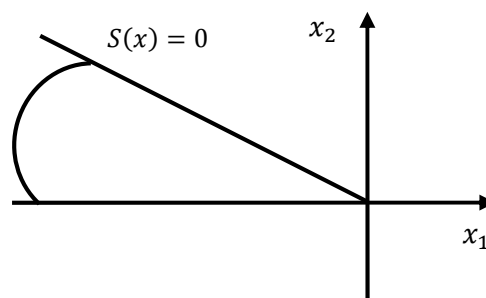


Figure I.3. Glissement idéal

I.2.2. Régime glissant réel

En pratique l'organe de commutation est réalisé à partir de relais qui présentent des imperfections comme les retards de commutations, dans ce cas la trajectoire de phase du régime glissant reste au

voisinage de la surface de commutation donnant naissance à des oscillations indésirables qui éliminent la précision du système et néanmoins sa stabilité.

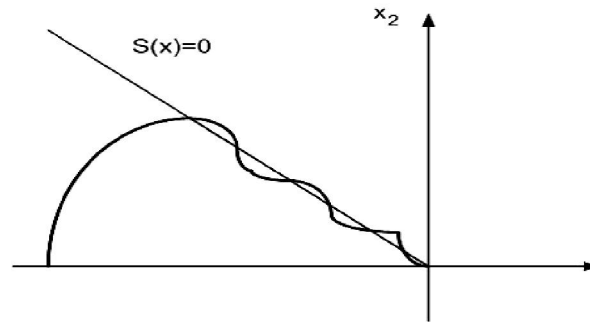


Figure I.4. Glissement réel

I.3. Choix des surfaces de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne le nombre nécessaire ainsi que la forme, en fonction de l'application et de l'objectif visé. En général, pour un système défini par l'équation d'état suivante :

$$\dot{x}(t) = f(x) + g(x)u \quad (\text{I. 2})$$

Il faut choisir " m " surfaces de glissement, pour un vecteur u de dimension " m ".

Pour ce qui est de la forme générale, nous proposons une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable d'état X vers sa valeur de consigne X_{ref} .

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda_x \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{I. 3})$$

Avec :

x : variable à réguler,

$e(x)$: l'écart de la variable à réguler,

λ_x : constante positive,

r : degré relatif c'est le plus petit entier positif tel que : $\frac{\delta s}{\delta u} \neq 0$,

$\frac{\delta s}{\delta u} \neq 0$: assure le commanditaire.

Pour :

$$r = 1 : S(x) = e(x).$$

$$r = 2 : S(x) = \lambda_x e(x) + \dot{e}(x).$$

$$r = 3 : S(x) = \lambda_x^2 e(x) + \lambda_x \dot{e}(x) + \ddot{e}(x).$$

$S(x) = 0$ est une équation différentielle linéaire autonome dont la réponse $e(x)$ tend vers zéro pour un choix correcte du gain λ_x .

I.4. Conditions d'existence de la convergence

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 :

- **La condition directe de commutation**

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

$$s(x) \cdot \dot{s}(x) < 0 \quad (\text{I. 4})$$

- **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 $\dot{V} < 0$.

En définissant la fonction de Lyapunov :

$$v(x) = \frac{S^2(x)}{2} \quad (\text{I. 5})$$

Sa dérivée sera :

$$\dot{v}(x) = s(x) \cdot \dot{s}(x) \quad (\text{I. 6})$$

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

$$\dot{v}(x) = s(x) \cdot \dot{s}(x) < 0 \quad (\text{I. 7})$$

Elle est utilisée pour estimer les performances de la commande, l'étude de robustesse et garantit la stabilité du système non linéaire [7].

I.5. Méthodes de synthèse classiques de la commande

Dans ce qui suit, nous allons présenter deux expressions équivalentes pour la détermination de l'état $x(t)$, qui est la solution du système en mode de glissement.

La commande u est construite de façon à ce que les trajectoires du système soient amenées vers la surface de glissement et soient ensuite maintenues dans un voisinage de celle-ci.

u est une loi de commande à structure variable définie comme suit :

$$\begin{cases} u^+(x) & \text{Si } s(t, x) > 0 \\ & , u^+ \neq u^- \\ u^-(x) & \text{Si } s(t, x) < 0 \end{cases} \quad (\text{I. 8})$$

u^+ et u^- étant des fonctions continues. Il est à noter que le caractère discontinu de la loi de commande qui permet d'obtenir une convergence en temps fini sur la surface ainsi que des propriétés de robustesse vis-à-vis de certaine perturbation.

I.5.1. Méthodes de Philipov

L'approche de Philipov est l'une des premières approches. Cette méthode est basée sur les résultats des travaux effectués par ce chercheur sur les équations différentielles à second membre discontinu.

Considérons le système non linéaire suivant :

$$\dot{x}(t) = f(x) + g(x)u \quad (\text{I.9})$$

Avec la stratégie de commande suivante :

$$\begin{cases} u^+(x) & \text{Si } s(t, x) > 0 \\ u^-(x) & \text{Si } s(t, x) < 0 \end{cases} \quad (\text{I.10})$$

On peut montrer à partir des travaux de Philipov que les trajectoires d'états (I.7) et (I.8) à $s(x) = 0$ sont les solutions de l'équation :

$$\dot{x} = \alpha f^+ + (1 - \alpha) f^- = f^0 \quad \text{avec } 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (\text{I.11})$$

Où $f^+ = f(x) + g(x)u^+$, $f^- = f(x) + g(x)u^-$ et f^0 est le vecteur de vitesse résultant de la trajectoire d'état et qui est tangentiel à la surface de glissement, il est obtenu par la moyenne géométrique comme le montre la figure suivante :

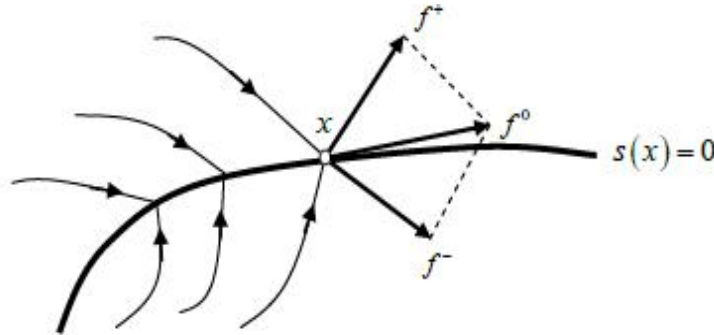


Figure I.5. Illustration de la résolution de Philipov

En mode de glissement : $s(x) = 0$, en dérivant cette relation par rapport au temps, on aura :

$$\frac{\delta s(x)}{\delta t} = \left(\frac{\delta s}{\delta x} \right)^T f^0 \frac{\delta s}{\delta t} = \langle \nabla s, f^0 \rangle + \frac{\delta s}{\delta t} = 0 \quad (\text{I.12})$$

D'où

$$\alpha = \frac{\langle \nabla s, f^- \rangle + \frac{\delta s}{\delta t}}{\langle \nabla s, f^- - f^+ \rangle} \quad (\text{I.13})$$

Avec ∇s est le gradient de s , $\langle \cdot, \cdot \rangle$ est le produit scalaire.

En utilisant l'expression de α dans (I.11), l'équation caractérisant la trajectoire d'état du système est:

$$\frac{dx}{dt} = \left[\frac{\langle \nabla s, f^- \rangle + \frac{\delta s}{\delta t}}{\langle \nabla s, f^- - f^+ \rangle} \right] f^+ - \left[\frac{\langle \nabla s, f^+ \rangle + \frac{\delta s}{\delta t}}{\langle \nabla s, f^- - f^+ \rangle} \right] f^- = f^0 \quad (\text{I.14})$$

La méthode de Philipov est l'une des possibilités permettant la détermination de la trajectoire d'état en mode de glissement, une autre méthode, appelée méthode de la commande équivalente, a été proposée par Utkin.

I.5.2. Méthode d'Utkin (méthode de la commande équivalente)

La méthode de la commande équivalente est un moyen pour déterminer le mouvement sur la surface de glissement. Soit le système donné par :

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (\text{I.15})$$

En régime de glissement

$$\begin{cases} s(x) = 0 \\ \dot{x} = \frac{\delta s}{\delta t} = \left(\frac{\delta s}{\delta x} \right)^T \left(\frac{dx}{dt} \right) + \frac{\delta s}{\delta t} = \left(\frac{\delta s}{\delta t} \right)^T (f(x) + g(x)u_{eq}) + \frac{\delta s}{\delta t} = 0 \end{cases} \quad (\text{I.16})$$

Où u_{eq} est la commande équivalente. Elle est donc définie par l'équation suivante

$$u_{eq} = - \left(\left(\frac{\delta s}{\delta x} \right)^T g(x) \right)^{-1} \left(\left(\frac{\delta s}{\delta x} \right)^T f(x) + \frac{\delta s}{\delta t} \right), \text{ tel que } : \left(\frac{\delta s}{\delta x} \right)^T g(x) \neq 0 \quad (\text{I.17})$$

En remplaçant l'expression u_{eq} de dans (I.15), on obtient la trajectoire d'état en mode de glissement

$$\frac{dx}{dt} = f(x) - g(x) \left(\left(\frac{\delta s}{\delta x} \right)^T g(x) \right)^{-1} \left(\left(\frac{\delta s}{\delta x} \right)^T f(x) + \frac{\delta s}{\delta t} \right) \quad (\text{I.18})$$

La commande équivalente peut être interprétée comme la valeur moyenne que prend la grandeur de commande discontinue lors de la commutation rapide entre u_{max} et u_{min} et comme il est représenté sur la figure (I.6) [2].

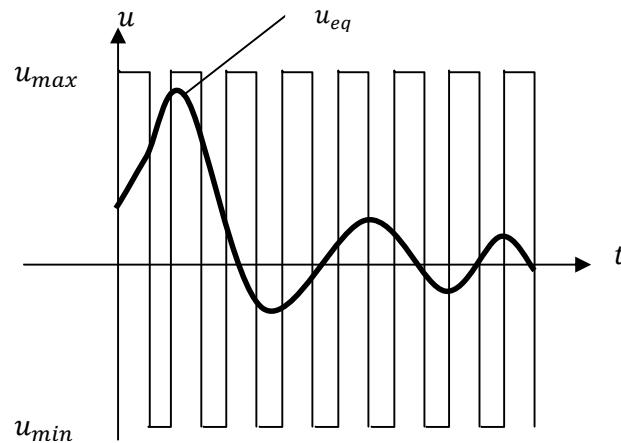


Figure I.6. Commande équivalente

I.6. Le phénomène du Chatterings

Dans une commande à structure variable, la commande discontinue nécessite une haute activité (commutations infiniment rapides) pour compenser la dynamique non modélisée. En pratique, cette commutation n'est pas instantanée et la commande n'est ainsi pas aussi rapide qu'il est exigé, à cause du temps mis dans le calcul de la commande et les limitations technologiques des dispositifs de commutation. De plus, la valeur de $S(x)$ n'est pas connue avec une précision infinie. Cette limite sur la rapidité de commutation conduit à l'apparition d'oscillations indésirables de haute fréquence (couramment appelées chatterings) autour de la surface de glissement [8].

Plusieurs techniques ont alors été proposées pour réduire ou éliminer ce phénomène. Les solutions par limitation de la condition de glissement sont les plus utilisées dans les applications en temps réel.

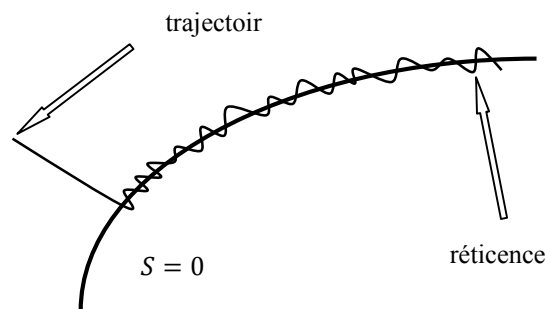


Figure I.7. Phénomène de réticence

Dans cette section nous allons décrire les techniques de limitation de la condition de glissement. Ces techniques sont basées sur la définition d'une zone autour de la surface s , à l'intérieur de laquelle une condition de glissement moins stricte que la condition *signe* est appliquée. Ainsi, le terme $sign(s)$ dans la partie du glissement de la commande est souvent remplacé par un terme à variation plus douce, par exemple [4] :

I.6.1. La proposition de Slotine

Elle consiste à approximer la commande discontinue par une loi continue au voisinage de la surface, cette fonction a le nom « *sat* ». Dans ce cas la commande devient :

$$u = -ksat(s) \quad (\text{I.19})$$

La fonction « *sat* » est donnée par :

$$sat(s) = \begin{cases} \frac{s}{k} & \text{si } |s| \leq \Phi \\ sign(s) & \text{si } |s| > \Phi \end{cases} \quad (\text{I.20})$$

Qui peut être illustrée par la figure (I.8).

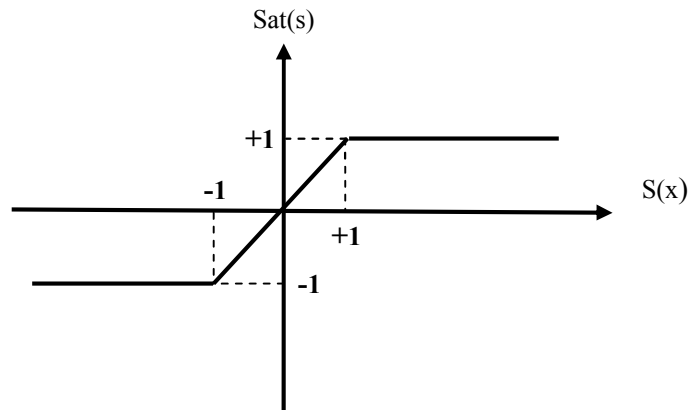


Figure I.8. Fonction de saturation « *sat* »

I.6.2. La proposition de Harshima

Dans celle-ci, la fonction signe est remplacée par une fonction de lissage appelée « *cont* ».

Dans ce cas la commande devient : [2]

$$u = -kcont(s) \quad (\text{I.21})$$

Tel que :

$$cont(s) = \begin{cases} \frac{s}{|s| + \delta} & \text{si } |s| \leq \Phi \text{ avec } \delta > 0 \\ sign(s) & \text{si } |s| > \Phi \end{cases} \quad (\text{I.22})$$

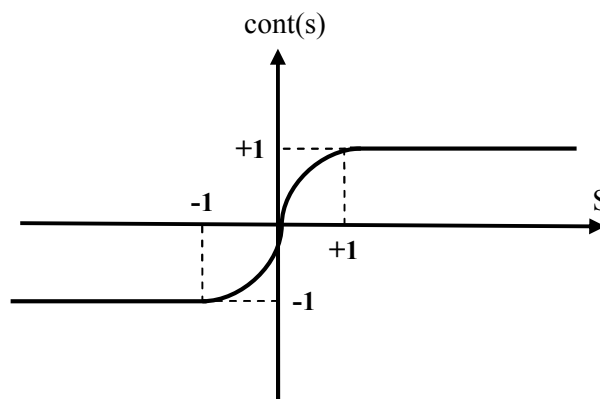


Figure I.9. Fonction de saturation « *cont* ».

I.7. Différentes structures du contrôle par mode de glissement

Dans les systèmes à structure variable utilisant la commande par mode de glissement, on peut trouver trois configurations de base pour la synthèse des différentes commandes. La première correspond à la structure la plus simple où la commutation a lieu au niveau de l'organe de commande lui-même. La deuxième structure fait intervenir la commutation au niveau d'une contre-réaction d'état. Et en fin, la dernière structure est une structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la " commande équivalente ".

I.7.1. Structure par commutation au niveau de l'organe de commande

Un système de réglage à structure variable avec changement de la structure par commutation au niveau de l'organe de commande peut être représenté par la Figure (I.10).

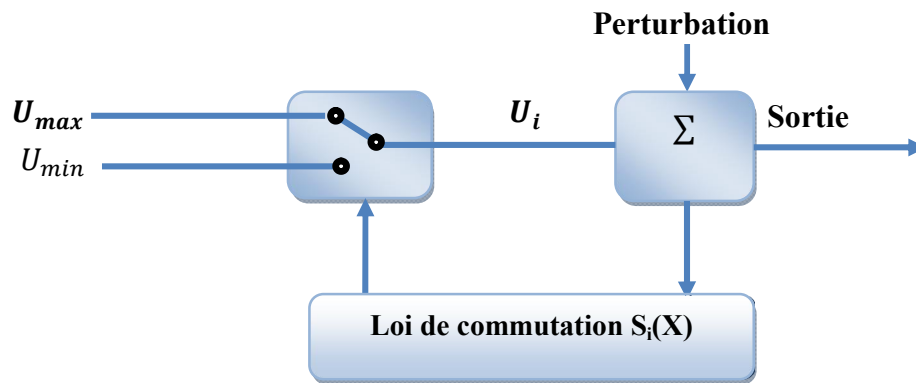


Figure I.10. Régulation par commutation au niveau de l'organe de commande

L'application du réglage par mode de glissement selon la configuration représentée nécessite, un organe de commande qui possède une action à deux positions avec une commutation très rapide d'une position à une autre. [9]

Elle a été utilisée pour la commande des moteurs pas-à-pas.

I.7.2. Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état

Le principe d'une telle commande est illustré dans la figure I.11, k_1 et k_2 représentent les gains de commutation, u_i la commande du système pour chaque gain et s_i la surface de commutation, $i= 1,2$.

Cette structure est la moins exigeante au niveau de la sollicitation de la commande. Elle a été mise en œuvre dans la commande de moteurs à courant continu et à aimants permanents, ainsi que dans la commande des machines à induction. Le réglage de la dynamique du système est réalisé par les gains de réglage. Le non linéarité provient de la commutation entre les gains donc on crée une commutation au niveau de la dynamique du système. [10]

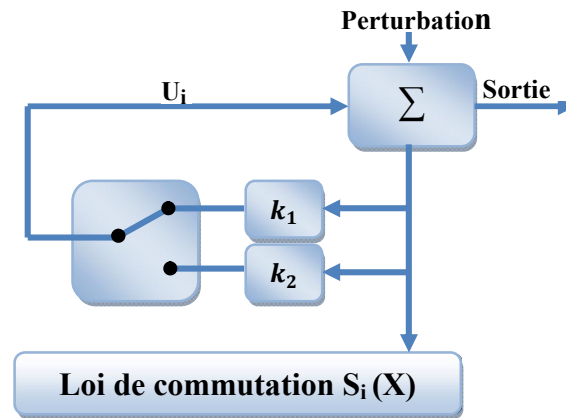


Figure I.11. Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état

I.7.3. Structure de régulation par ajout de la commande équivalente

Une telle structure dont le principe est montrée sur la figure I.12, présente un réel avantage. Elle permet de pré-positionner l'état futur du système grâce à la commande équivalente qui n'est rien d'autre que la valeur désirée du système en régime permanent.

L'organe de commande est beaucoup moins sollicité, mais on est plus dépendant des variations paramétriques du fait de l'expression de cette commande équivalente [10].

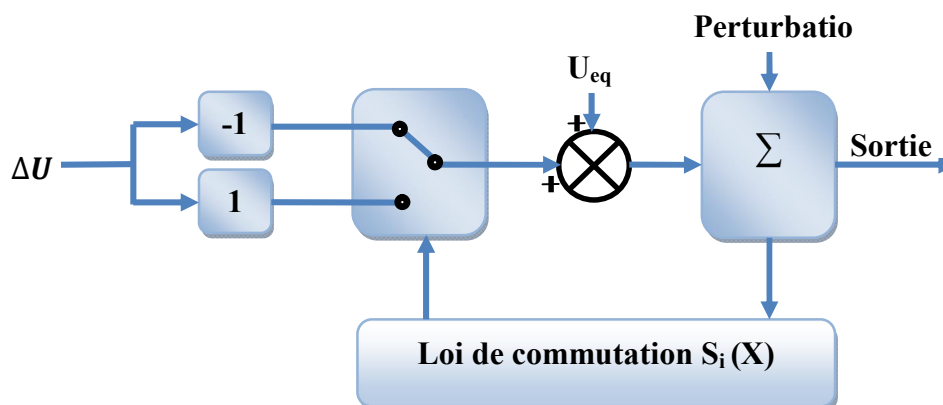


Figure I.12. Structure de régulation par ajout de la commande équivalente

I.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, il a été question de présenter les aspects théoriques concernant la commande par mode de glissement, d'où découlera les fondements de bases. Et défini Le phénomène du Chatterings et les solutions prises pour la diminution de son effet

Il nous semble en effet naturel d'ajouter la commande équivalente pour pré positionner le système dans un état désiré permanent et stable.

Dans le deuxième chapitre, on s'intéresse à l'application de la commande à structure variable, avec des surfaces de glissements non linéaires, sur un modèle du robot *PUMA 560* et en implantation pour le système hydraulique *CE105* à réservoirs couplés.

II. MODELISATION ET COMMANDE DU ROBOT PUMA 560 ET RESERVOIRS COUPLES

II.1. Introduction

Pour commander un robot ou pour simuler son comportement on doit disposer de modèles. Plusieurs niveaux de modélisation sont possibles selon les objectifs, les contraintes de la tâche et les performances recherchées : modèles géométriques, cinématiques et dynamiques. Ces modèles, qu'ils soient utilisés en simulation ou en commande [11].

La synthèse de la commande d'un bras manipulateur est généralement difficile. Cette difficulté provient soit du non linéarité de ses équations dynamiques et/ou le fort couplage entre eux. Ces problèmes deviennent de plus en plus difficiles à contourner par les algorithmes de commande classiques, à savoir : la commande à actions proportionnelles, intégrales et dérivées surtout lorsque les exigences de la dynamique du système bouclé sont trop strictes [4]. Pour de telles raisons, la commande par mode glissant caractérisée par l'avantage d'obtenir un tel comportement est double : d'un côté, on a une simplification du modèle dynamique du système : Problème de modélisation et d'autre part, le régime glissant est insensible aux perturbations intervenant dans les mêmes directions que les entrées (matching perturbations).

La technique du réglage par mode glissant a connu des développements importants dans tous les domaines de la commande. Dans le domaine des commandes hydraulique ou pneumatiques, il existe des valves fonctionnant par tout ou rien qui ne possèdent que deux états stables, ou complètement ouvertes ou fermées [3].

Ce chapitre, est consacré à la synthèse de la loi de commande par mode glissant ainsi qu'une présentation des résultats de simulation pour des systèmes non linéaires, nous pouvons utiliser des surfaces de glissement non linéaires. Dans une première partie nous avons choisi le modèle du robot manipulateur industriel du type *PUMA 560* à trois degrés de liberté et puis on applique la commande par mode glissement à modèle. Dans un deuxième temps, on s'intéresse à l'application de cette stratégie de commande sur le système hydraulique *CE105* à réservoirs couplés. Des résultats de simulation seront présentés pour les deux systèmes.

II.2. Modélisation du robot PUMA 560

Les équations dynamiques du mouvement d'un bras manipulateur, sont l'ensemble des équations mathématiques décrivant le comportement dynamique du manipulateur, de telles équations sont utilisées pour la simulation par ordinateur, du mouvement du bras manipulateur, ainsi que pour la conception d'une commande en vue de satisfaire les performances imposées.

Dans notre mémoire, nous calculons le modèle dynamique nécessaire à la commande d'un robot Manipulateur industriel du type *PUMA 560* (Figure II.1).

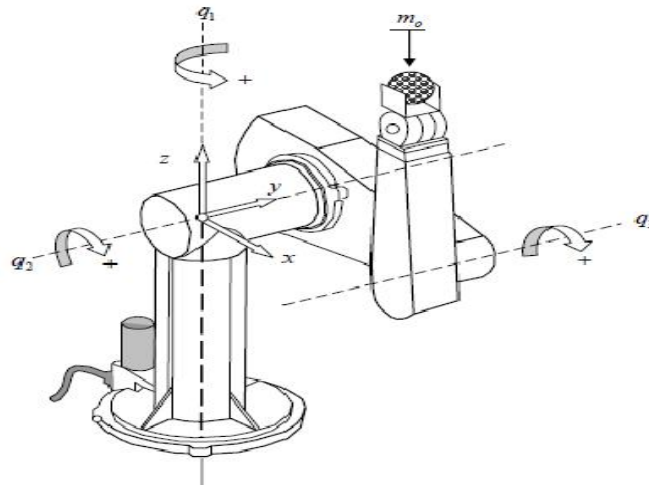


Figure II.1. Présentation du robot manipulateur PUMA 560

Le modèle dynamique est la relation entre les couples (et/ou force) appliqués aux actionneurs et les positions, vitesses et accélérations articulaires. On représente le modèle dynamique par une relation de la forme : [12]

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + u_{mo} = u \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

- $q \in \mathfrak{R}^n$: vecteur des positions articulaires ;
- $\dot{q} \in \mathfrak{R}^n$: vecteur des vitesses articulaires ;
- $\ddot{q} \in \mathfrak{R}^n$: vecteur des accélérations articulaires ;
- $u(t) \in \mathfrak{R}^n$: vecteur de forces et/ou couples moteurs ;
- $u_{mo}(t) \in \mathfrak{R}^n$: vecteur de couples dû à la charge ponctuelle m_0 .

Et

$M(q) \in \mathfrak{R}^{n \times n}$: matrice symétrique définie positive des accélérations inertielles dont l'élément M_{ij} de cette matrice est l'inertie de la i^{eme} articulation sur la j^{eme} articulation

$V_m(q, \dot{q}) \in \mathfrak{R}^n$: matrice de forces et/ou couples dûs aux accélérations de Coriolis et centrifuge ;

$G(q) \in \mathfrak{R}^n$: vecteur de forces et/ou couples dûs aux forces de gravitation

Propriété : le modèle du robot manipulateur est caractérisé par les propriétés suivantes :

- La matrice $M(q)$ est symétrique, définie positive et bornée, et son inverse existe et borné aussi
- La matrice $M(q) - 2V_m(q, \dot{q})$ vérifie l'égalité suivante, pour un vecteur X non nul :

$$X^T [M(q) - 2V_m(q, \dot{q})] X \quad (\text{II. 2})$$

Les éléments des matrices et vecteurs $M(q)$, $V_m(q, \dot{q})\dot{q}$, $G(q)$, sont définis comme suit.

La matrice d'inertie du robot :

$$M(q) = \begin{bmatrix} I_1 + I_2 C_{23}^2 + I_3 C_2^2 + I_4 C_2 C_{23} & I_5 S_{23} + I_6 S_2 & I_5 S_{23} \\ I_5 S_{23} + I_6 S_2 & I_7 + I_4 C_3 & I_8 + 0.5 I_4 C_3 \\ I_5 S_{23} & I_8 + 0.5 I_4 C_3 & I_9 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 3})$$

La matrice de forces et/ou couples dû aux accélérations de Coriolis et centrifuge :

$$V_m(q, \dot{q})\dot{q} = \begin{bmatrix} -(2(I_3 S_2 C_2 + I_2 S_{23} C_{23}) + I_4 (C_2 S_{23} + S_2 C_{23}))\dot{q}_1 \dot{q}_2 - (2I_2 S_{23} C_{23} + I_4 C_2 C_{23})\dot{q}_1 \dot{q}_3 + (I_6 C_2 + I_5 C_{23})\dot{q}_2^2 + (2I_5 C_{23})\dot{q}_2 \dot{q}_3 + (I_5 C_{23})\dot{q}_3^2 \\ (I_3 S_2 C_2 + I_2 S_{23} C_{23} + 0.5 I_4 (C_2 S_{23} + S_2 C_{23}))\dot{q}_1^2 - (I_4 S_3)\dot{q}_2 \dot{q}_3 - (0.5 I_4 S_3)\dot{q}_3^2 \\ (I_2 S_{23} C_{23} + 0.5 I_4 C_2 S_{23})\dot{q}_1^2 + (0.5 I_4 S_3)\dot{q}_2^2 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 4})$$

Le vecteur de forces et/ou couples dû aux forces de gravitation :

$$G(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ -(m_2 L_2 + 0.5 m_2 L_2) g C_2 - 0.5 m_3 L_3 g C_{23} \\ -0.5 m_3 L_3 g C_{23} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 5})$$

Avec les notations suivantes :

$$\begin{aligned} C_i &= \cos(q_i), & C_{ij} &= \cos(q_i + q_j) \\ S_i &= \sin(q_i), & S_{ij} &= \sin(q_i + q_j) \end{aligned} \quad (\text{II. 6})$$

Et

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 7})$$

Le vecteur de forces et/ou couples moteurs :

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{yy1} + I_{xx2} + m_2 d_2 (d_2 + e) + m_3 d_2^2 + I_{M1} \\ I_2 &= I_{yy3} - I_{xx3} + I_{yyt} - I_{xxt} + m_t l_3^2 \\ I_3 &= I_{yy3} - I_{xx2} + m_3 l_2^2 + m_t l_2^2 \\ I_4 &= m_3 l_2 l_3 + 2m_t l_2 l_3 . \\ I_5 &= 0.5 m_3 l_3 d_3 + m_t l_3 d_3 . \\ I_6 &= 0.5 m_2 l_2 (d_3 + e) + m_3 l_2 d_2 + m_t l_2 d_2 . \\ I_7 &= I_{zz2} + I_{zz3} + m_3 l_2^2 + I_{zzt} + m_t (l_2^2 + l_3^2) + I_{M2} . \\ I_8 &= I_{zz3} + I_{zzt} + m_t l_3^2 . \\ I_9 &= I_8 + I_{M3} . \end{aligned} \quad (\text{II. 8})$$

Avec

l_{Mi} $i = 1,3$ Moments d'inertie des différents moteurs.

$I_{xxt}, I_{yyt}, I_{zzt}$. Représentent les moments d'inertie totale par rapport aux principaux axes de l'effecteur

Effet de la charge : Le vecteur des couples additifs $m_o u$ représente l'effet de la charge, il est calculé par la matrice jacobienne, cette dernière est la dérivée de la vecteur position de l'effecteur.

$$J_j(q) = \frac{\partial p}{\partial q_j} \quad (\text{II. 9})$$

En particulier, pour le robot du type PUMA, on a :

$$J(q) = [J_1(q) \quad J_2(q) \quad J_3(q)] \quad (\text{II. 10})$$

$$p = [C_1(l_2 C_2 + l_3 C_{23}) - d_2 S_1 \quad S_1(l_2 C_2 + l_3 C_{23}) + d_2 C_1 \quad -(l_2 C_2 + l_3 C_{23})]^T \quad (\text{II. 11})$$

Où la matrice jacobienne est définie par :

$$J(q) = \begin{bmatrix} -S_1(l_2 C_2 + l_3 C_{23}) - d_2 C_1 & -C_1(l_2 S_2 + l_3 S_{23}) & -C_1(l_3 S_{23}) \\ C_1(l_2 C_2 + l_3 C_{23}) - d_2 S_1 & -S_1(l_2 S_2 + l_3 S_{23}) & -S_1(l_3 S_{23}) \\ 0 & -(l_2 C_2 + l_3 C_{23}) & -(l_3 C_{23}) \end{bmatrix} \quad (\text{II. 12})$$

Le couple dû à la charge ponctuelle sera :

$$u_{m_o} = m_o J^T(q) [J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q} + g] \quad (\text{II. 13})$$

Avec $g = [0 \ 0 \ 9.81]^T$ et $\dot{J}(q, \dot{q})$ dérivée de la matrice Jacobienne obtenue à partir de la différentiation par rapport au temps [4].

II.3. Mode de glissement avec de surface de glissement non linéaire

Dans la synthèse de la loi de commande par mode de glissement, la surface de glissement est définie comme un système linéaire autonome et stable. Néanmoins, la dynamique imposée par un tel système est plus lente que celle imposée par un système non linéaire, d'où l'importance d'utiliser ce dernier type de systèmes pour synthétiser la surface de glissement dans certaines applications. Dans le présent travail, nous développons une surface de glissement non linéaire, telle que le non linéarité est engendrée via une fonction bornée de type sigmoïde [13].

II.4. La surface de glissement non linéaire proposée

On définit s_i une surface de glissement non linéaire d'ordre un, par :

$$s_i = \dot{e}_i + \Lambda(e_i) \quad (\text{II. 14})$$

Avec, $e_i = x_{di} - x_i$ est l'erreur de poursuite et, $\Lambda(\cdot)$ une fonction de classe C_1

A. Proposition :

Soit $\Lambda(\cdot)$ une fonction continue avec $e_i \Lambda(\cdot) > 0 \ \forall e_i \neq 0$.

A. Preuve :

Nous pouvons écrire Une fonction de Lyapunov V_i est définie par :

$$V_i = \frac{1}{2} e_i^2 \quad (\text{II. 15})$$

Cette fonction est définie positive, la dérivée temporelle \dot{V}_i est :

$$\dot{V}_i = -e_i \Lambda(e_i) \quad (\text{II. 16})$$

Pour avoir \dot{V}_i définie négative, il suffit que $e_i \Lambda(e_i) > 0 \forall e_i \neq 0$. Par conséquent, l'erreur est bornée, de plus, tend au moins asymptotiquement vers zéro ($e_i(t) \rightarrow 0$, pour $t \rightarrow \infty$). Dans notre travail, nous choisissons la fonction $\Lambda(\cdot)$ comme étant une fonction sigmoïde et ceci pour avoir $e_i \Lambda(e_i) > 0 \forall e_i \neq 0$. [14]

La fonction : $\Lambda(\cdot)$	Le système :
$\begin{cases} \Lambda_i(x) = \frac{2\eta_i}{1 + e^{-x}} - \eta_i \\ \frac{d\Lambda_i(x)}{dx} = \frac{1}{2\eta_i} [\eta_i^2 - \Lambda_i(x)] \end{cases}, \eta_i \in \mathfrak{R}$	Robot PUMA 560
$\begin{cases} \Lambda_i(x) = \frac{2}{1 + e^{-\mu x}} - 1 \\ \frac{d\Lambda_i(x)}{dx} = \frac{\mu}{2} [1 - \Lambda(x)] \end{cases}, \mu \in \mathfrak{R}$	Système CE105

Tableau II.1. Les fonctions non linéaires du type sigmoïde utilisées

II.5. Commande du robot PUMA 560

Dans cette partie, nous avons utilisé les surfaces proposées dans la partie précédente pour la synthèse d'une loi de commande stabilisante, nous utilisons la théorie de la commande à structure variable. Cette commande doit répondre à un cahier des charges définissant les objectifs à atteindre, notamment la stabilité, la rapidité, la précision et la robustesse.

Des résultats de simulation sont présentés pour le cas de la poursuite de trajectoires, et nous avons adopté le test de chute de la charge comme étant le test de la robustesse.

II.5.1. La synthèse de la loi de commande

Le modèle du robot PUMA 560 sans tenir en compte de l'effet de la charge est le suivant :

$$M\ddot{q} + V_m\dot{q} + G = u \quad (\text{II. 17})$$

Ce modèle décrit la dynamique d'un robot manipulateur à trois degrés de liberté, ce qui nécessite la synthèse de trois commandes (et pour chaque commande, il faut synthétiser une surface s_i , $i = 1: 3$), et comme chaque articulation est considérée comme un sous système dont le degré relatif est, $r_i = 1$, ce qui implique que chaque surface s_i est d'ordre $(r_i - 1)$.

Le vecteur d'erreur est défini par : $e = q - q_d$ avec $e_i = q_i - q_{id}$, et la surface de glissement, $s = [s_1, s_2, s_3]^T$, telle que :

$$s_i = \dot{e}_i + \Lambda(e_i). \quad (\text{II.18})$$

$$\text{Et} \quad \Lambda(x) = [\Lambda_1 \quad \Lambda_2 \quad \Lambda_3] \quad (\text{II.19})$$

Avec

$$\begin{cases} \Lambda_i(x) = \frac{2\eta_i}{1 + e^{-x}} - \eta_i \\ \frac{d\Lambda_i(x)}{dx} = \frac{1}{2\eta_i} [\eta_i^2 - \Lambda_i(x)] \end{cases}, \eta_i \in \mathfrak{R} \quad (\text{II.20})$$

$$\text{On peut écrire,} \quad s = \dot{q} - (\dot{q}_d - \Lambda(e)) \quad (\text{II.21})$$

$$\text{Où,} \quad s = \dot{q} - \dot{q}_r \quad (\text{II.22})$$

Avec, $\dot{q}_r = \dot{q}_d - \Lambda(e)$ est considéré comme une référence pour la vitesse articulaire.

A partir de (II.17) et (II.22), nous pouvons mettre :

$$M \cdot \dot{s} = u - V_m \cdot \dot{q} - G - M \cdot \ddot{q}_r$$

$$M \cdot \dot{s} = u - V_m \cdot (s + \dot{q}_r) - G - M \cdot \ddot{q}_r \quad (\text{II.23})$$

$$M \cdot \dot{s} = u - M \ddot{q}_r - V_m \cdot s - V_m \cdot \dot{q}_r - G \quad (\text{II.24})$$

$$(\text{II.25})$$

Nous définissons la fonction de Lyapunov comme suit :

$$V = \frac{1}{2} s^T M s \quad (\text{II.26})$$

Et comme indiqué à la propriété II.1, la matrice M est définie positive, et on a aussi $V > 0$ pour $s \neq 0$. Donc, selon l'étude de la stabilité au sens de Lyapunov, le système est stable lorsque, $\dot{V} < 0$, avec \dot{V} est la dérivée temporelle de V telle que :

$$\begin{cases} \dot{V} = s^T M \dot{s} + \frac{1}{2} s^T \dot{M} s \\ = s^T [u - M \ddot{q}_r - V_m \cdot s - V_m \cdot \dot{q}_r - G] + \frac{1}{2} s^T \dot{M} s \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Et d'après (II.6), on a $s^T [M - 2 \cdot V_m] s = 0$.

Ce qui implique que :

$$\dot{V} = s^T [u - M\ddot{q}_r - V_m \cdot s - V_m \cdot \dot{q}_r - G]. \quad (\text{II. 28})$$

En choisissant la commande u , telle que :

$$u = u_{eq} - K^T \text{sign}(s) \quad (\text{II. 29})$$

Avec :

$$u_{eq} = M\ddot{q}_r + V_m \dot{q}_r + G \quad (\text{II. 30})$$

sign : La fonction signe, et les gains de commutations $k = [K_1, K_2, K_3]$, avec $K_i > 0$.

Ainsi, avec ce choix de la commande u , nous obtenons :

$$\dot{V} = K^T \text{sign}(s) < 0 \quad (\text{II. 31})$$

Par conséquent, avec la commande (II.29) le système est stable en boucle fermée (le point d'équilibre $e_i = 0$, avec $i = 1:3$, est asymptotiquement stable).

Finalement, la loi de commande à structure variable synthétisée pour le robot manipulateur *PUMA 560*, en utilisant la surface de glissement définie dans tableau II.1, est la suivante :

$$\begin{cases} u = u_{eq} - K^T \text{sign}(s) \\ \text{et} \\ u_{eq} = M\ddot{q}_r + V_m \dot{q}_r + G \end{cases} \quad (\text{II. 32})$$

Avec :

$$\begin{cases} s = \dot{e} + \Lambda(e) \\ \text{et} \\ \dot{q}_r = (\dot{q}_d - \Lambda(e)) \\ \text{et} \\ \Lambda_i(x) = \frac{2\eta_i}{1 + e^{-x}} - \eta_i \end{cases} \quad (\text{II. 33})$$

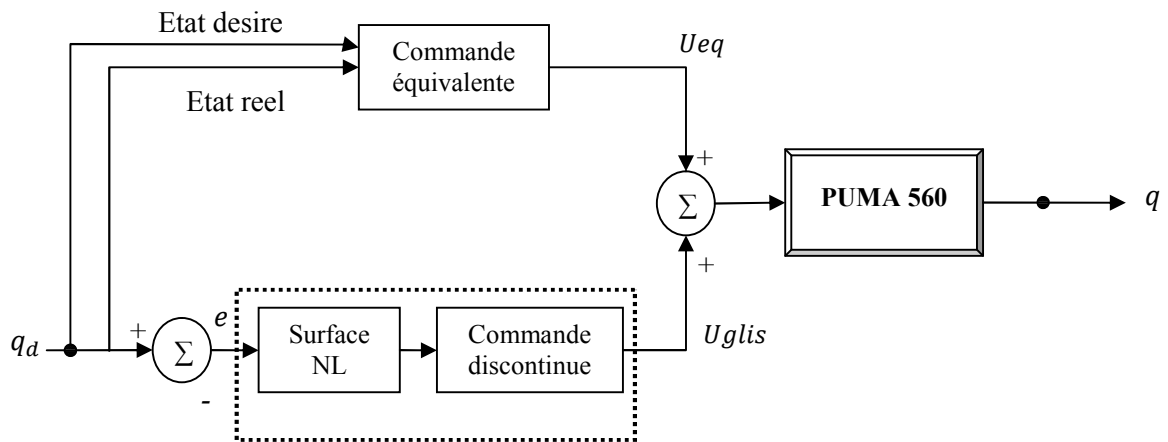


Figure II.2. Schéma bloc de la commande VSC avec des surfaces non linéaires appliquée au robot manipulateur PUMA 560

II.5.2. Résultats de simulation

La commande (II.32) a été appliquée en simulation sur le modèle du robot PUMA 560, les résultats sont illustrés par les figures II.4, II.5, II.6, II.7. Dans ce cas, pour la simulation de la dynamique du robot, nous tenons compte du couple dû à la charge, m_0 et le modèle complet devient.

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + u_{m_0} = u \quad (\text{II. 34})$$

Les trajectoires de référence utilisées sont du type cycloïdale, et ceci pour assurer la continuité en position, en vitesse, et en accélération. Cet avantage offre au robot la possibilité de se déplacer d'un point initial vers un point final avec des commandes admissibles sur les Articulations. Et pour exciter toute les dynamiques du robot il y a une trajectoire cycloïdale test [6], où les différentes articulations se déplacent respectivement de la position $\{-50^\circ, -135^\circ, 135^\circ\}$ à la position $\{45^\circ, -85^\circ, 30^\circ\}$, en un temps de mouvement égal à 1.5 secondes.

$$\begin{cases} q_{di}(0) + \frac{D_i}{2\pi} \left[2\pi \frac{t}{t_f} - \sin\left(2\pi \frac{t}{t_f}\right) \right] & \text{pour } 0 \leq t \leq t_f \\ q_{di}(t_f) & \text{pour } t_f < t \end{cases} \quad (\text{II. 35})$$

$D_i = q_{di}(t_f) - q_{di}(0)$: Le déplacement, et t_f est l'instant final du mouvement.

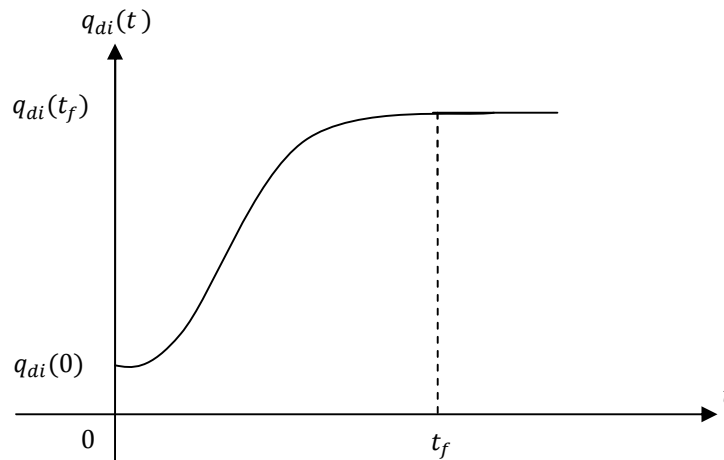


Figure II.3. Trajectoire cycloïdale

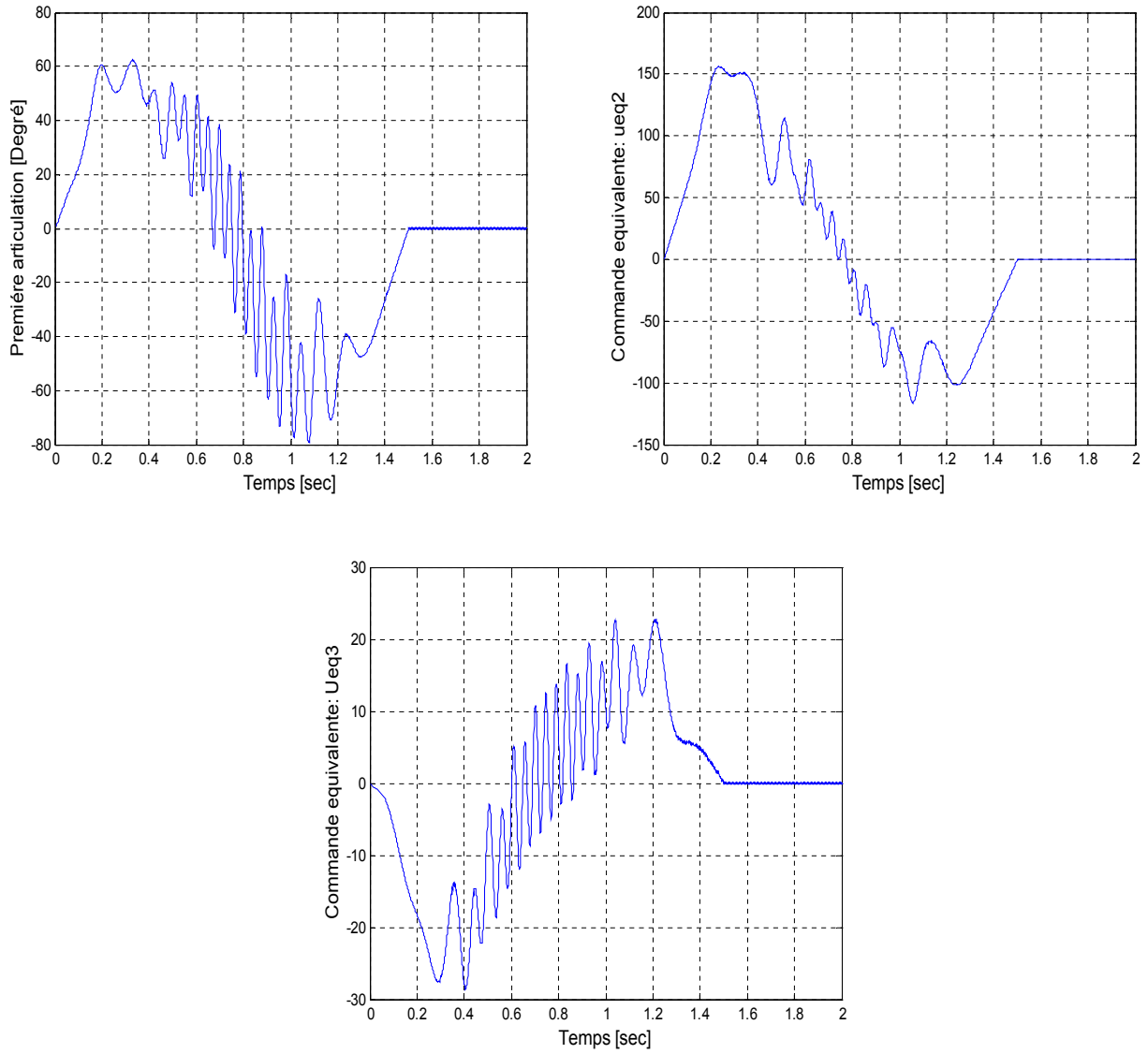


Figure II.4. Commandes équivalentes de la commande VSC appliquée au bras manipulateur

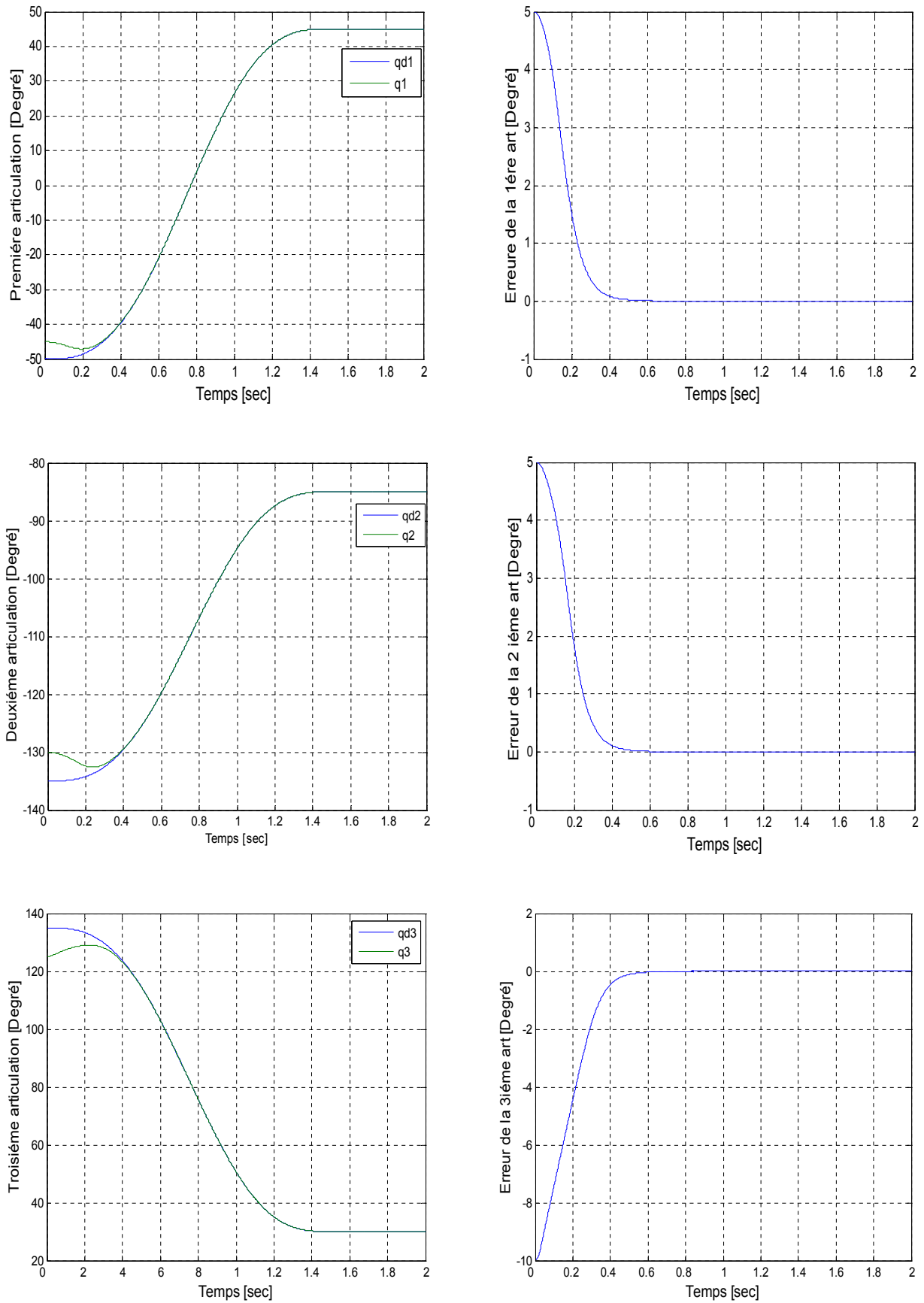


Figure II.5. Positions articulaires et erreurs de poursuite de la commande VSC pour un test à vide

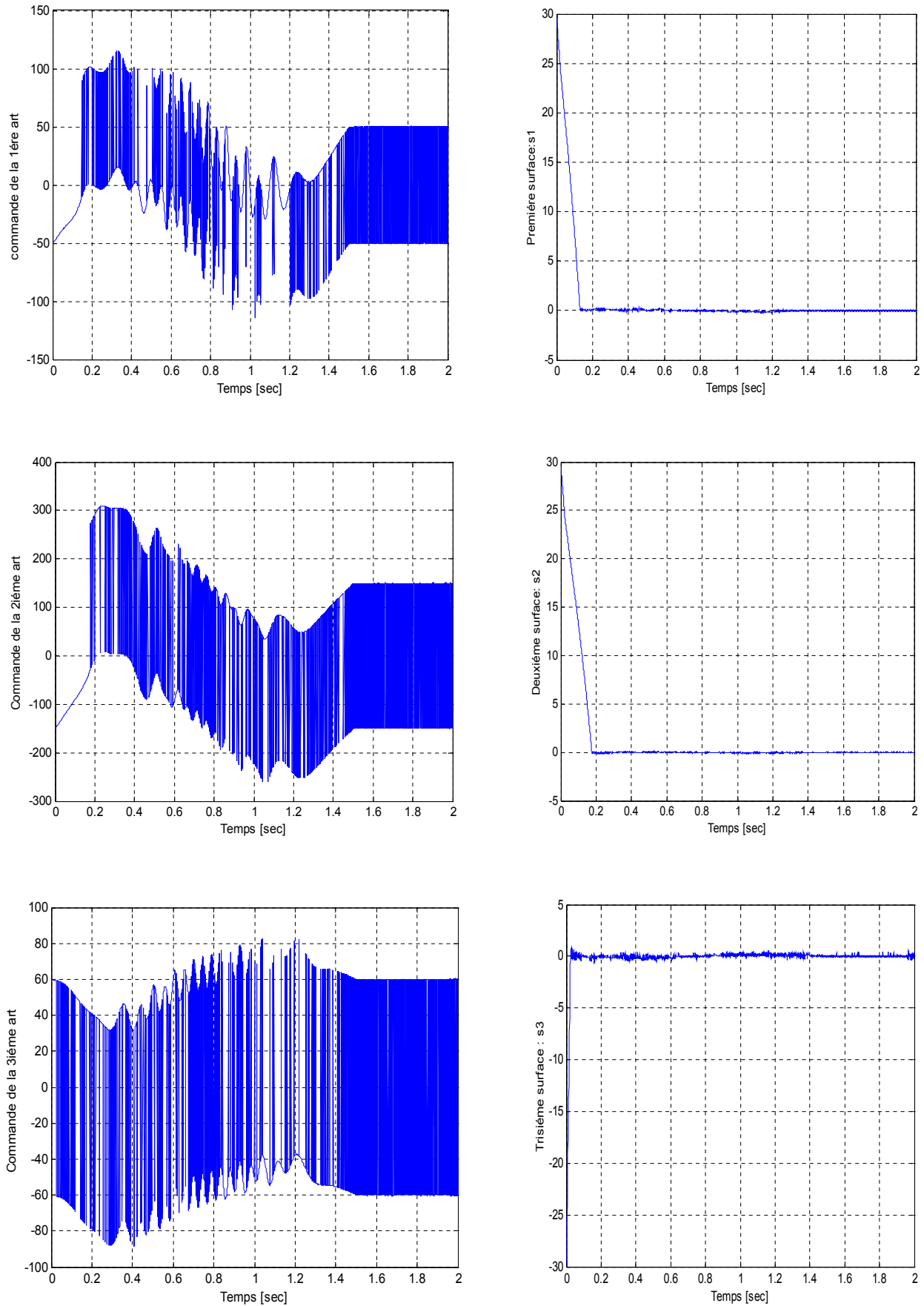


Figure II.6. Surfaces de glissement et commandes effectives pour un test à vide

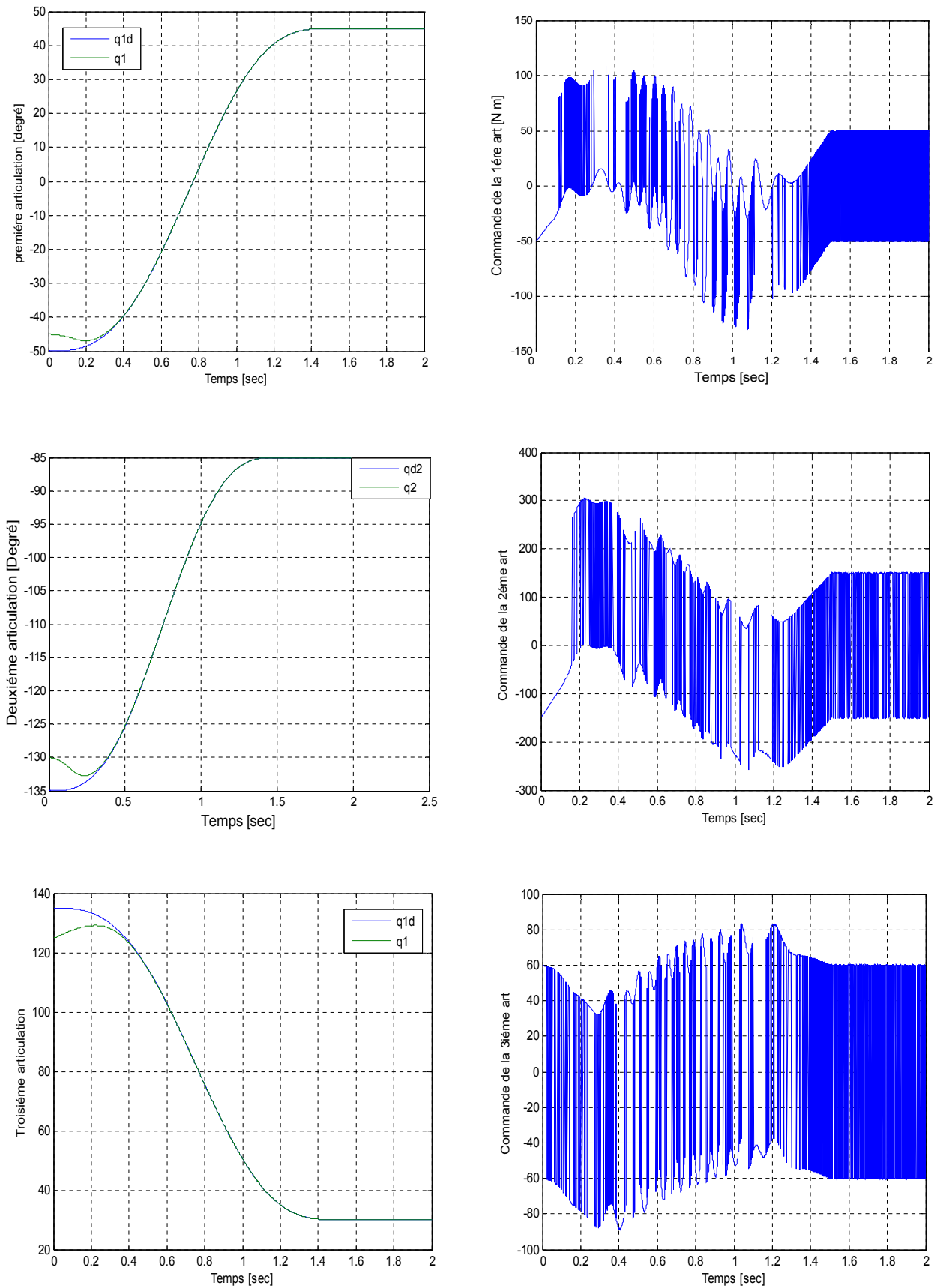


Figure II.7. Résultats de simulation de la commande VSC appliquée au robot PUMA 560 pour un test en charge

II.5.3. Commentaires sur les résultats

Dans la section précédente, nous avons présenté une loi de commande par modes glissants, pour commander en position le robot *PUMA 560*, avec les surfaces non linéaires proposées. Les résultats de simulations illustrés par les figures II.4, II.5, II.6 et II.7, permettent de valider l'approche. Sur la figure II.5, nous remarquons une convergence asymptotique des positions articulaires vers celles désirées avec des erreurs de poursuite tolérables. Par exemple, le temps de réponse est de 0.3 sec dans la première articulation, 0.35 sec dans la deuxième et environ 0.37 sec pour la troisième articulation. Sur La figure II.6, nous voyons une convergence aussi asymptotique pour les surfaces de glissement vers l'origine. En outre, Les commandes appliquées au robot manipulateur sont de hautes fréquences, ce qui est considéré comme un inconvénient néfaste.

La figure II.7 nous permet de relever quelques conclusions pertinentes sur la robustesse du contrôleur. En effet, l'apparition du couple dû à la charge portée et ensuite sa disparition, à cause de la chute de la charge, qui n'influe pas sur les performances de cette commande.

II.6. Modélisation du système hydraulique CE105 à réservoirs couplés

II.6.1. Description du matériel

Le CE105 à réservoirs couplés est considéré comme un benchmark pour l'étude et l'analyse des problèmes de commande des systèmes hydrauliques. Ce dispositif, est conçu par « TQ Education And Training » et, nous permet d'examiner la commande de niveau du liquide dans un ou deux réservoirs en variant le débit à partir d'une pompe. Cet appareil comporte deux réservoirs verticaux reliés par un canal d'écoulement [14], une valve rotative, utilisée pour changer la section du canal et, par conséquent, pour changer les caractéristiques d'écoulement entre les réservoirs (voir Figure. II.5).

Il comporte également des capteurs de niveau, dans chaque réservoir, donnant une tension proportionnelle au niveau du liquide [15].

La vitesse de la pompe peut être ajustée pour remplir le réservoir de gauche au niveau désiré sous contrôle manuel ou automatique et en surveillant le fonctionnement du système.

Le réservoir droit peut être rempli à partir du réservoir gauche par l'intermédiaire de l'ouverture variable d'une valve placée au milieu des deux réservoirs. Les trois valves rotatives (A, B, C) de l'appareil permettent de changer les caractéristiques d'écoulement du système.

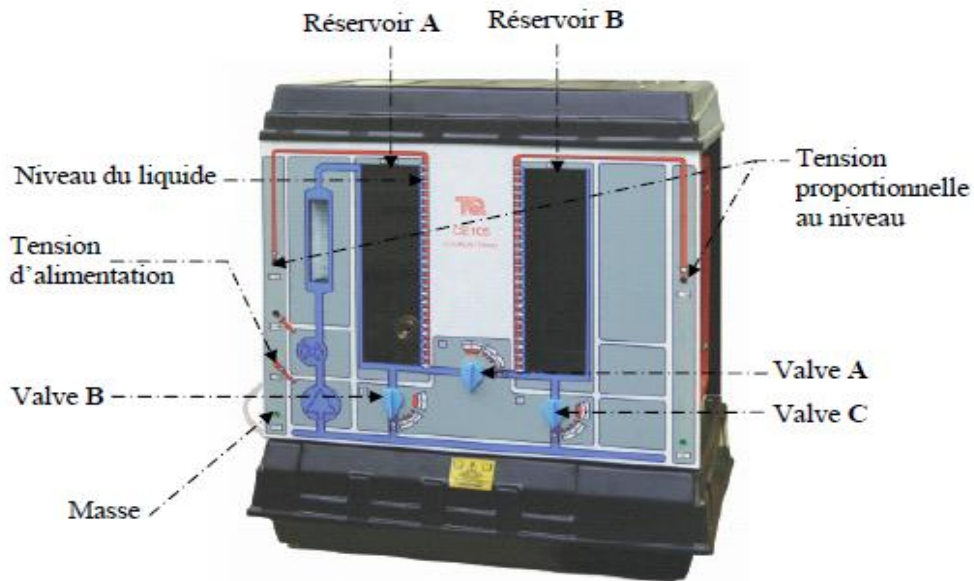


Figure II.8. Présentation du système hydraulique CE105 à réservoirs couplés

II.6.2. Modélisation du CE105

Un bac de section A contient une hauteur h de fluide. Cette cuve peut être alimentée par une pompe imposant un débit volumique d'entrée Q_e .

Une vanne en fond de cuve engendre un débit de fuite. On caractérise l'ouverture de cette vanne par un coefficient a_0 compris entre 0 (vanne fermée) et 1 (vanne ouverte à 100%). Le débit de fuite est tel que : Q_0 .

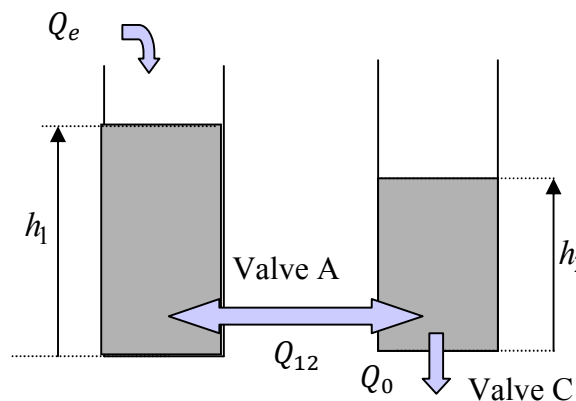


Figure II.9. Système hydraulique CE105 à réservoirs couplés

On souhaite synthétiser des régulateurs qui asservissent les niveaux de fluide, h_1 dans le premier cas et h_2 dans le second, à une consigne et cela quelque soient les coefficients d'ouverture des vannes de fuite (qui constituent des perturbations des systèmes étudiés) [16].

En utilisant l'équation d'équilibre d'écoulement, pour le premier réservoir, on obtient :

Il est important de connaître la relation mathématique qui décrit le comportement du système CE105 à réservoirs couplés, surtout pour un automaticien où la modélisation est une phase très importante dans la synthèse de la loi de commande.

$$Q_e - Q_o = A \frac{dh_1}{dt} \quad (\text{II. 36})$$

et pour le deuxième réservoir :

$$Q_{12} - Q_o = A \frac{dh_2}{dt} \quad (\text{II. 37})$$

Avec, A la section du réservoir, h_i le niveau du liquide dans le réservoir i , Q_e le débit d'entrée généré par la pompe ; et Q_{12} est le débit entre les deux réservoirs, tels que [11] :

$$\begin{cases} Q_0 = s_2 \cdot a_0 \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2} \\ \text{et} \\ Q_{12} = s_1 \cdot a_{12} \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} \end{cases} \quad (\text{II. 38})$$

Avec : s_1 la section du canal 1 ; et s_2 est la section du canal 2, g est la constante de la gravité, a_{12} et a_0 les coefficients de décharge de la valve 1 et la valve 2, respectivement.

Finalement, le système hydraulique est régi par l'équation différentielle non linéaire suivante :

$$\begin{cases} \frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{A} (-s_n \cdot a_{12} \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} + Q_e) \\ \frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A} (s_n \cdot a_{12} \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} - s_n \cdot a_0 \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2}) \\ y = K_h \cdot h_2 \end{cases} \quad (\text{II. 39})$$

II.6.3. Détermination des caractéristiques de la pompe et des capteurs

Il est clair que pour l'équation différentielle (II.39), h_1 et h_2 sont considérés comme les états, et Q_e l'entrée ou la commande. En effet, dans la pratique on fait varier la tension d'alimentation u de la pompe pour ajuster le débit d'entrée, Q_e le capteur de niveau nous donne une tension y_i proportionnelle au niveau h_i , comme illustre le schéma suivant :

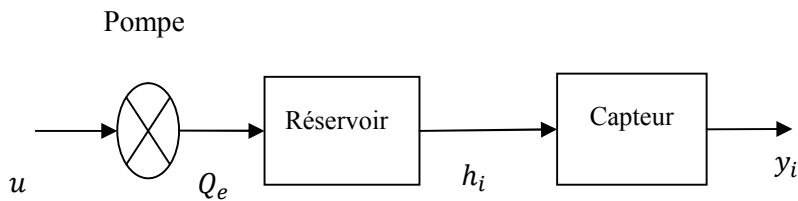


Figure II.10. Caractéristiques de la pompe et des capteurs de niveau

Lorsqu'on suppose que le débit d'entrée Q_e et la tension d'alimentation de la pompe, u , sont liés par une relation linéaire, et la même chose pour la relation entre le niveau h_i , et la tension y_i indiquée par le capteur de niveau, on peut mettre :

$$Q_e = K_Q \cdot u \quad (\text{II. 40})$$

Et

$$y_i = K_h \cdot h_i \quad , \quad i = 1,2. \quad (\text{II. 41})$$

Donc, il nous reste qu'à déterminer les gains K_Q et K_h Ceci constitue l'objectif de l'étape suivante [11].

I.6.4. Procédure de calcul K_Q et K_h

L'équipement utilisé pour cette phase d'identification est constitué du système hydraulique CE105 et des instruments de mesure. Les gains (K_Q, K_h) sont déterminés de telle sorte que le phénomène d'hystérésis soit faible.

Gain K_Q : Premièrement, nous fermons complètement la valve A (l'ouverture variable d'écoulement entre les deux réservoirs) et la valve B (de débordement). Ensuite, nous varions la tension d'alimentation de la pompe. Dès que, le flotteur indique la valeur $400 \text{ cm}^3/\text{min}$ pour le débit, on note la valeur de la tension correspondante. Cette procédure est répétée pour des grandes valeurs de débit (d'une manière croissante) et chaque fois nous prenons la tension correspondante jusqu'à la valeur maximale du débit $4000 \text{ cm}^3/\text{min}$. Lorsque le débit maximum est atteint, on répète la même procédure mais dans la direction inverse (décroissante) de $4000 \text{ cm}^3/\text{min}$ jusqu'à $0 \text{ cm}^3/\text{min}$. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau II.2.

Gain K_h : Dans ce cas, on ferme les deux valves A et B et on fixe la tension d'alimentation de la pompe à une petite valeur, et on laisse le réservoir se remplir. Lorsque le niveau du liquide atteint 50 mm on prend la tension correspondante. Ainsi de suite, jusqu'au niveau 250 mm avec un incrément de 50 mm .

Lorsque le niveau 250 mm est atteint, on arrête l'alimentation ($u = 0$) et on ouvre la valve B jusqu'à ce que le liquide commence à diminuer et on prend les tensions correspondantes à chaque niveau (le niveau dans ce cas est décroissant).

La même procédure a été faite sur le deuxième réservoir et pratiquement les mêmes résultats ont été obtenus (voir tableau II.3).

Débit (cm^3/min)	La tension (V)	La tension (V)
	Croissante	Décroissante
0	>1.2	>1.1
400	2.4	2.3
1000	4.29	4.22
1500	5.26	5.24
2000	6.38	6.23
2500	7.46	7.34
3000	8.44	8.31
3500	9.3	9.26
4000	10.36	10.2

Tableau II.2. La relation entre la tension d'alimentation et le débit d'entrée

Débit (cm^3/min)	La tension (V)	La tension (V)
	Croissante	Décroissante
0	0.1	0.1
50	2.1	2.12
150	4.18	4.22
1500	6.25	6.3
200	8.3	8.34
250	10.3	10.3

Tableau II.3. La relation entre la tension indiquée par le capteur et le niveau dans le réservoir

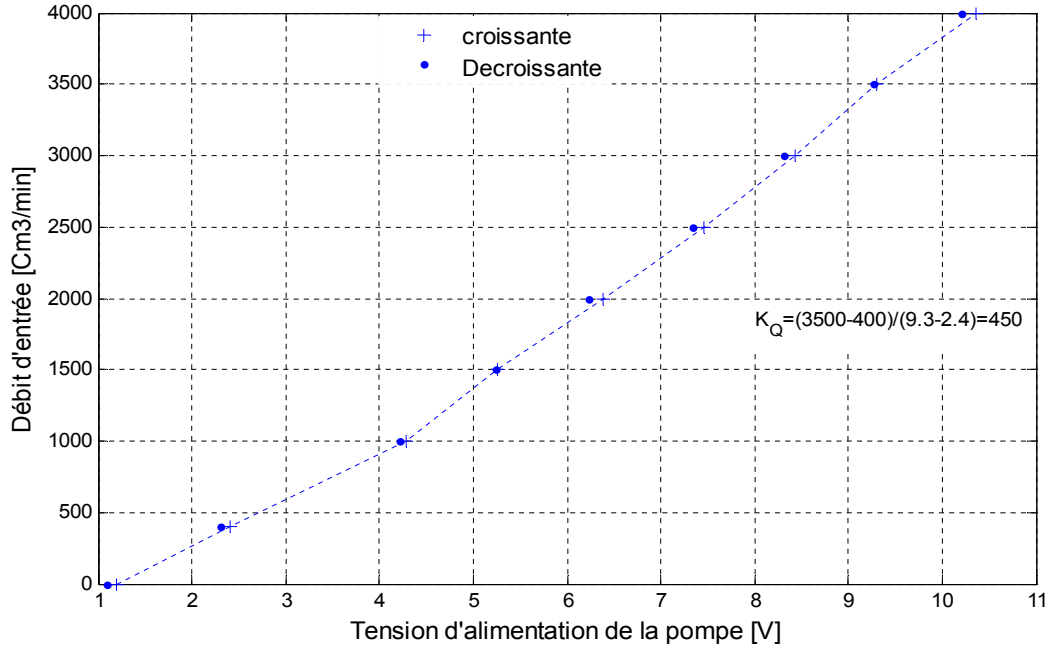


Figure II.11. Variation du débit en fonction de la tension d'alimentation de la pompe

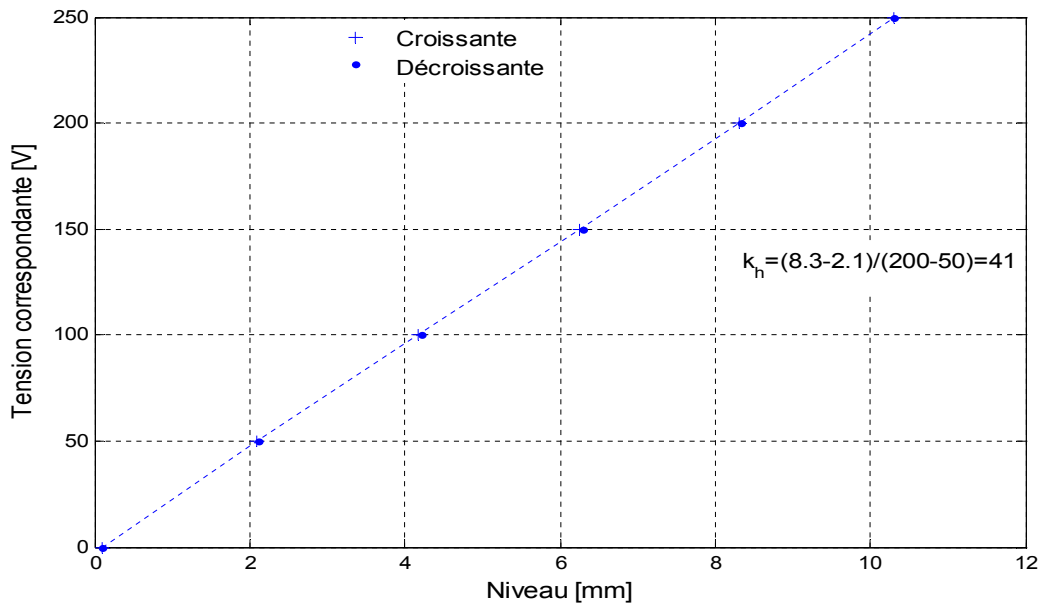


Figure II.12. La tension indiquée par le capteur en fonction du niveau du liquide

II.7. La commande VSC appliquée au système CE105

$$\begin{cases} \dot{h}_1 = \frac{1}{A} (-s_n \cdot a_{12} \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} + Q_e) \\ \dot{h}_1 = \frac{1}{A} (s_n \cdot a_{12} \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} - s_n \cdot a_0 \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2}) \\ y = K_h \cdot h_2 \end{cases} \quad (II.42)$$

Avec :

- A : la section de chaque réservoir ;
- K_Q : le gain de la pompe ;
- u : la tension d'alimentation de la pompe.

Pour ce système, nous définissons le modèle d'état avec $x = [x_1, x_2]^T = [h_2, h_1]^T$, Tel que :

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = \frac{1}{A} (-s_n \cdot a_{12} \sqrt{2 \cdot g \cdot (x_2 - x_1)} + Q_e) \\ \dot{x}_1 = \frac{1}{A} (s_n \cdot a_{12} \sqrt{2 \cdot g \cdot (x_2 - x_1)} - s_n \cdot a_0 \sqrt{2 \cdot g \cdot x_1}) \\ y = K_h \cdot x_1 \end{cases} \quad (\text{II. 43})$$

En choisissant:

$$\beta_1 = \frac{s_1 \cdot a_{12} \sqrt{2 \cdot g}}{A} ; \beta_2 = \frac{s_2 \cdot a_0 \sqrt{2 \cdot g}}{A} ; K_u = \frac{K_Q}{A}$$

Le modèle simplifié devient :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \beta_1 \cdot \sqrt{(x_2 - x_1)} - \beta_2 \cdot \sqrt{x_1} \\ \dot{x}_2 = -\beta_1 \cdot \sqrt{(x_2 - x_1)} + K_u \cdot u \\ y = K_h \cdot x_1 \end{cases} \quad (\text{II. 44})$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x) \\ \dot{x}_2 = f_2(x) + K_u \cdot u \\ y = K_s \cdot x_1 \end{cases} \quad (\text{II. 45})$$

Avec les notations suivantes :

$$\begin{cases} x = [x_1, x_2]^T \\ f_1(x) = \beta_1 \cdot \sqrt{(x_2 - x_1)} - \beta_2 \cdot \sqrt{x_1} \\ f_2(x) = -\beta_1 \cdot \sqrt{(x_2 - x_1)} \end{cases} \quad (\text{II. 46})$$

Remarque II.1 : Nous pouvons étudier le système CE 105 comme étant un système linéaire (autour d'un point de fonctionnement) ou bien non linéaire (dans de large domaine de fonctionnement), et avec couplage ou non. Ceci, suivant les positions des valves (A, B, C).

Dans notre travail, nous avons opté pour le cas où le système est non linéaire et couplé (avec la valve B fermée).

II.7.1. La synthèse de la loi de commande

Dans cette étape, l'objectif est la synthèse d'une loi de commande en utilisant la surface non linéaire proposée à la section précédente, et la sortie $y = K_h \cdot x_1$, doit suivre au mieux un signal de référence donnée $y_r(t)$ tout en garantissant la bornitude de l'état $x_2(t)$ (le niveau h_1 ne doit pas déborder l'intervalle admissible, $h_1 < h_{max1}$) [11].

Le degré relatif de ce système est, $r = 2$ et pour ceci on définit pour ce système une surface de glissement d'ordre, $r - 1$,

$$s = \dot{e} + \Lambda(e) = 0 \quad (\text{II. 47})$$

avec, $e = y - y_r$ et $y_r = K_h \cdot h_{r2}$; h_{r2} : c'est le niveau désiré dans le deuxième réservoir, $\Lambda(e)$ est choisi comme une fonction du type sigmoïde, telle que :

$$\begin{cases} \Lambda(t) = \frac{2}{1 + e^{-\mu t}} - 1 \\ \frac{d\Lambda(t)}{dt} = \frac{\mu}{2} \cdot (1 - \Lambda(t)^2) \end{cases} \quad (\text{II. 48})$$

La dérivée temporelle de s est, \dot{s} telle que :

$$\dot{s} = \ddot{e} + \dot{e} \left. \frac{d\Lambda(t)}{dt} \right|_{t=e} \quad (\text{II. 49})$$

Avec :

$$\dot{e} = K_h \cdot f_1(x) - \dot{y}_r \quad (\text{II. 50})$$

$$\left. \frac{d\Lambda(t)}{dt} \right|_{t=e} = \frac{\mu}{2} \cdot (1 - \Lambda(e)^2) \quad (\text{II. 51})$$

$$\ddot{e} = K_h \cdot \left(\frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} \cdot \dot{x}_1 + \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_2} \cdot \dot{x}_2 \right) - \ddot{y}_d \quad (\text{II. 52})$$

Une fonction de Lyapunov V est définie par :

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (\text{II. 53})$$

Alors :

$$\dot{V} = s \cdot \dot{s} \quad (\text{II. 54})$$

Avec :

$$\begin{aligned} \dot{s} = K_h \cdot \left(\beta_1 \cdot \frac{(f_2(x) - f_1(x))}{2 \cdot \sqrt{(x_1 - x_2)}} - \beta_2 \frac{f_1(x)}{2 \cdot \sqrt{x_1}} \right) + \frac{K_h \cdot \beta_1 \cdot K_u}{2 \cdot \sqrt{(x_1 - x_2)}} \cdot u \\ + (K_h \cdot f_1(x) - \dot{y}_r) \cdot \frac{\mu}{2} \cdot (1 - \Lambda(e)^2) - \ddot{y}_r \end{aligned} \quad (\text{II. 55})$$

Avec :

$$\begin{cases} B(x) = K_h \cdot \left(\beta_1 \cdot \frac{(f_2(x) - f_1(x))}{2 \cdot \sqrt{(x_1 - x_2)}} - \beta_2 \frac{f_1(x)}{2 \cdot \sqrt{x_1}} \right) \\ A(x) = \frac{K_h \cdot \beta_1 \cdot K_u}{2 \cdot \sqrt{(x_1 - x_2)}} \\ C(x) = (K_h \cdot f_1(x) - \dot{y}_r) \cdot \frac{\mu}{2} \cdot (1 - \Lambda(e)^2) - \ddot{y}_r \end{cases} \quad (\text{II. 56})$$

Finalement, on peut mettre

$$\dot{s} = B(x) + A(x).u + C(x) \quad (\text{II. 57})$$

De toute évidence, par un choix de $\dot{s} = -m. \text{sign}(s)$ avec, $m > 0$, on trouve :

$$\dot{V} = -m. |S| < 0 \quad (\text{II. 58})$$

En tenant compte de ce qui est passé, il suffit de calculer u pour que :

$$B(x) + A(x).u + C(x) = -m. \text{sign}(s) \quad (\text{II. 59})$$

Donc :

$$u = -A^{-1}(x).(B(x) + C(x)) - A^{-1}(x).m. \text{sign}(s) \quad (\text{II. 60})$$

On définit un gain K positif, tel que :

$$K = \max \left| \frac{m}{A(x)} \right| \quad (\text{II. 61})$$

Finalement, la commande est définie par la formule suivante :

$$u = u_{eq} + u_{glis} \quad (\text{II. 62})$$

Avec :

$$u_{eq} = -A^{-1}(x).(B(x) + C(x)) \text{ et } u_{glis} = -K. \text{sign}(s) \quad (\text{II. 63})$$

Le schéma bloc de la commande est donné par la figure II.13 :

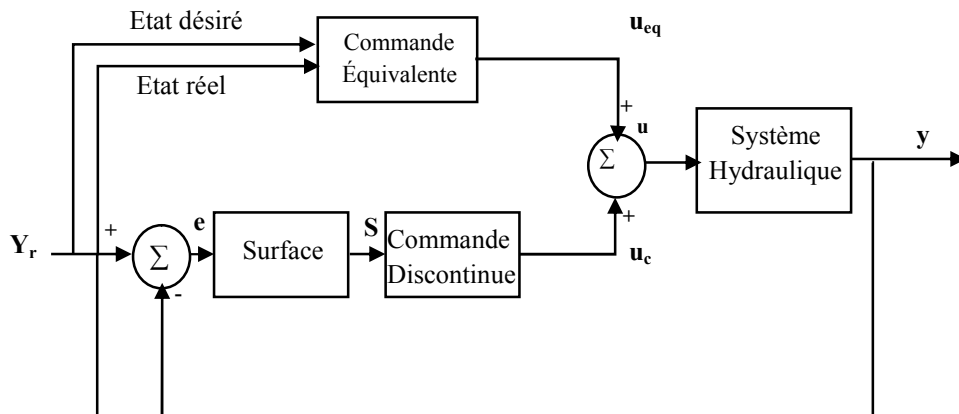


Figure II.13. Schéma bloc de la commande par mode de glissement

II.7.2. Résultats de simulation

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation concernant l'application de la loi de commande par mode de glissement synthétisée précédemment. Ces résultats ont été obtenus en utilisant le modèle mathématique du système hydraulique *CE105* à réservoirs couplés avec les paramètres de simulation suivants : la section de chaque réservoir $A = 9350 \cdot 10^{-6} m^2$; la section de chaque valve $s_n = 78.5 \cdot 10^{-6} m^2$; coefficient de décharge $a_0 = 0.6$; coefficient de décharge $a_{12} = 1$; le gain de la pompe $K_Q = 450 cm^3 / min / V$;

On définit le profil y_r (voir figure II.14), comme étant une consigne pour la sortie $y = K_h \cdot x_1$.

Cette référence est proportionnelle au niveau désiré dans le deuxième réservoir, telle que $h_{r2} = y_r/k_h$. Les résultats sont montrés sur les figures II.15, II.16.

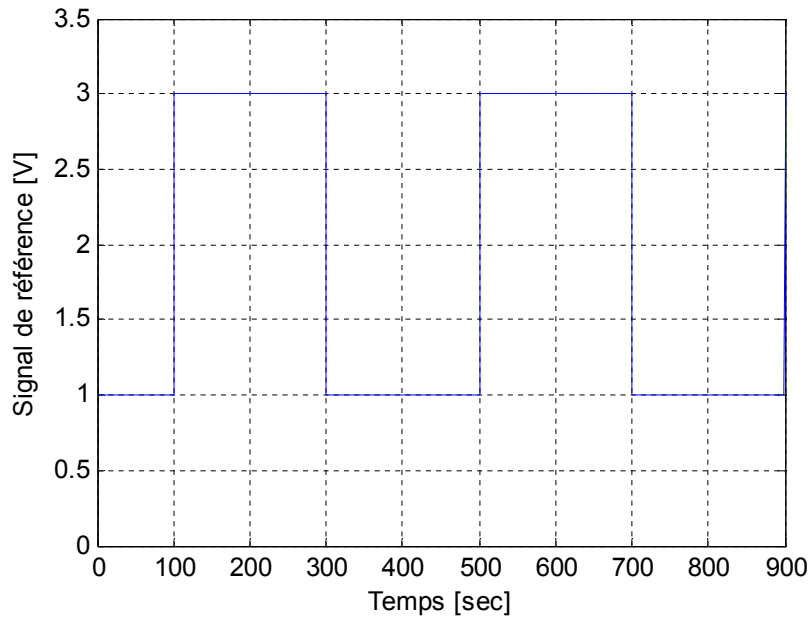


Figure II.14 Signal de référence choisie.

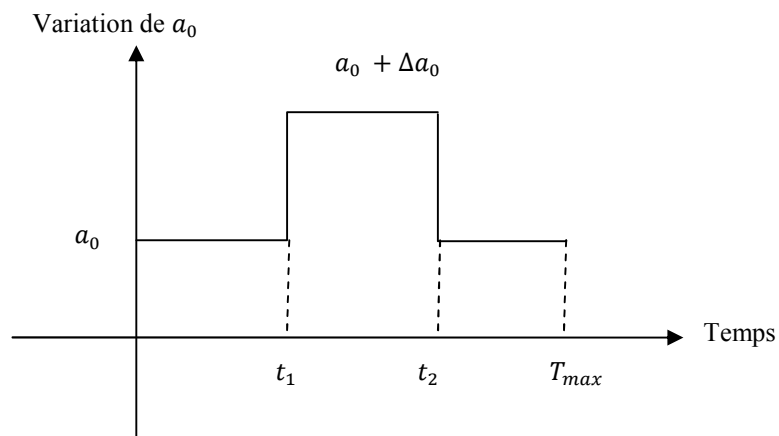


Figure II.15. Variation du coefficient de décharge a_0 de la valve C

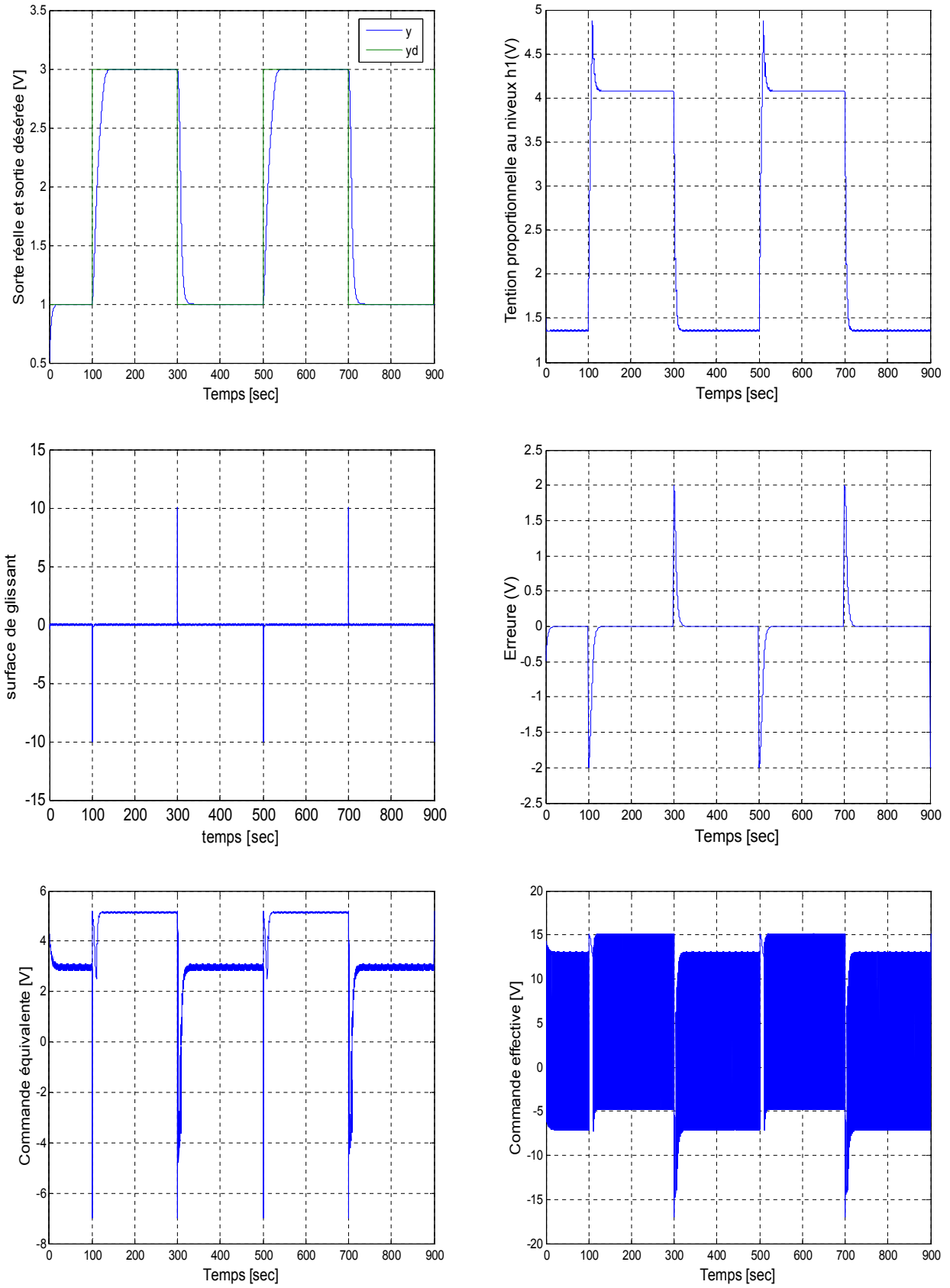


Figure II.16. Résultats de simulation de la commande VSC appliquée au système CE105

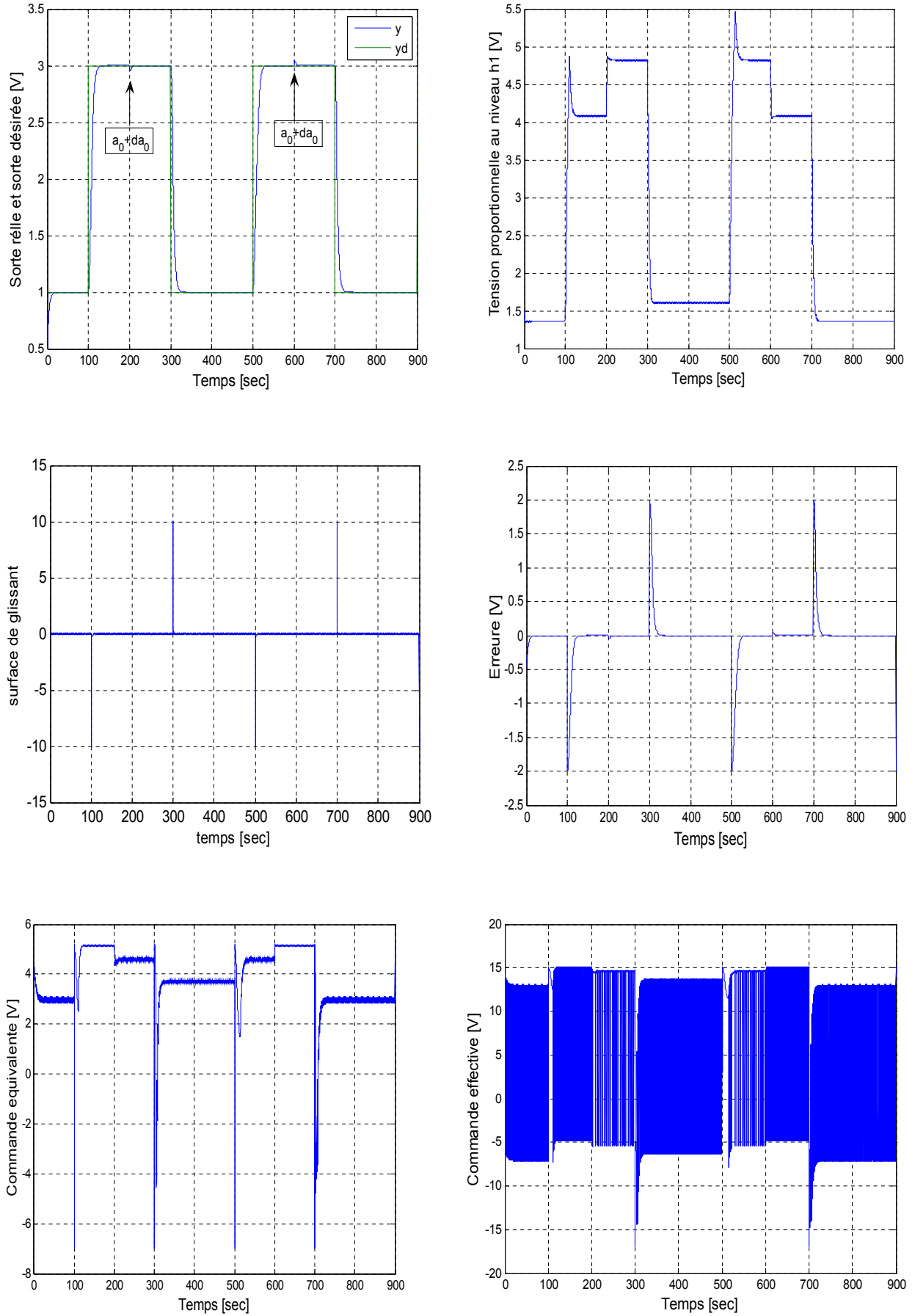


Figure II.17. Résultats de simulation de la commande VSC avec un test de robustesse

II.7.3. Commentaires sur les résultats

Les résultats de simulation, sont présentés sur les figures II.16, II.17, Nous pouvons remarquer qu'on a abouti à des résultats satisfaisants en termes de poursuite, avec un dépassement maximal admissible et un temps de réponse environ de 30 secs, ce qui est acceptable par rapport à la nature des systèmes hydrauliques. Des pics sont apparus au niveau de la surface de glissement, ceci est dû au changement brusque de la consigne.

Cette commande manifeste une robustesse remarquable vis-à-vis les erreurs de modélisation et des bruits de mesure. En effet, cette commande est calculée à base d'un modèle simplifié du système hydraulique, avec des dynamiques négligées (comme celle de la pompe) et les paramètres du système utilisés sont loin de leurs valeurs réelles. De plus, la variation de la position de la valve C, n'a pas d'influence sur le comportement du système. On remarque aussi que le niveau dans le premier réservoir évolue dans les limites admissibles. Autrement dit, cette commande assure la convergence du niveau dans le deuxième réservoir vers celui désiré. De plus, elle assure la bornitude du niveau dans le premier réservoir.

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la méthode de synthèse d'une loi de commande par mode de glissement avec la classe des surfaces de glissement non linéaires proposées.

La simulation effectuée sur le robot manipulateur du type *PUMA 560* et système hydraulique *CE105*, montre l'efficacité de ces lois de commande. En effet, nous constatons que les erreurs de poursuites sont relativement faibles. De plus, les résultats montrent que ces commandes sont robustes par rapport aux variations paramétriques.

Ces commandes synthétisées, bien qu'ayant des avantages, possèdent aussi des inconvénients. En effet, le phénomène de broutement peut être néfaste pour les actionneurs et aussi pour la stabilité du système, puisque il peut exciter les dynamiques non modélisées. En outre, lors du calcul de la commande équivalente, nous avons besoin du modèle du système à commander, ce qui est difficile avoir en pratique où la modélisation à nos jours est un véritable problème. Diverses méthodes ont été développées pour y remédier, la combinaison de mode de glissement avec la commande intelligente (floue et neuronale) s'est avérée intéressante et performante.

Comment s'effectue cette combinaison ? Et à quelle forme de commande aboutit-on ? La réponse à ces questions, fait l'objet du chapitre suivant.

III. MODE DE GLISSEMENT ET COMMANDE NEURONES FLOUE

III.1. Introduction

La commande par mode glissant a largement prouvé son efficacité à travers les études théoriques rapportées, ces principaux domaines d'application sont la robotique et les moteurs électriques. L'avantage que procure une telle commande et qui la rend aussi importante est sa robustesse vis-à-vis des perturbations et des incertitudes du modèle. Cependant, ces performances sont obtenues au prix de certains inconvénients:

- un phénomène de chattering ou broutement provoqué par la partie discontinue de cette commande et qui peut avoir un effet néfaste sur les actionneurs.
- le système est soumis à chaque instant à une commande élevée afin d'assurer sa convergence vers l'état désiré et ceci n'est pas souhaitable [17].

Plusieurs techniques ont alors été proposées pour réduire ou éliminer ce phénomène. Parmi ces techniques

- **La proposition de Slotine**

Elle consiste à approximer la commande discontinue par une loi continue au voisinage de la surface, cette fonction a le nom « *sat* ».

- **La proposition de Harshima**

Dans celle-ci, la fonction signe est remplacée par une fonction de lissage appelée « *cont* » [2].

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement la théorie de la logique floue et les concepts de base sur la théorie des ensembles flous. Nous avons appliquée cette commande au système hydraulique CE105 dans le but de régler la surface de glissement et éliminer le phénomène de chattering [3].

III.2. Introduction à la logique floue

La logique floue a été introduite par le professeur Lotfi Zadeh en 1965 comme une généralisation de la logique binaire. L'intérêt de la logique floue réside dans sa capacité à traiter l'imprécis, l'incertain et le vague. Elle est issue de la capacité de l'homme à décider et agir de façon pertinente malgré le flou des connaissances disponibles. En effet, la logique floue a été introduite pour approcher le raisonnement humain à l'aide d'une représentation adéquate des connaissances.

Ces dernières années, la logique floue a été appliquée dans divers domaines.

Cependant, la commande floue est le domaine qui suscite le plus de curiosité et s'avère être un champ d'application actif à travers le monde [18].

Depuis, la logique floue a connu un grand succès et a trouvé notamment une place importante dans le domaine de la commande pour une large gamme de systèmes et plus généralement en génie

électrique. Elle présente en effet l'avantage d'utiliser des règles linguistiques simples permettant de traduire facilement le savoir faire d'un expert pour répondre à une problématique spécifique. Dans ce sens, des correcteurs à base de logique floue améliorent de façon globale aussi bien les performances dynamiques que la robustesse des systèmes commandés, en s'appuyant sur la connaissance de ceux-ci [19].

En fait, l'imitation des aspects qualitatifs et approximatifs du raisonnement humain a donné naissance à un autre type de système de commande qui trouve de puissantes applications, surtout dans les situations où le système à commander est mal défini mathématiquement et/ou en présence d'une expertise qui puisse fournir des règles de commande [18].

III.2.1. Ensembles flous

La notion d'ensemble flou a pour but de permettre des gradations dans l'appartenance d'un élément à une classe, c'est-à-dire d'autoriser un élément à appartenir plus ou moins fortement à cette classe, par exemple, un individu d'une taille donnée n'appartient pas du tout à la classe des «grands» s'il mesure 1.5 m, il y appartient tout à fait s'il mesure 1.8 m, plus sa taille se rapproche de 1.8 m, plus son appartenance à la classe des «grands» est forte. Cette notion permet l'utilisation de catégories aux limites mal définies (comme «vieux» ou «adulte»), de situations intermédiaires entre le tout et le rien «presque vrai», le passage progressif d'une propriété à une autre (passage de «tiède» à «chaud» selon la température), l'utilisation de valeurs approximatifs («environ 12 ans»). Elle évite l'utilisation arbitraire de limites rigides à des classes.

Afin de mettre en évidence cette notion, on introduit les définitions suivantes :

Soit un ensemble de référence X continu ou discret d'objets dénotés $\{x\}$.

- Un ensemble classique A de X est défini par une fonction caractéristique μ_A qui prend la valeur 0 pour les éléments de X n'appartenant pas à A et la valeur 1 pour ceux qui appartiennent à A (figure III.1).

Un ensemble flou A de X est défini par une fonction d'appartenance qui associe à chaque élément x de X , le degré $\mu_A(x)$, compris entre 0 et 1, avec lequel x appartient à A (figure III.1.b).

$$\mu_A: X \rightarrow [0,1] \quad (\text{III. 1})$$

Cet ensemble flou A peut être représenté comme un ensemble de paires (élément générique, degré d'appartenance) ordonnées:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\} \quad (\text{III. 2})$$

On adopte souvent la notation suivante pour représenter l'ensemble A , qui indique pour tout élément x de X son degré $\mu_A(x)$ d'appartenance à A [19]:

$$A = \sum_{x \in X} \mu_A(x) / x, \text{ si } X \text{ est discret} \quad (\text{III. 3})$$

$$A = \int_x \mu_A(x) / x, \text{ si } X \text{ est continu}$$

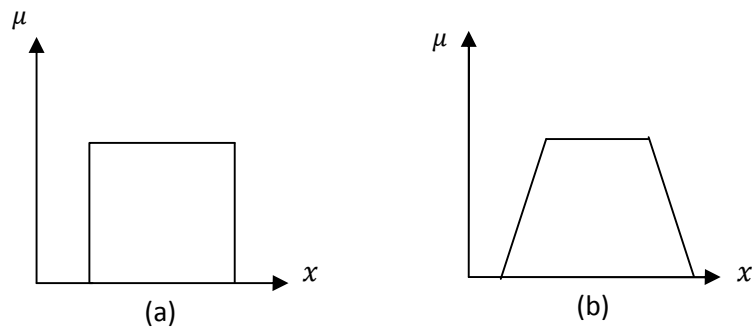


Figure III.1. Exemple de fonction d'appartenance (a) logique classique (b) logique floue

III.2.2. Variables linguistiques

Une variable linguistique 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 ensembles flous 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 III.2 [17].

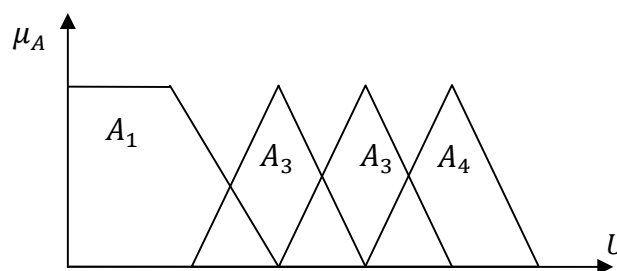


Figure III.2. Représentation d'une variable linguistique

III.2.3. Opérateurs de la logique floue :

Supposant deux fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$ de deux variables floues x et y caractérisant la température de l'air et la force du vent, l'exemple "l'air est froid et le vent et fort" ou encore "si l'air est froid ou le vent n'est pas faible" il faut fermer la porte. Les compositions ET et OU en plus de la négation apparaissent et doivent être définies. Pour pouvoir décider de fermer la porte ou non il faut que deux conditions soient vérifiées en même temps. Alors, il est important de pouvoir composer entre les divers prédicats et leurs fonctions d'appartenance.

III.2.3.1. L'opérateur ET :

L'opérateur ET est réalisé dans la plupart des cas par la formation du minimum (Intersection) des deux fonctions d'appartenance :

$$\mu_c(z) = \mu_{A \text{ et } B}(z) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (\text{III. 4})$$

III.2.3.2. L'opérateur OU :

En général, l'opérateur OU est réalisé par la formation du maximum des deux fonctions d'appartenance :

$$\mu_c(z) = \mu_{A \text{ et } B}(z) = \max(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (\text{III. 5})$$

III.2.3.3. L'opérateur NON :

Il est caractérisé en logique floue par la fonction :

$$\mu_c(z) = \mu_{A - (z)} = 1 - \mu_A(z) \quad (\text{III. 6})$$

Dans certaines circonstances, il est judicieux de choisir d'autres opérateurs en plus de OU , ET et NON [20].

III.2.4. Présentation d'un régulateur par logique floue

L'idée centrale de la commande par logique floue est la règle de commande linguistique. Cette règle peut prendre plusieurs formes, cependant elle indique invariablement quelle action de commande prendre face à une condition donnée. Ces actions de commandes peuvent avoir la forme : « augmenter le courant », « diminuer de beaucoup la tension », et les conditions peuvent avoir la forme : « si l'erreur de vitesse est assez grande », « si l'erreur de courant est très petite ».

Les mots clés ici sont « assez grande », « beaucoup » et « très petite », ils correspondent à des informations imprécises mais utiles et dans la théorie de la logique, ils sont représentés par un sous-ensemble flou d'un certain univers de discours. Une règle de commande est une combinaison d'une condition et d'une action. En général une règle prend la forme suivante : « si A alors B » où A est une proposition floue sur la condition du processus et B est une proposition floue sur l'action de commande. Plusieurs règles sont nécessaires pour la construction d'un contrôleur à logique floue, ces règles forment un algorithme.

III.2.5. Eléments de base d'un contrôleur a logique floue

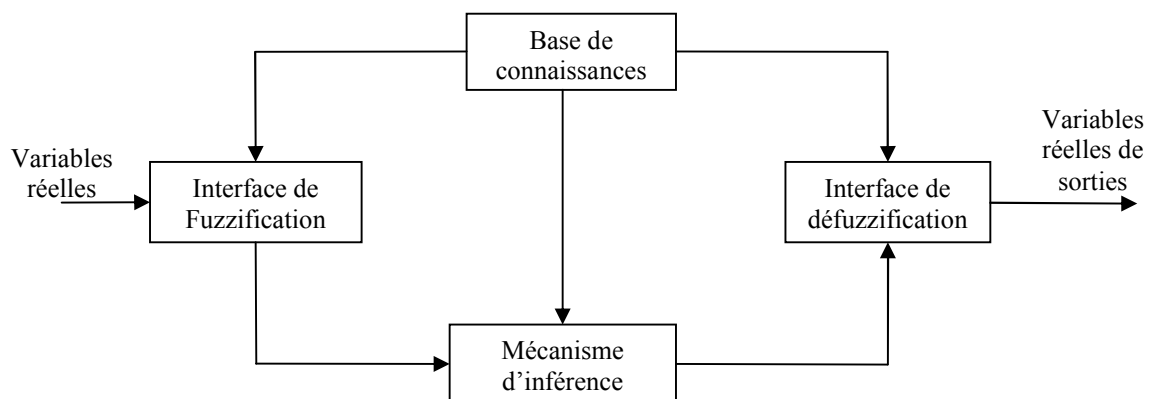


Figure III.3. Schéma synoptique général d'un contrôleur flou

Nous procédons tout d'abord à la partition en sous-ensembles flous des différents univers de discours que le système impose. Ensuite nous déterminons la base de règles qui va caractériser le fonctionnement désiré en variables floues. Cette étape est appelée la fuzzification. Les variables sont

utilisées dans un mécanisme d'inférence qui crée et détermine les variables floues de sortie en utilisant des opérations sur les fonctions d'appartenance.

III.2.5.1. Interface de fuzzification

Il a pour but de déterminer les degrés d'appartenance des variables d'entrées aux ensembles flous correspondants. Elle reçoit des valeurs réelles, représentant les entrées du système d'inférence flou et les transforme en des termes linguistiques.

III.2.5.2. 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.

III.2.5.3. Logique de prise de décision (Inférence)

La logique de prise de décision est le noyau du contrôleur flou ; elle a la capacité de simuler la prise de décision de l'être humain en se basant sur les concepts flous et les règles d'inférences. Ce concept peut être représenté par :

Antécédent - fait : x est A
 - fait : si x est A , alors - fait : y est B

Conséquence: y est B .

Tel que A, B sont des ensembles flous d'univers appropriés. La procédure d'inférence ci-dessus est appelée « raisonnement flou». Le mécanisme d'inférence passe par trois phases qui peuvent être dissociées ou associées selon le type de raisonnement flou choisi.

III.2.5.4. Agrégation

Dans un système flou, plusieurs règles sont actionnées en sortie, ainsi, plusieurs ensembles flous de sortie sont concernés. L'agrégation détermine la manière de combiner les sorties des différentes règles pour construire un seul ensemble flou dans la conséquence. Pour deux conséquences A et B , la combinaison de ces différentes règles se fait à l'aide de l'opérateur OU . Le résultat de l'agrégation est obtenu par plusieurs méthodes (généralement par : min pour le ET , max pour le OU).

III.2.5.5. Interface de défuzzification

Elle convertit l'ensemble flou résultant de l'agrégation en une seule valeur réelle dans le but de donner plus de certitude à la sortie du système d'inférence flou. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser cette opération, parmi lesquelles nous citons :

- La méthode du maximum : Elle consiste à ne prendre en compte que les valeurs possédant un degré maximum d'appartenance à l'ensemble flou agrégé. Cette technique est simple à

appliquer, mais peu employée étant donné qu'elle est basée sur l'opérateur maximum qui privilégie une seule règle parmi celles qui sont présentes.

- La méthode de la moyenne des maximums) : Celle-ci considère comme valeur de sortie la moyenne des valeurs préconisées par chaque règle et pondérées par leur degré respectif de validité.
- La méthode du centre de gravité : Cette méthode, génère le centre de gravité de la surface engendrée par la fonction d'appartenance de l'ensemble flou agrégé.

III.2.6. Propriétés d'un réglage par logique floue

Les propriétés essentielles d'un réglage par logique floue peuvent être résumées de la manière suivante :

- mesure de plusieurs grandeurs : la grandeur à régler et d'autres grandeurs caractérisant le comportement dynamique du système à régler ;
- comportement non linéaire sans dynamique; aptitude à régler convenablement les systèmes avec un comportement dynamique compliqué, dont la modélisation est difficile, voire impossible. A noter que dans le cas du réglage par logique floue, il n'est pas nécessaire d'établir un modèle.
- aptitude à régler convenablement les systèmes avec un comportement dynamique compliqué, dont la modélisation est difficile, voire impossible. A noter que dans le cas du réglage par logique floue, il n'est pas nécessaire d'établir un modèle [21].

III.3. Les réseaux de neurones

III.3.1. Introduction

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) constituent une technique non- linéaire complexe basée sur le modèle d'un neurone humain. Il s'agit d'un ensemble d'entités simple, appelées « neurones », fortement interconnectées entre elles. En fait, les RNA visent à modéliser les capacités d'apprentissage du cerveau humain. Les premiers travaux sur les RNA ont été développés par Mc Culloch et Pitts en 1943, qui se basant sur des fondements biologiques, ont proposé un modèle binaire où chaque neurone a une fonction seuil. En 1949, Hebb propose une formulation du mécanisme d'apprentissage, sous la forme d'une règle de modifications des connexions synaptiques. Ce mécanisme est devenu la base des algorithmes courants.

La première architecture neuronale ; le perceptron apparaît en 1958, grâce aux travaux de Rosenblatt.

Grâce à leurs propriétés telles que le parallélisme, l'adaptation, la généralisation et l'approximation, les réseaux de neurones constituent aujourd'hui un véritable outil pour la résolution de plusieurs problèmes où les méthodes classiques ont montrés leurs limites. L'optimisation des systèmes non- linéaires a été parmi les applications pour lesquelles ils ont été utilisés, notamment, après l'apparition de la rétro- propagation [22].

III.3.2. Principe et définition

L'origine des réseaux de neurones vient de l'essai de modélisation du neurone biologique par Warren Mc Culloch et Walter Pitts. Ils supposent que l'impulsion nerveuse est le résultat d'un calcul simple effectué par chaque neurone et que la pensée née grâce à l'effet collectif d'un réseau de neurones interconnectés.

Le schéma suivant présente un neurone formel :

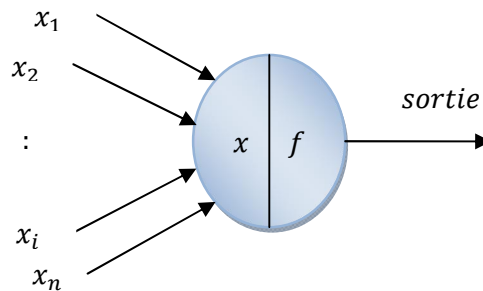


Figure III.4. Représentation d'un neurone

Les entrées du neurone sont désignées par x_i ($i = 1..n$). Les paramètres w_i reliant les entrées aux neurones sont appelés poids synaptiques ou tout simplement poids. La sortie du neurone est donnée par:

$$sortie = f(x) \quad \text{Avec} \quad x = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (\text{III. 7})$$

x est l'état d'activation du neurone (également appelé état ou activité).

f est la fonction d'activation du neurone. Conformément au modèle biologique, les fonctions d'activation sont généralement croissantes et bornées. Les fonctions les plus connues sont la fonction signe, la fonction linéaire saturée et la fonction sigmoïde [23].

III.3.3. L'architecture d'un réseau :

Elle est entièrement déterminée par le modèle de ses neurones et la topologie de leurs connexions.

Trois classes d'architectures de réseaux peuvent être considérées à savoir : les réseaux mono- et multicouches, les réseaux récurrents et les réseaux topologiques.

III.3.3.1. Réseaux statiques ou multicouches :

Un réseau statique présente une architecture de neurones organisée en couches successives.

L'interconnexion des neurones est réalisée entre couches adjacentes, suivant un sens préférentiel de transfert de l'information. Typiquement, les entrées des neurones d'une couche sont également les sorties des neurones de la couche adjacente qui la précède. Au sein d'une même couche, les neurones ne sont pas interconnectés, par contre, l'interconnexion des neurones entre deux couches successives peut en revanche être totale ou partielle. Par convention, un réseau multicouche à n couches effectives comporte en pratique $(n + 1)$ couches.

- La première couche ne présente pas d'unités de traitement (neurones), mais des unités de transfert d'information sensorielle. Elle est généralement qualifiée de couche d'entrée étant donné que son rôle consiste uniquement à transmettre les stimuli externes au réseau.
 - Les couches indexées 2 à n sont dénommées couches de neurones cachées ou plus simplement couches cachées.
 - La dernière couche d'indice $(n + 1)$ constitue, quant à elle, la couche de neurones de sortie.
- Cette dernière fournit, comme son nom l'indique implicitement, les réponses du réseau.

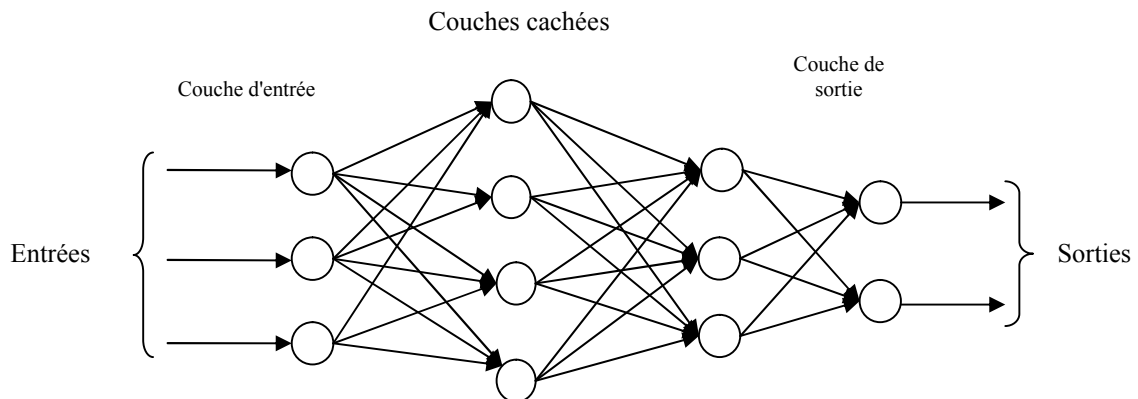


Figure III.5 Architecture d'un réseau multicouche à interconnexion totale

III.3.3.2. Réseaux dynamiques ou récurrents :

Un réseau dynamique, au sens large, désigne un réseau dont chaque neurone est en mesure de communiquer avec tout autre neurone, éventuellement avec lui-même. En pratique, un réseau récurrent se présente sous la forme d'un réseau mono- ou multicouche doté de boucles de réaction internes au sein des couches. Les sorties des neurones d'une couche donnée sont alors ré-injectées à l'entrée de ces mêmes neurones.

III.3.3.3. Réseaux topologiques :

Un réseau topologique consiste en une couche mono- ou multidimensionnelle de neurones structurés en topologie, terme qui signifie une organisation spatiale des neurones dans la couche qui détermine une relation de voisinage entre neurones [24].

III.3.4. Apprentissage et adaptation

On appelle apprentissage des réseaux de neurones artificiels la procédure itérative qui consiste à estimer les paramètres des neurones du réseau afin que celui-ci remplisse au mieux la tâche qui lui est affectée.

L'apprentissage est la caractéristique principale des réseaux de neurones et il peut se faire de différentes règles et manières [25].

a\ Apprentissage non supervisé :

Pour ce type d'apprentissage, l'adaptation des poids synaptiques n'est pas basée sur la comparaison avec une certaine sortie désirée. Dans ce cas le réseau organise lui-même les entrées qui lui sont présentées de façon à optimiser un critère de performance donné [22].

b) Apprentissage supervisé :

Dans ce type d'apprentissage, les poids des connexions sont déterminés par le biais d'algorithmes qui consistent à minimiser l'erreur quadratique entre la sortie désirée et la sortie du réseau jusqu'à l'obtention d'une performance acceptable [23].

III.4. La logique floue dans la commande à structure variable

Pour une large classe de systèmes non linéaires du deuxième ordre les contrôleurs flous sont conçus en utilisant le plan de phase déterminé par l'erreur e et le changement de cette erreur \dot{e} .

L'approche heuristique la plus utilisée dans l'établissement des règles est de diviser le plan de phase en deux demi plan par une ligne de commutation, tel que chaque demi plan est utilisé pour définir seulement les valeurs positives ou négatives de la commande. Le contrôleur ainsi défini est appelé contrôleur flou de forme diagonale [26].

Pour remédier aux problèmes de la commande par modes glissants, notamment le phénomène de réticence, et l'absence d'une méthode pour l'analyse de la stabilité dans la commande par la logique floue, et à cause de la similarité entre ces deux approches, la commande "Floue-glissante", qui combine leurs meilleures caractéristiques, est apparue dans plusieurs travaux de recherche. Cette commande a montré ses qualités par l'élimination du broutement et en proposant une méthode simple et élégante de conception de contrôleurs flous [3].

III.4.1. Synthèse de la commande hybride floue-glissante

Notre proposition est de traiter le système de contrôle flou comme un type de système à structure variable (le contrôleur flou est identique à un contrôleur à structure variable avec une bande limite).

Dans ce cas la commande u est donnée par l'équation (III.8):

$$u = u_{eq} + u_{flou} \quad (III.8)$$

Le schéma bloc de la commande est donné par la figure (III.6) :

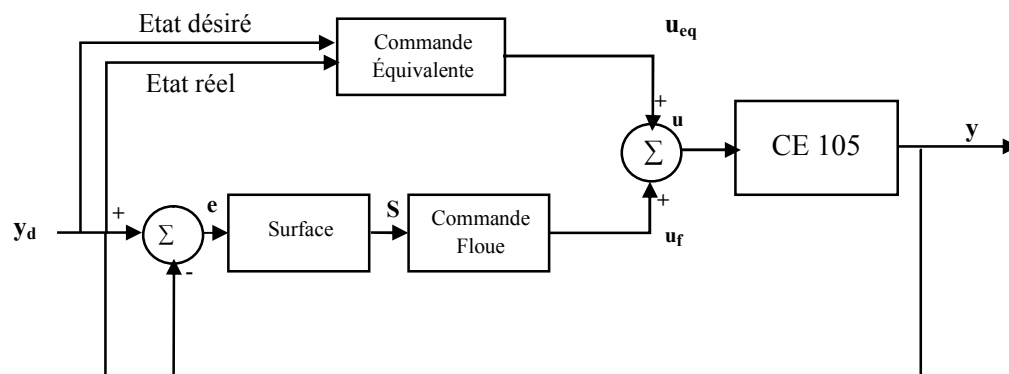


Figure III.6 Schéma bloc de la commande Hybride «floue-glissante»

L'idée de base pour la conception de ce contrôleur est qu'il est possible de faire une extension de la surface de glissement $S = 0$, vers une surface floue définie par l'expression linguistique :

$$\tilde{S} \text{ est zéro} \tag{III. 9}$$

Avec \tilde{S} la variable linguistique de S , et "zéro" est l'un de ses ensembles flous, on définit cinq sous ensembles flous NG NM EZ PM PG, tels que : NG : négatif grand ; NM : négatif moyen; EZ : environ zéro ; PM : positif moyen ; PG : positif grand [28].

Les fonctions d'appartenance des deux variables s et u , sont illustrées par la figure (III.7). On définit des fonctions d'appartenance de forme triangulaires pour la surface de glissement s et des singletons pour la commande u .

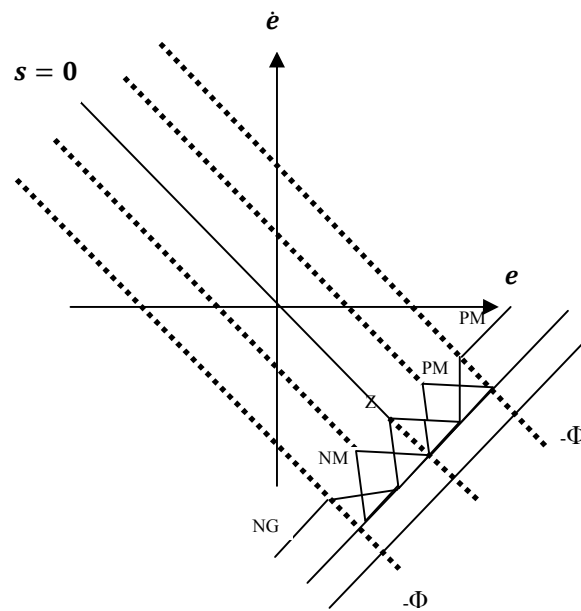


Figure III.7. Partition floue de l'espace autour de la surface de glissement

Ceci reflète le principe de la commande par mode glissant, plus particulièrement sa fonction de commutation. Par conséquent, le contrôleur flou remplacera la partie discontinue de la commande représentée par les figures (III.7) ou (III.8).

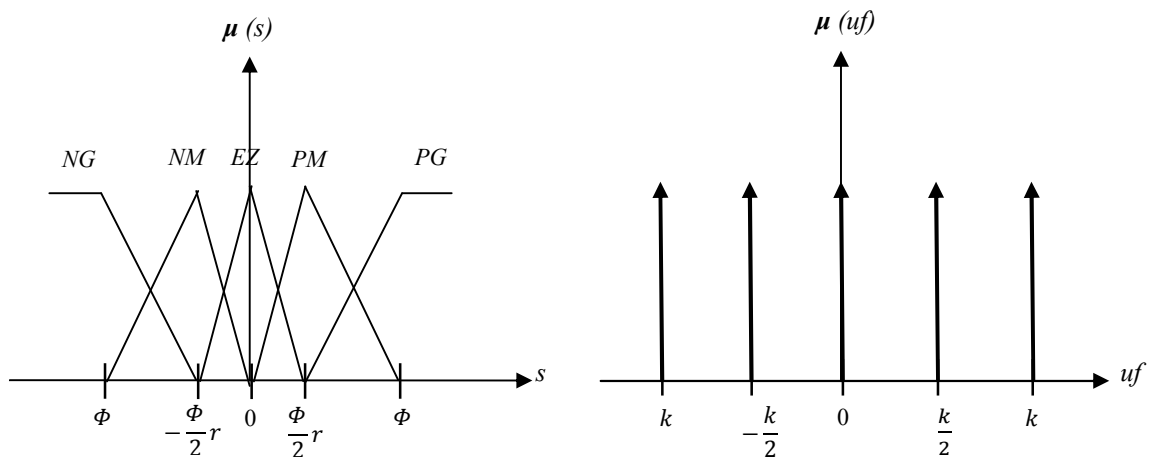


Figure III.8. Fonctions d'appartenance de l'entrée et de sortie

Nous définissons pour ce système d'inférence flou, les règles suivantes :

R1 : SI s est NG Alors u_{flou} est PG

R2 : SI s est NM Alors u_{flou} est PM

R3 : SI s est EZ Alors u_{flou} est EZ

R4 : SI s est PM Alors u_{flou} est NM

R5 : SI s est PG Alors u_{flou} est NG

On peut mettre aussi :

$$R^i: SI s \text{ est } F_{si}^i \text{ Alors } u_f \text{ est } F_u^i . \text{ Avec } i = 1, \dots, 5 \quad (\text{III. 10})$$

Nous considérons X et Y , comme étant l'espace d'entrée et de sortie des règles floues respectivement. Pour un ensemble flou arbitraire \tilde{F}_x dans X , un ensemble flou $\tilde{F}_x \circ R^i$ est défini dans l'espace Y par la règle R_i .

En utilisant la méthode d'inférence max-min, Cette méthode consiste à réaliser l'opérateur ET par la fonction Min, l'opérateur OU par la fonction Max et la conclusion Alors par la fonction Min [20].

$$u_{F_x \circ R^i}(u_{flou}) = \max_{x \in X} \left[\min \left[\mu_{\tilde{F}_x}(s), \min \left[\mu_{\tilde{F}_s^i}, \mu_{\tilde{F}_u^i}(uf) \right] \right] \right] \quad (\text{III. 11})$$

Ainsi, les sous ensembles flous et les fonctions d'appartenance sont déterminés. Il nous reste que l'étape de défuzzification pour extraire la valeur de la commande u .

Pour le cas où la forme de sous ensemble \tilde{F}_x est un singleton, on peut écrire :

$$\mu_{\tilde{F}_x} \begin{cases} 1 & \text{si } s = 0 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{III. 12})$$

pour la phase de défuzzification, on utilise la méthode de centre de gravité, ce qui nous donne :

$$u = \frac{\sum_{i=1}^5 \mu_i(s) \mu f^i}{\sum_{i=1}^5 \mu_i(s)} \quad (\text{III. 13})$$

Avec, $\mu_i(s)$ le degré d'appartenance de s au sous ensemble F_{si}^i .

Finalement, le résultat d'inférence pour tout s , s'écrit :

$$u = -K \text{sig} \left(\frac{s}{\Phi} \right) \quad (\text{III. 14})$$

$$\text{sig}(z) \begin{cases} -1 & Z < -1 \\ \frac{z+r-1}{2-z} & -1 \leq z < -\frac{r}{2} \\ \frac{z}{r} & -\frac{z}{2} \leq z < 0 \\ \frac{z}{r} & 0 \leq z < \frac{r}{2} \\ 1 & z \geq 1 \end{cases} \quad (\text{III. 15})$$

II.4.2 Résultant de simulation

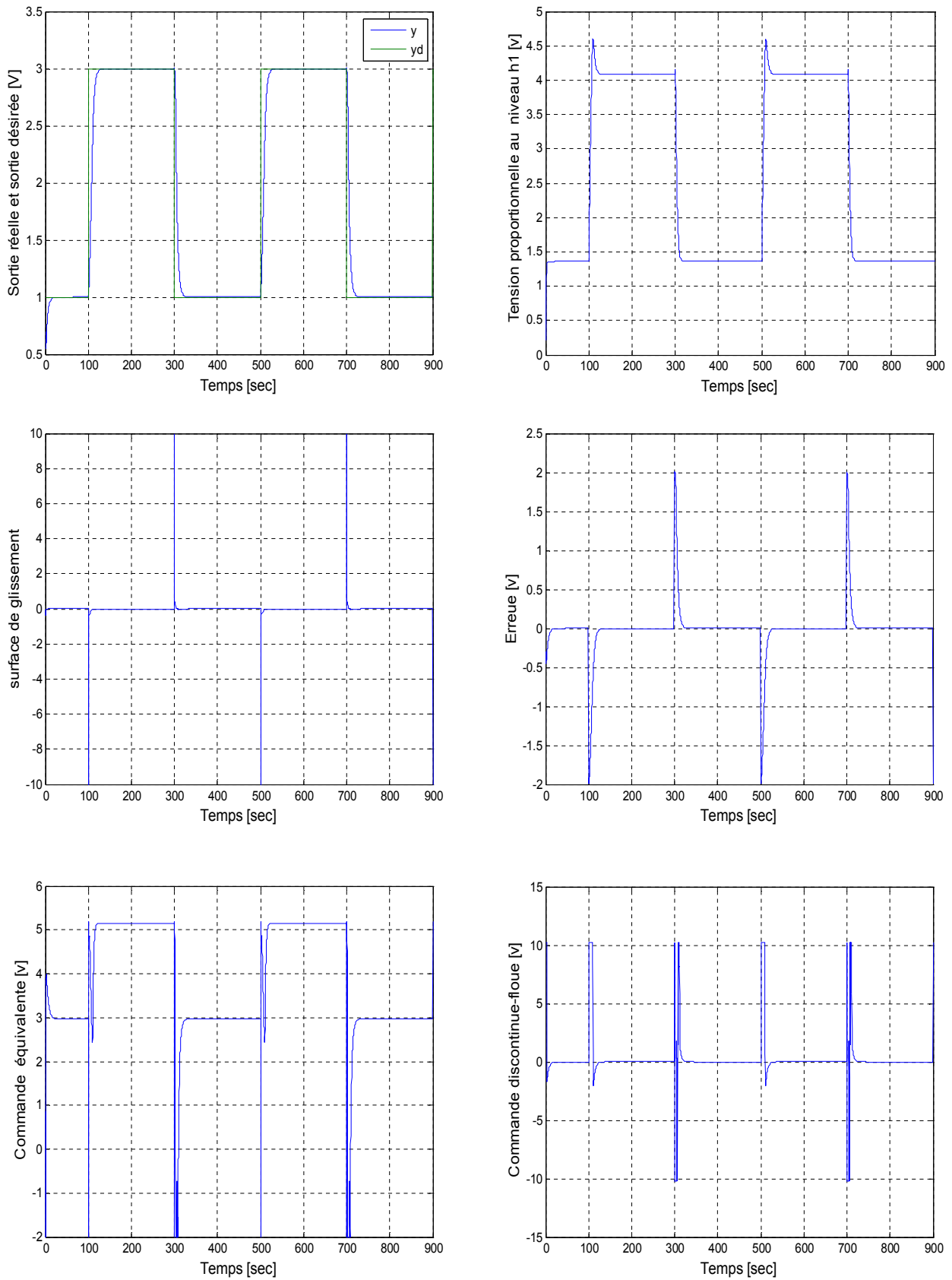


Figure III.9. Résultats de simulation de la commande floue-glissante appliquée au système CE105

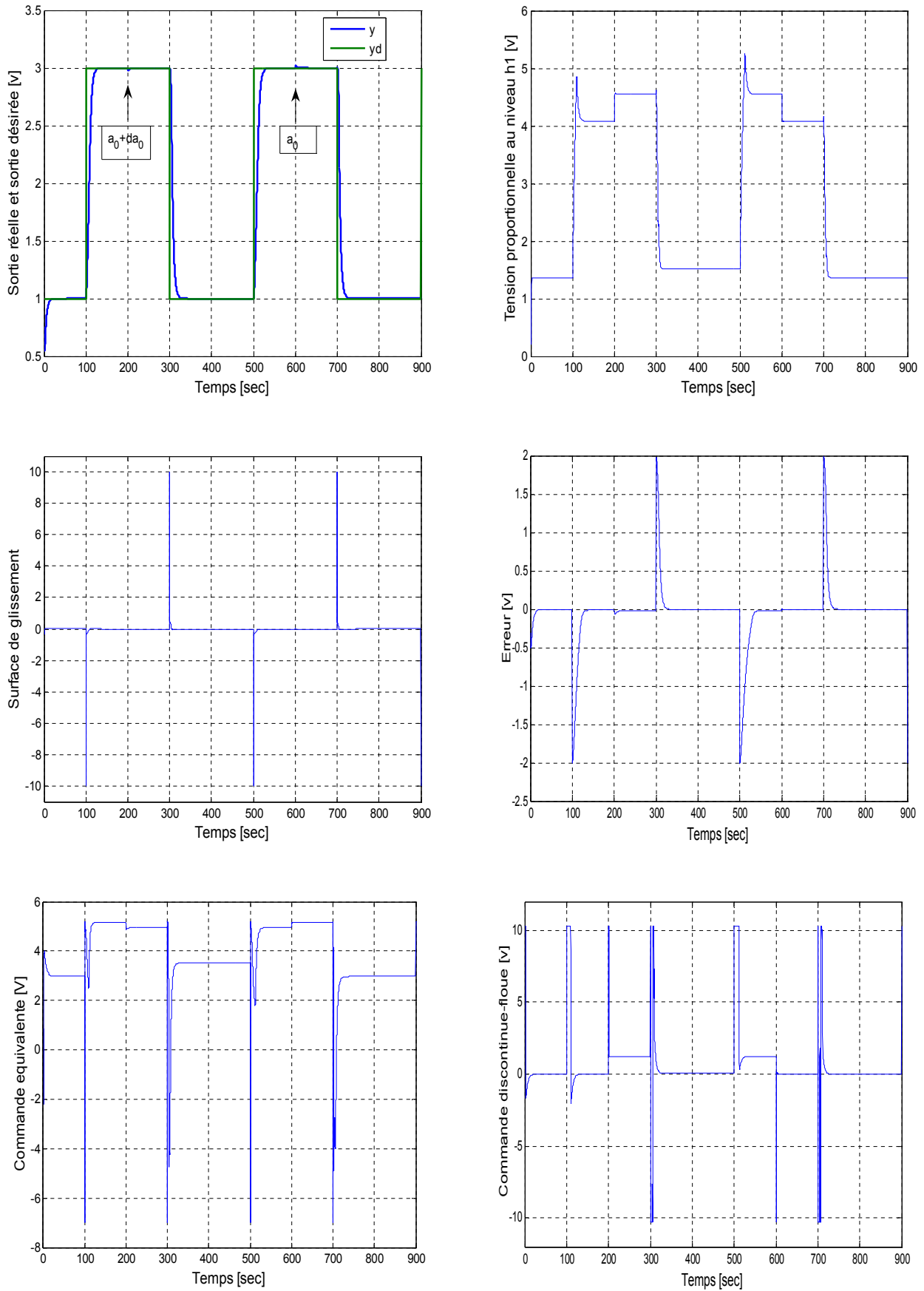


Figure III.10. Résultats de simulation de la commande Floue-glissante avec un test de robustesse

III.5. Les réseaux de neurones dans la commande à structure variable

Comme nous avons cité au chapitre II, une commande par mode de glissement est constituée une combinaison de deux composantes :

- 1) la commande équivalente ou nominale est déterminée par le modèle du système, on peut la considérer comme la valeur moyenne continue que prend la commande lors d'une commutation rapide entre deux valeurs (valeur min) et (valeur max).
- 2) La commande effective qui est ajoutée en tant que commande auxiliaire pour garantir l'attractivité de la surface de glissement [6,8].

Dans cette partie, nous présentons une nouvelle vision pour le calcul de la commande équivalente en utilisant les réseaux de neurones. En effet, les travaux de recherche sur la commande des systèmes par les réseaux de neurones sont nombreux. Une des directions privilégiées est l'utilisation des réseaux de neurones pour estimer la dynamique inverse du système à commander.

III.5.1. La commande équivalente et la dynamique inverse d'un système

Considérons un système non linéaire :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x) + g(x).u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (\text{III. 16})$$

Où $X = [x_1, x_2]^T$ le vecteur d'état, $u \in \mathcal{R}$ la commande, f et g , sont deux fonctions continues et suffisamment dérivables.

On définit pour ce système une surface de glissement non linéaire, telle que.

$$\begin{cases} \Lambda(t) = \frac{2}{1 + e^{-\mu t}} - 1 \\ \frac{d\Lambda(t)}{dt} = \frac{\mu}{2} \cdot (1 - \Lambda(t)^2) \end{cases} \quad (\text{III. 17})$$

Comme nous l'avons déjà montré dans le chapitre II, l'erreur $e = x_1 - y_r$ tend vers zéro, lorsque ($s = 0$), avec la dynamique choisie via les paramètres de la fonction. De plus, pour assurer la stabilité de point d'équilibre, on définit $V(s)$, une fonction de Lyapunov candidate, telle que :

$$V(s) = \frac{1}{2} s^2 \quad (\text{III. 18})$$

Il est bien clair que cette fonction est définie positive, $V(s = 0) = 0$ et $V(s) \geq 0 \quad \forall s \neq 0$.

Ainsi, selon la stabilité au sens de Lyapunov, le point d'équilibre ($s = 0$) est asymptotiquement stable si et seulement si : La loi de commande $u(t)$ satisfasse l'inégalité.

$$\frac{dV}{dt} < 0 \quad (\text{III. 19})$$

Dans ce but et par l'utilisation de la théorie de commande à structure variable, la commande $u(t)$ est synthétisée pour avoir

$$\frac{dV(s)}{dt} = -s^T \cdot \bar{K} \cdot \text{sign}(s) \quad (\text{III. 20})$$

Où $\bar{K} > 0$, un gain et $\text{sign}(\cdot)$ la fonction signe, telle que :

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

En égalisant la dérivée de (III.19) avec (III.20), on obtient :

$$s \cdot \frac{ds}{dt} = -s^T \cdot \bar{K} \cdot \text{sign}(s) \quad (\text{III. 22})$$

Avec

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= \ddot{e} + \dot{e} \frac{d\Lambda(t)}{dt} \Big|_{x=e} \\ &= (\dot{x}_2 - \dot{y}_r) + \dot{e} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \Lambda(e)^2) \\ &= ((f(X) + g(X) \cdot u - \dot{y}_r) + \dot{e} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \Lambda(e)^2) \\ \Rightarrow \frac{ds}{dt} &= (f(X) - \dot{y}_r) + \dot{e} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \Lambda(e)^2) + g(X) \cdot u \end{aligned} \quad (\text{III. 23})$$

Et par la substitution de (III.23) dans (III.22), on trouve

$$u = -g(X)^{-1} \cdot \left((f(X) - \dot{y}_r) + \dot{e} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \Lambda(e)^2) \right) - g(X)^{-1} \cdot \bar{K} \cdot \text{sign}(s) \quad (\text{III. 24})$$

Ou,

$$u(t) = u_{eq}(t) + \Delta u(t) \quad (\text{III. 25})$$

$$\text{Avec, } \begin{cases} u_{eq} = -g(X)^{-1} \cdot \left((f(X) - \dot{y}_r) + \dot{e} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \Lambda(e)^2) \right) \\ \text{et} \\ \Delta u = -g(X)^{-1} \cdot \bar{K} \cdot \text{sign}(s) = -K \cdot \text{sign}(s) > \left| \frac{\bar{K}}{g(X)} \right| \end{cases} \quad (\text{III. 26})$$

La commande par mode de glissement transforme un système d'équation différentielle d'ordre n à une équation différentielle d'ordre $(n - 1)$ pour les systèmes SISO et d'ordre $(n - m)$ pour les systèmes MIMO. Cette nouvelle équation de la dynamique, lorsque le régime glissant est atteint, est décrite par l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dV}{dt} < 0 \quad (\text{III. 27})$$

La résolution de (III.27) par rapport à la commande désirée u_d , nous permet décrire

$$\frac{ds(X_d, u_d, t)}{dt} = 0, \quad (\text{III. 28})$$

En tenant compte (III.23), on peut mettre

$$\frac{ds}{dt} = \left((f(X_d) - \dot{y}_r) + \dot{e} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \Lambda(e)^2) \right) + g(X_d) \cdot u_d = 0 \quad (\text{III. 29})$$

Finalement, la commande désirée (dynamique inverse du système), s'écrit par :

$$u_d = -g(X_d)^{-1} \cdot \left((f(X_d) - \dot{y}_r) + \dot{e} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \Lambda(e)^2) \right) \quad (\text{III. 30})$$

Lorsque le système est en régime glissant, les deux termes $(f(X_d), g(X_d))$ peuvent être remplacés dans (III.30) par l'état réel $(f(X), g(X))$. Par conséquent, dans le régime glissant, il y a une similarité entre la commande équivalente et la dynamique inverse du système (voir figure III.11).

$$u_d = u_{eq} = g(X)^{-1} \cdot \left((f(X) - \dot{y}_r) + \dot{e} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \Lambda(e)^2) \right) \quad (\text{III. 31})$$

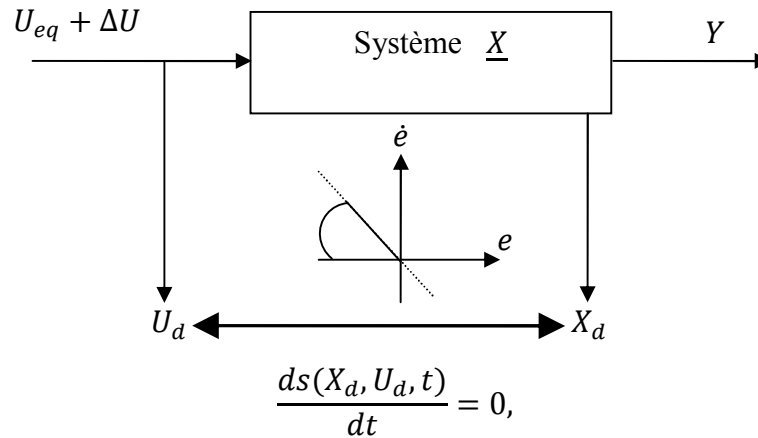


Figure III.11. La commande équivalente et la dynamique inverse du système

III.5.2. Synthèse de la commande hybride Neuro-floue-glissante

Dans cette partie, la commande effective appliquée au système hydraulique *CE105* est donnée comme suit :

$$u = u_{eq-Neuro} + u_{glis-Floue} \quad (\text{III. 32})$$

Avec $u_{glis-Floue}$ est le terme de correction $u_{eq-Neuro}$ une commande calculée par un réseau de neurones de l'architecture $\eta_{3,6,1}$. La figure III.12 illustre cette structure de commande.

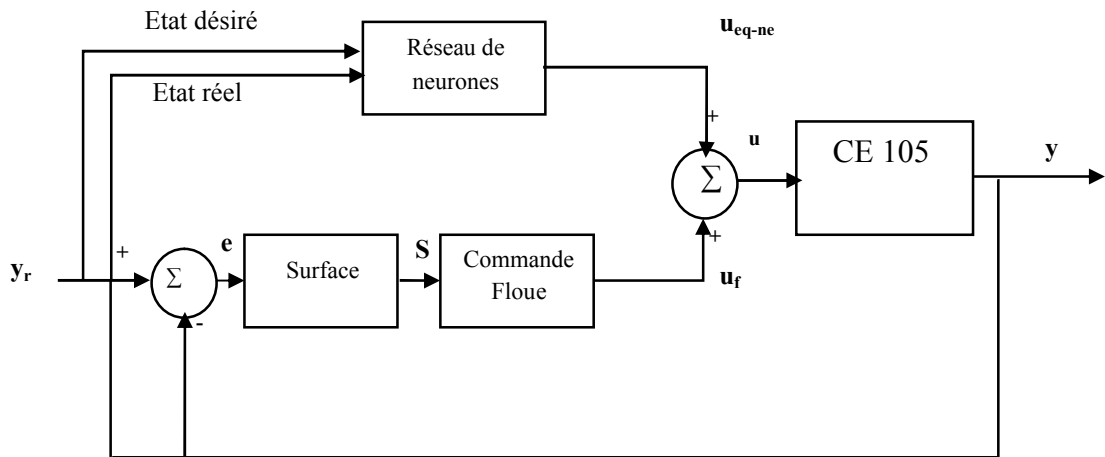


Figure III.12. Schéma bloc de la commande Neuro-floue-glissante appliquée au système CE105

Structure du réseau de neurones utilisé :

Trois neurones dans la couche d'entrée et six neurones dans la couche cachée et un neurone dans la couche de sortie $\eta_{3,6,1}$ avec l'algorithme de rétropropagation de la descente du gradient. La sortie du réseau est la commande équivalente estimée et les entrées sont déterminées à partir de l'équation de la commande équivalente.

$$z = [h1, h2, e] \quad (\text{III. 33})$$

Les différentes équations qui décrivent cette architecture neuronale sont :

$$\begin{cases} Y_{net_i} = \sum_{i=1}^3 W_{Z_{i,j}} \cdot z_i \\ j = 1:6 \\ Y_{out_j} = g(Y_{net_i}) \end{cases} \quad (\text{III. 34})$$

$$\begin{cases} U_{net} = \sum_{j=1}^6 W_{y_j} \cdot Y_{out_j} \\ U_{out} = g(U_{net}) \\ U_{eq-Neuro} = \hat{U} eq(t) = Keq \cdot U_{out} \end{cases} \quad (\text{III. 35})$$

Avec $g(\cdot)$ la fonction d'activation, donnée par :

$$g(x) = \frac{2}{1 + e^{-x}} - 1 \quad (\text{III. 36})$$

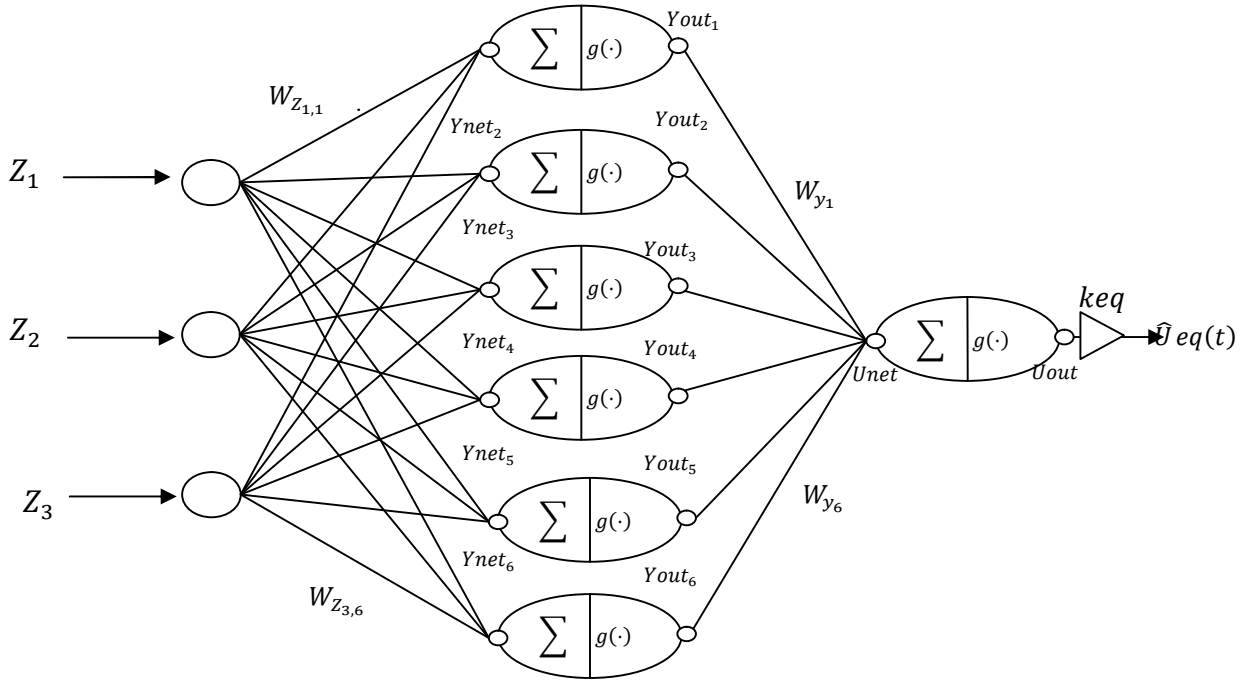


Figure III.13. Réseau de neurones utilisé pour calculer la commande équivalente pour le système CE105

Dans ce cas, le critère E est donné par :

$$E = \frac{1}{2} \cdot (U_{eq} - \hat{U}_{eq}(t))^2 \tag{III. 37}$$

Les lois d'adaptation des poids sont développées de telle sorte que le critère E soit minimal.

$$\begin{cases} W_{y_j}(t) = W_{y_j}(t - 1) - \alpha \cdot \frac{\partial E}{\partial W_{y_j}} \\ W_{z_{ij}}(t) = W_{z_{ij}}(t - 1) - \alpha \cdot \frac{\partial E}{\partial W_{z_{ij}}} \end{cases} \tag{III. 38}$$

Avec $\alpha > 0$ est le taux d'apprentissage.

L'adaptation de W_{y_j}

$$W_{y_j}(t) = W_{y_j}(t - 1) - \alpha \cdot \frac{\partial E}{\partial W_{y_j}} \tag{III. 39}$$

$$\frac{\partial E}{\partial W_{y_j}} = \frac{\partial E}{\partial U_{net}} \cdot \frac{\partial U_{net}}{\partial W_{y_j}} \tag{III. 40}$$

à partir de l'équation (III.35), on peut mettre :

$$\frac{\partial E}{\partial W_{y_j}} = \frac{\partial E}{\partial U_{net}} \cdot Y_{out_j} \tag{III. 41}$$

$$= \left[\frac{\partial E}{\partial \widehat{U}_{eq}} \cdot \frac{\partial \widehat{U}_{eq}}{\partial U_{net}} \right] \cdot Y_{out_j} \quad (\text{III. 42})$$

$$= -[(U_{eq} - \widehat{U}_{eq}) \cdot K_{eq} \cdot g'(U_{net})] \cdot Y_{out_j} \quad (\text{III. 43})$$

$$\frac{\partial E}{\partial W_{y_j}} = - \left[(U_{eq} - \widehat{U}_{eq}) \cdot K_{eq} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - g(U_{net})^2) \right] \cdot Y_{out_j} \quad (\text{III. 44})$$

Finalement on trouve,

$$W_{y_j}(t) = W_{y_j}(t-1) + \frac{\alpha}{2} \cdot [(U_{eq} - \widehat{U}_{eq}) \cdot K_{eq} \cdot (1 - g(U_{net})^2)] \cdot Y_{out_j} \quad (\text{III. 45})$$

L'adaptation de $W_{z_{ij}}$

$$W_{z_{ij}}(t) = W_{z_{ij}}(t-1) - \alpha \cdot \frac{\partial E}{\partial W_{z_{ij}}} \quad (\text{III. 46})$$

$$\frac{\partial E}{\partial W_{z_{ij}}} = \frac{\partial E}{\partial Y_{net_j}} \cdot \frac{\partial Y_{net_j}}{\partial W_{z_{ij}}} \quad (\text{III. 47})$$

à partir de l'équation (III.34), on peut écrire,

$$\frac{\partial E}{\partial W_{z_{ij}}} = \frac{\partial E}{\partial Y_{net_j}} \cdot z_i \quad (\text{III. 48})$$

$$= \left[\frac{\partial E}{\partial Y_{out_j}} \cdot \frac{\partial Y_{out_j}}{\partial Y_{net_j}} \right] \cdot z_i \quad (\text{III. 49})$$

$$= \left[\frac{\partial E}{\partial Y_{out_j}} \right] \cdot g'(Y_{net_j}) \cdot z_i \quad (\text{III. 50})$$

Avec,

$$\frac{\partial E}{\partial Y_{out_j}} = \frac{\partial E}{\partial \widehat{U}_{eq}} \cdot \frac{\partial \widehat{U}_{eq}}{\partial U_{net}} \cdot \frac{\partial U_{net}}{\partial Y_{out_j}} \quad (\text{III. 51})$$

$$= -(U_{eq} - \widehat{U}_{eq}) \cdot K_{eq} \cdot g'(U_{net}) \cdot W_{y_j}$$

$$= -\frac{1}{2} \cdot (U_{eq} - \widehat{U}_{eq}) \cdot K_{eq} \cdot (1 - g(U_{net})^2) \cdot W_{y_j} \quad (\text{III. 52})$$

Finalement,

$$\frac{\partial E}{\partial W_{z_{ij}}} = -\frac{1}{4} \cdot [(U_{eq} - \widehat{U}_{eq}) \cdot K_{eq} \cdot (1 - g(U_{net})^2) \cdot W_{y_j}] \cdot (1 - g(Y_{net})^2) \cdot z_i \quad (\text{III. 53})$$

Comme pour ce cas, la valeur de l'écart $(U_{eq} - \widehat{U}_{eq})$ est remplacée par la commande de correction $u_{glis-floue}$. Donc, le critère E peut se voir comme :

$$E = \frac{1}{2} \cdot (u_{glis-floue})^2 \quad (\text{III. 54})$$

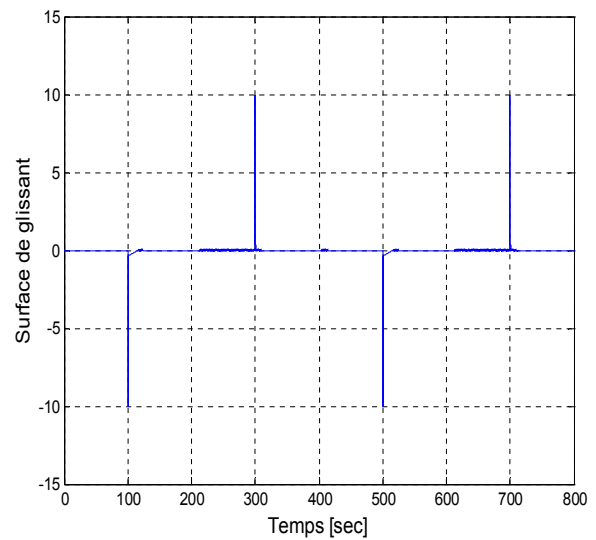
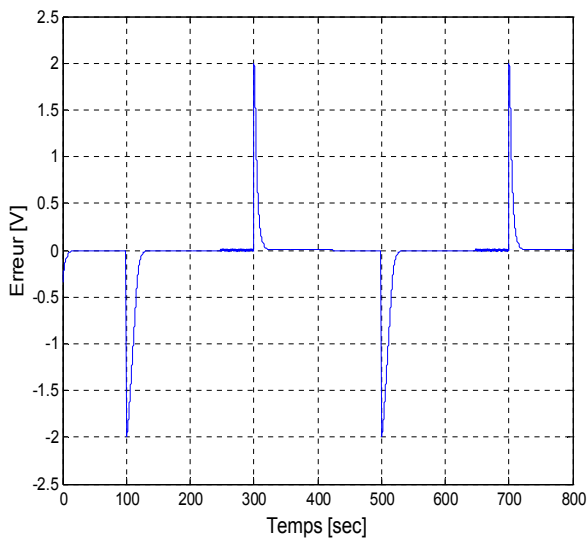
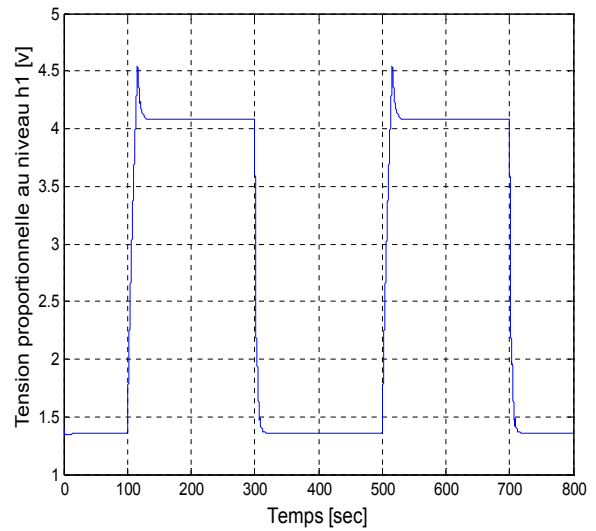
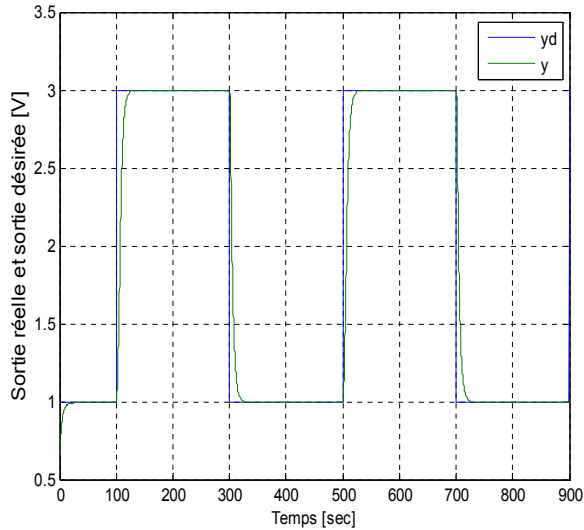
En résumé : les lois d'adaptations des poids dans la couche de sorties

$$\begin{cases} W_{y_j}(t) = W_{y_j}(t - 1) - \alpha \cdot \frac{\partial E}{\partial W_{y_j}} \\ \text{et} \\ \frac{\partial E}{\partial W_{y_j}} = - \left[u_{glis-floue} \cdot Keq \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - g(U_{net})^2) \right] \cdot Y_{out_j} \end{cases} \quad \text{(III. 55)}$$

Les lois d'adaptations des poids dans la couche cachée :

$$\begin{cases} W_{z_{ij}}(t) = W_{z_{ij}}(t - 1) - \alpha \cdot \frac{\partial E}{\partial W_{z_{ij}}} \\ \text{et} \\ \frac{\partial E}{\partial W_{z_{ij}}} = - \frac{1}{4} \cdot [u_{glis-floue} \cdot Keq \cdot (1 - g(U_{net})^2) \cdot W_{y_j}] \cdot (1 - g(Y_{net})^2) \cdot z_i \end{cases} \quad \text{(III. 56)}$$

III.5.3. Résultant de simulation



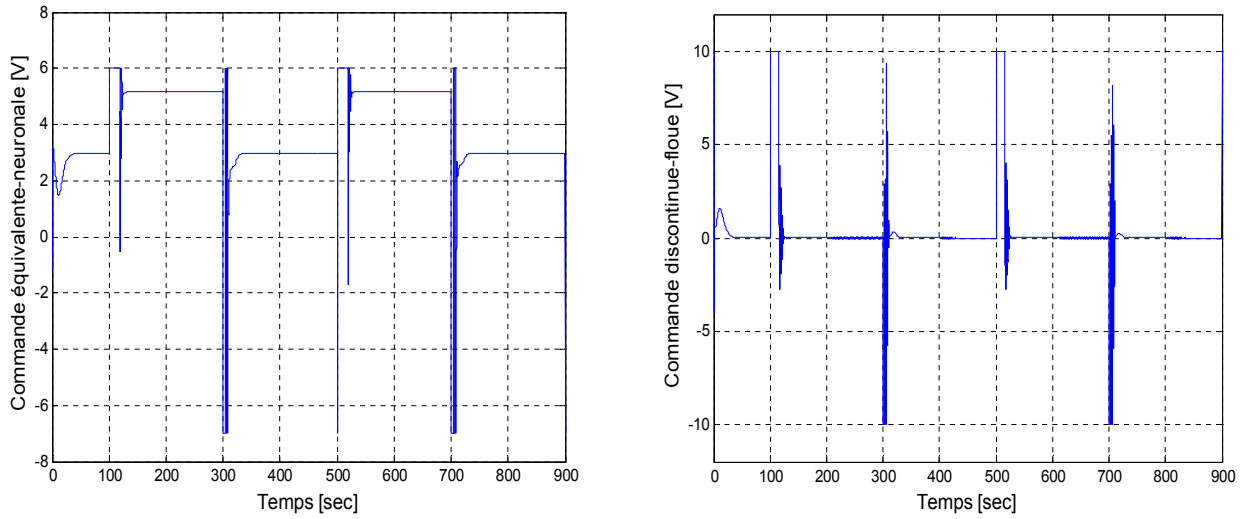
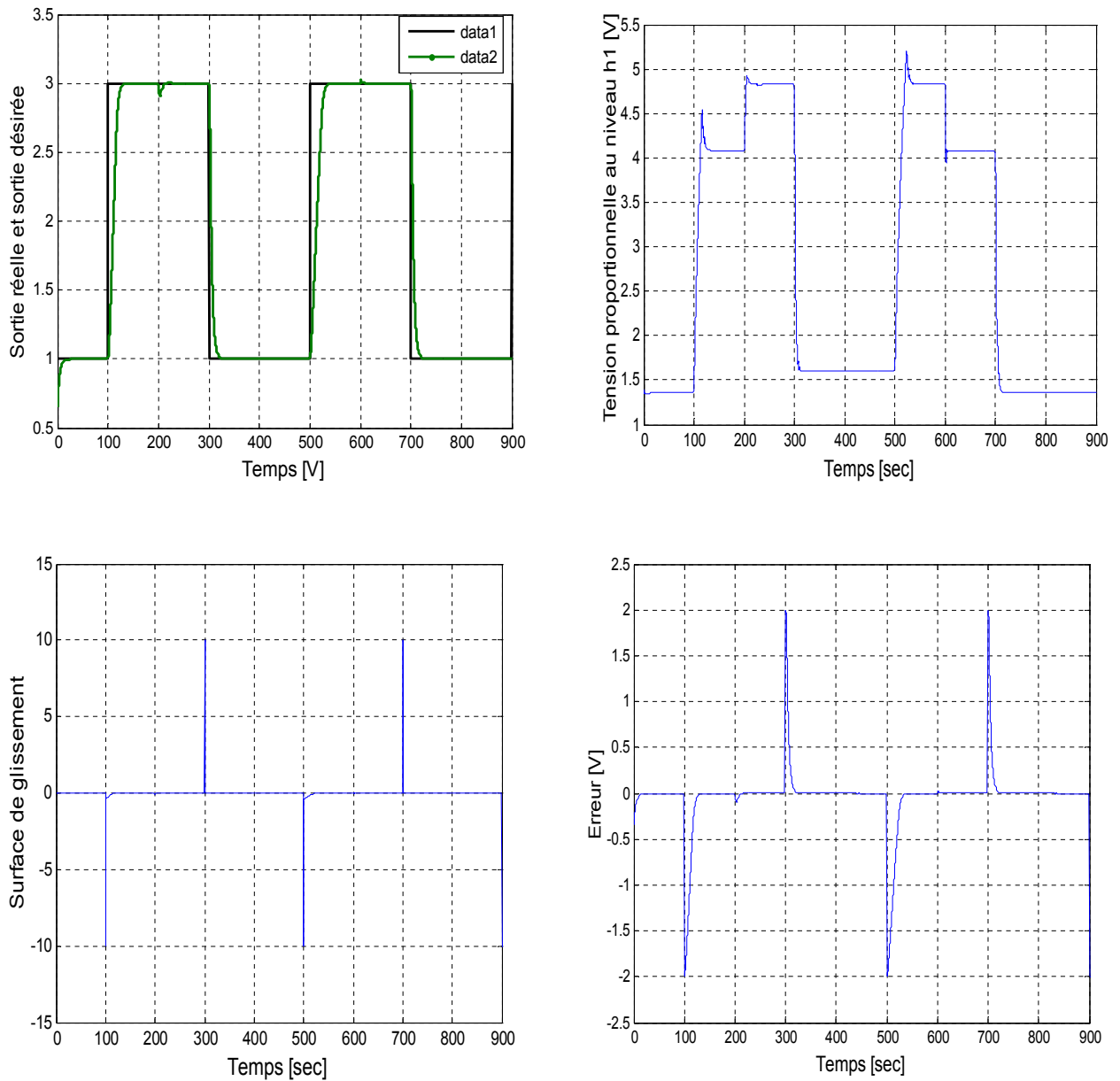


Figure III.14. Résultats de simulation pour la commande Neuro-floue-glissante appliquée au système CE105



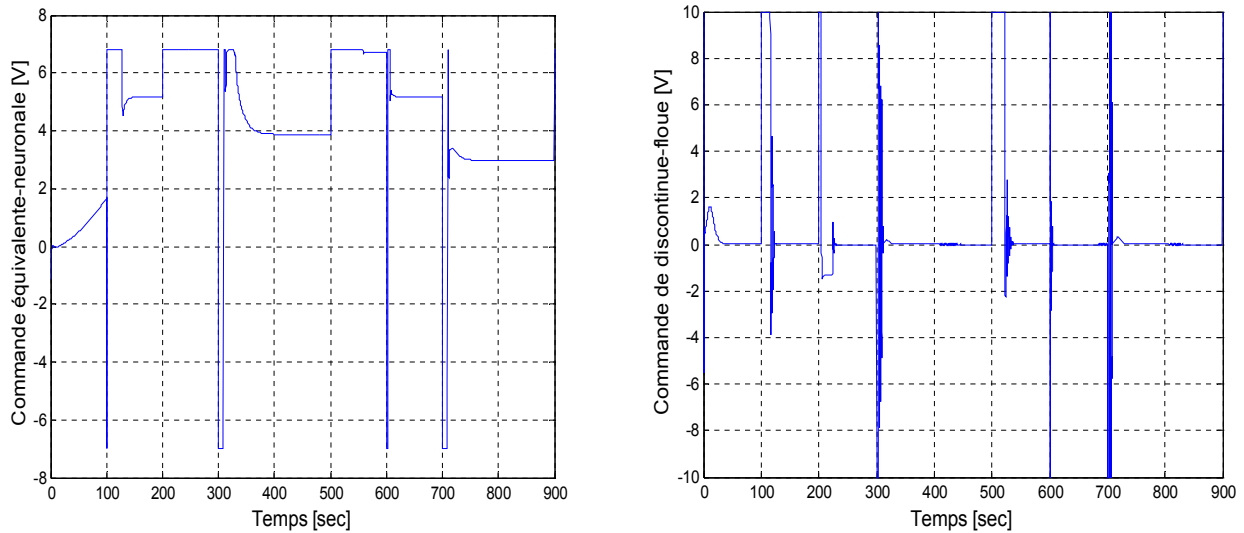


Figure III.15. Résultats de simulation pour la commande Neuro-floue-glissante avec test de robustesse

III.5.4. Commentaires sur les résultats

Pour le cas du système hydraulique *CE105*, nous avons appliqué, en premier lieu, une commande Floue-glissante dont le but était de montrer l'intérêt de faire une hybridation entre la commande floue et la commande glissante pour remédier au problème de broutement. Les résultats de simulations sont montrés sur les figures III.9, III.10. En effet, nous constatons que la commande effective appliquée au système est moins oscillatoire que celle calculée par mode de glissement tout seul. De plus, le broutement sur les états du système devient plus faible.

Les figures III.14, III.15, présentent les résultats issus de l'application de la commande Neuro-floue-glissante. Comme il est montré sur ces figures, les performances en régime transitoire sont acceptables. Par exemple, le temps de réponse est environ 25 sec, ce qui est normal par rapport à la dynamique lente qui caractérise les systèmes hydrauliques. En outre, la commande synthétisée est robuste vis-à-vis les erreurs de modélisations et les variations paramétriques.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre les deux commandes floue-glissante et Neuro-floue-glissante a été développée et testée aussi bien en simulation. Ceci a permis, en premier temps, Nous avons appliquée la commande floue-glissante au système hydraulique *CE105* à réservoirs couplés. L'objectif de cette commande hybride est d'établir une passerelle entre la commande floue dont les performances incontestables la rendent de plus en plus convoitée par les chercheurs, et la commande par mode de glissement qui prouve des propriétés de stabilité et d'invariance par rapport aux perturbations paramétriques et extérieures.

En deuxième temps, Nous avons appliquée la commande Neuro-floue-glissante sur ce système. Les avantages et les performances de cette commande, tels que le calcul de la commande équivalente sans connaître explicitement le modèle du système à commander et la diminution du phénomène de broutement ainsi que la robustesse ont bien été mises en évidence.

Pour cette commande, La dynamique désirée du système en boucle fermée est définie par les surfaces de glissement non linéaire proposées au préalable. Dans le chapitre suivant on fait appel à la commande récursive backstepping pour trouver une méthode systématique pour la synthèse des surfaces de glissement.

IV.MODE DE GLISSEMENT ET COMMANDE BACKSTEPPING

IV.1. Introduction

Dans le but de synthétiser les surfaces de glissement de manière systématique, on fait appel à l'approche de la commande réursive backstepping. En effet, cette combinaison offre au concepteur d'un contrôleur une méthode intéressante pour choisir une surface de glissement en tenant compte de la dynamique du système à commander [4].

La technique de backstepping a été développée au début des années 90 (Kokotovic, 1992). L'arrivée de la commande par backstepping a donné un nouveau souffle à la commande des systèmes non linéaires, qui malgré les grands progrès réalisés, il manquait des approches générales. qui peut s'appliquer à un grand nombre de systèmes non linéaires [28]. Cette technique offre une méthode systématique, en combinant la notion de contrôle de Lyapunov avec une procédure réursive de design. Cela permet de surmonter l'obstacle de la dimension et d'exploiter la souplesse de conception pour résoudre les problèmes de commande des systèmes d'ordre plus élevé, ne faisant pas nécessairement appel à la linéarisation [29].

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la commande non linéaire commande glissante-backstepping. On traitera d'abord les principes fondamentaux de cette commande, par la suite nous les appliquerons au robot PUMA 560.

IV.2. Méthodes d'analyse de la stabilité des systèmes

L'étude de la stabilité des systèmes non linéaire est très complexe. L'approche de Lyapunov est l'approche la plus utilisée pour étudier ce problème. On distingue deux méthodes de Lyapunov pour l'analyse de la stabilité :

- La méthode de linéarisation.
- La méthode directe.

La première concerne la stabilité locale autour d'un point d'équilibre. Par contre, la deuxième détermine la stabilité des systèmes en construisant une fonction scalaire des états du système dont on examinera la variation temporelle.

On s'intéresse par la méthode directe de Lyapunov car la commande par backstepping est basée sur cette méthode [2].

IV.2.1. La stabilité locale par la méthode de linéarisation

Cette méthode analyse la stabilité locale des systèmes non linéaires, le comportement du système non linéaire est le même que son approximation linéaire pour des petites variations autour du point d'équilibre.

Considérant le système régi par l'équation suivante : $\dot{x} = f(x)$, $x \in \mathcal{R}^n$ où $f(\cdot)$ est une fonction non linéaire, le développement en série de Taylor de ce système autour du point d'équilibre $x_e = 0$ est :

$$\dot{x} = f(x_e) + (x - x_e) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{x=x_e} + h(x, t) \quad (\text{IV. 1})$$

$h(x, t)$ regroupe les termes d'ordre élevé de x . Considérons maintenant le développement en série de Taylor d'ordre un de f avec $f(0) = 0$, car le point d'équilibre $x_e = 0$. Alors, l'approximation linéaire devient :

$$\dot{x} = A \cdot x \quad \text{Tel que} \quad A = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (\text{IV. 2})$$

Considérant maintenant le système régit par l'équation suivante:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad \text{Tel que} \quad f(0,0) = 0 \quad (\text{IV. 3})$$

Alors son approximation linéaire devient $\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u$, tel que

$$A = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{(x_e=0, u=0)}, \quad B = \left(\frac{\partial f}{\partial u} \right)_{(x_e=0, u=0)} \quad (\text{IV. 4})$$

Théorème IV.1 : Si le système linéaire est stable (les valeurs propres de A sont à partir réelle négative), alors le point d'équilibre est asymptotiquement stable pour le système non linéaire considéré.

IV.2.2. Méthode direct de Lyapunov

Pour conclure quant à la stabilité d'un système, il suffit d'examiner les variations d'une certaine fonction scalaire dite de Lyapunov sans avoir besoin de la solution explicite du système. C'est précisément le point fort de cette méthode car l'équation du mouvement de $x(t)$ n'a pas à être résolu pour caractériser l'évolution de la solution (car en dehors des systèmes linéaires, la détermination des solutions explicites est difficile voire impossible) [30].

La philosophie de cette méthode n'est que l'extension mathématique d'un phénomène physique observé, car les systèmes mécaniques et électriques perdent de l'énergie pour se stabiliser au point d'équilibre [4].

IV.2.2.1. Théorème de Lyapunov

La méthode directe de Lyapunov (ou la méthode des fonctions de Lyapunov) est dérivée du critère énergétique de stabilité en appliquant ce critère indépendamment du concept d'énergie, on remplace alors l'énergie du système par une « fonction de Lyapunov » qui est définie positive (comme l'énergie). Soit le système autonome :

$$\dot{x} = f(x), x_e = 0 \quad (\text{IV. 5})$$

Ce système aura un point d'équilibre $x_e = 0$, globalement asymptotiquement stable, s'il existe une fonction scalaire $V(x)$ continue avec une dérivée partielle par rapport au temps $\dot{V}(x)$ continue ayant les propriétés suivantes :

1. $V(0) = 0$.
2. $V(x) > 0, \quad \forall x \neq 0$.

3. $\lim_{\|x\| \rightarrow \infty} V(x) = \infty$ (radialement non bornée).
4. $\dot{V}(x) < 0 \quad \forall x \neq 0.$

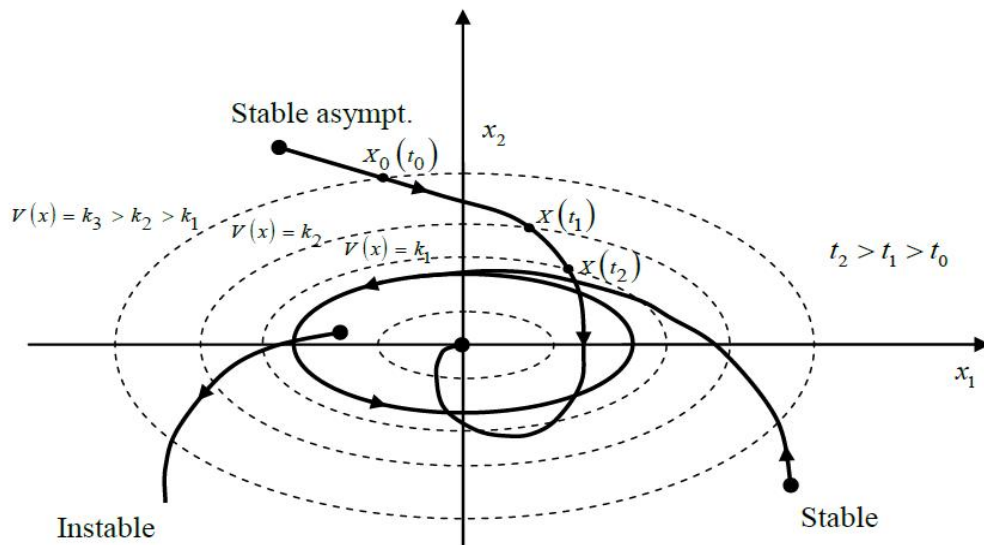


Figure IV.1. Interprétation géométrique du théorème de Lyapunov

IV.2.2.2. La synthèse de la commande par la méthode directe de Lyapunov

Dans les paragraphes précédents, nous avons étudié la stabilité des systèmes où on a supposé implicitement que la loi de commande a été choisie et notre but était de vérifier la stabilité du système avec cette loi de commande, mais le problème dans cette synthèse est comment trouver cette commande qui stabilisera le système.

Nous allons présenter une méthodologie qui combine entre la recherche de la fonction de Lyapunov et la loi stabilisante. En général, il existe deux concepts pour l'application de la méthode directe de Lyapunov pour la synthèse d'une commande stable :

1^{ère} concept : On suppose que la loi de commande existe et on cherche la fonction de Lyapunov.

2^{ème} concept : Cette fois si, on fait un choix sur $V(x)$, la fonction de Lyapunov candidate, et on cherche la loi de commande qui rend cette fonction candidate la fonction de Lyapunov réelle.

Dans la plupart des théorèmes et des lemmes de la stabilité au sens de Lyapunov, l'existence de la fonction de Lyapunov était assumée et l'objectif était de déterminer la stabilité de ces systèmes. Mais dans la plupart de cas, la recherche de cette fonction est très difficile. Dans le paragraphe suivant, nous présenterons la notion du « *backstepping* » qui nous offre une solution à ce problème [2].

IV.3. Technique de la commande par backstepping

La conception d'un contrôleur pour un système non linéaire où le vecteur d'état est de dimension élevée, peut souvent s'avérer une tâche difficile, voire impossible. La technique du backstepping offre une méthode systématique pour répondre à ce type de problème.

L'idée de base de la commande de type Backstepping est de rendre les systèmes bouclés équivalents à des sous-systèmes d'ordre un en cascade stable au sens de Lyapunov, ce qui leur confère des qualités de robustesse et une stabilité globale asymptotique. En d'autres termes, c'est une méthode multi-étapes. A chaque étape du processus, une commande virtuelle est ainsi générée pour assurer la convergence du système vers son état d'équilibre. Cela peut être atteint à partir des fonctions de Lyapunov qui assurent pas à pas la stabilisation de chaque étape de synthèse [31,28].

Algorithme de base

Pour ce faire, on considère le cas des systèmes non linéaires de la forme suivante :

$$\dot{x}_1 = f_1^T(x_1)\vartheta + g_1(x_1)x_2 \quad (\text{IV. 6})$$

$$\dot{x}_2 = f_2^T(x_1, x_2)\vartheta + g_2(x_1, x_2)x_3 \quad (\text{IV. 7})$$

$$\dot{x}_3 = f_3^T(x_1, x_2, x_3)\vartheta + g_3(x_1, x_2, x_3)u \quad (\text{IV. 8})$$

Le vecteur des paramètres ϑ est supposé connu, les f_i et g_i sont des fonctions non linéaires connues. Le système étant du troisième ordre, le design s'effectue en trois étapes.

Etape 1

On considère d'abord l'équation (IV. 6), où la variable d'état x_2 est traitée comme une commande (fictive) et l'on définit la première valeur désirée :

$$(x_1) \triangleq \alpha_0 = y_r \quad (\text{IV. 9})$$

La première variable d'erreur se définit par,

$$e_1 = x_1 - \alpha_0 \quad (\text{IV. 10})$$

Avec ces variables, le système (IV. 9) s'écrit

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{\alpha}_0 = f_1^T\vartheta + g_1x_2 - \dot{\alpha}_0 \quad (\text{IV. 11})$$

On prend la fonction de Lyapunov suivante,

$$V_1(e_1) = \frac{1}{2}e_1^2 \quad (\text{IV. 12})$$

Sa dérivée, est donnée par,

$$\dot{V}_1 = e_1\dot{e}_1 = e_1[f_1^T\vartheta + g_1x_2 - \dot{\alpha}_0] \quad (\text{IV. 13})$$

Un choix judicieux de x_2 rendrait \dot{V}_1 négative et assurerait la stabilité de l'origine du sous-système. Prenons comme valeur de x_2 , la fonction, tel que :

$$[f_1^T\vartheta + g_1x_2 - \dot{\alpha}_0]e_1 = -k_1e_1 \quad (\text{IV. 14})$$

Où $k_1 > 0$ est un paramètre de design. Cela donne

$$(x_2)_d = \frac{1}{g_1} [-k_1 e_1 - f_1^T \vartheta + \dot{\alpha}_0] \quad (\text{IV. 15})$$

Donc la dérivée de première fonction de Lyapunov s'écrit,

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 \leq 0 \quad (\text{IV. 16})$$

Ce qui assure la stabilité asymptotique de (IV. 11)

Etape 2

On considère le sous-système (IV. 7), (IV. 8) et l'on définit la nouvelle variable d'erreur

$$e_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (\text{IV. 17})$$

Qui représente l'écart entre la variable d'état x_2 et sa valeur désirée α_1 . A cause du fait que x_2 ne peut être forcée à prendre instantanément une valeur désirée, en l'occurrence α_1 , l'erreur e_2 , n'est pas instantanément, nulle. Le design dans cette étape consiste, alors, à la forcer à s'annuler avec une certaine dynamique, choisie préalablement.

Les équations du système à commander, dans l'espace (e_1, e_2) , s'écrivent :

$$\dot{e}_1 = f_1^T \vartheta - \dot{\alpha}_0 + g_1(e_2 + \alpha_1) \quad (\text{IV. 18})$$

$$\dot{e}_2 = f_2^T \vartheta - \dot{\alpha}_1 + g_2 x_3 \quad (\text{IV. 19})$$

Pour lequel on choisit comme fonction de Lyapunov,

$$V_2(e_1, e_2) = V_1 + \frac{1}{2} e_2^2 \quad (\text{IV. 20})$$

Cette dernière à pour fonction dérivée, le long de la solution de (IV. 14), (IV. 15)

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(e_1, e_2) &= \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 \\ &= e_1 [f_1^T \vartheta - \dot{\alpha}_0 + g_1(e_2 + \alpha_1)] + e_2 [f_2^T \vartheta - \dot{\alpha}_1 + g_2 x_3] \\ &= e_1 [f_1^T \vartheta - \dot{\alpha}_0 + g_1 \alpha_1] + e_2 [f_2^T \vartheta - \dot{\alpha}_1 + g_2 x_3 + g_1 e_1] \\ &= -k_1 e_1^2 + e_2 [f_2^T \vartheta - \dot{\alpha}_1 + g_2 x_3 + g_1 e_1] \end{aligned} \quad (\text{IV. 21})$$

Le choix de x_3 devient évident. Ce dernier est donné par,

$$(x_3)_d = \alpha_2 = \frac{1}{g_2} [\dot{\alpha}_1 - f_2^T \vartheta - g_1 e_1 - k_2 e_2] \quad (\text{IV. 22})$$

Pour $k_2 > 0$ on trouve que,

$$\dot{V}_2 \leq -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 \leq 0 \quad (\text{IV. 23})$$

D'où la stabilité asymptotique de l'origine.

Etape 3

Le système (IV. 7), (IV. 8) est maintenant considéré dans sa globalité. La variable d'erreur est définie,

$$e_3 = x_3 - \alpha_2 \quad (\text{IV. 24})$$

Ce qui permet d'écrire les équations du système d'erreurs (e_1, e_2, e_3) ,

$$\dot{e}_1 = f_1^T \vartheta - \dot{\alpha}_0 + g_1(e_2 + \alpha_1) \quad (\text{IV. 25})$$

$$\dot{e}_2 = f_2^T \vartheta - \dot{\alpha}_1 + g_2(e_3 + \alpha_2) \quad (\text{IV. 26})$$

$$\dot{e}_3 = f_3^T \vartheta - \dot{\alpha}_2 + g_3 u \quad (\text{IV. 27})$$

Avec comme fonction de Lyapunov,

$$V_3(e_1, e_2, e_3) = V_2 + \frac{1}{2} e_3^2 \quad (\text{IV. 28})$$

Sa dérivée devient,

$$\begin{aligned} \dot{V}_3(e_1, e_2, e_3) &= \dot{V}_2 + e_3 \dot{e}_3 \\ &= -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 + e_3 [f_3^T \vartheta - \dot{\alpha}_2 + g_3 u + g_2 e_2] \end{aligned} \quad (\text{IV. 29})$$

A présent, on est en présence de la vraie commande (qui contrairement à x_2 et x_3 peut être instantanément forcée à prendre n'importe quelle valeur désirée, physiquement réalisable). Un bon choix de celle-ci est donné par :

$$u = \frac{1}{g_3} [\dot{\alpha}_2 - f_3^T \vartheta - g_2 e_2 - k_3 e_3] \quad (\text{IV. 30})$$

Où $k_3 > 0$

Avec ce choix, on a :

$$V_3(e_1, e_2, e_3) \leq -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 \leq 0 \quad (\text{IV. 31})$$

Ceci traduit la stabilité, en boucle fermée, du système original (IV. 7), (IV. 9) et le réglage à zéro de l'erreur de poursuite [29].

IV.4. Application au robot PUMA 560

Dans cette partie, on s'intéresse à l'application de la commande hybride glissante-backstepping sur le modèle dynamique du robot. En effet, cette combinaison a deux avantages, d'une part le backstepping nous offre une méthode systématique pour synthétiser les surfaces de glissement, et d'autre part, le design du mode glissant s'avère intéressant pour simplifier les étapes nécessaires pour la synthèse d'une commande backstepping stabilisante [4].

Le modèle du robot sans tenir compte du couple dû à la charge, est donné par :

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = u \quad (\text{IV. 32})$$

Le vecteur des accélérations de ce modèle est défini comme suit :

$$\ddot{q} = -M(q)^{-1} \cdot (V_m(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)) + M(q)^{-1} \cdot u \quad (\text{IV. 33})$$

IV.4. 1. La synthèse de la loi de commande

On procède en deux étapes pour synthétiser une loi de commande backstepping stabilisante pour le robot PUMA 560.

Etape 1 : Dans cette étape, on définit la première variable d'erreur z_1 comme étant l'erreur de poursuite, telle que

$$z_1 = q - q_d \quad (\text{IV. 34})$$

Avec,
$$\dot{z}_1 = \dot{q} - \dot{q}_d \equiv ev \quad (\text{IV. 35})$$

On définit la première fonction de Lyapunov V_1 , telle que

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^T \cdot z_1 \quad (\text{IV. 36})$$

Sa dérivée le long de la solution de (IV. 35), est donnée par

$$\dot{V}_1 = z_1^T [ev] \quad (\text{IV. 37})$$

Selon la stabilité au sens de Lyapunov, l'origine $z_1 = 0$ du système (IV. 35) est asymptotiquement stable lorsque $\dot{V}_1 < 0$.

On définit, $ev = \dot{q} - \dot{q}_d$ comme étant la commande virtuelle et on cherche la fonction stabilisante α avec $ev \triangleq \alpha$. On définit α pour avoir $V_1 = -z_1^T \cdot C_1 \cdot z_1$, pour ce choix

$$\alpha_1 = -C_1 \cdot z_1 \quad (\text{IV. 38})$$

Avec $C_1 = \text{diag}([c_{11}, c_{12}, c_{13}])$ une matrice diagonale et $c_{1i} > 0$ pour $i = 1:3$.

Donc, l'origine de système (IV. 35) est asymptotiquement stable.

On définit la variable z_2 , à stabiliser dans la deuxième étape, telle que

$$z_2 = ev - \alpha_1 \Rightarrow z_2 = \dot{q} - \dot{q}_d + C_1 \cdot z_1 \quad (\text{IV. 39})$$

Etape 2 : Dans l'espace des variables (z_1, z_2) , on peut mettre

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - C_1 \cdot z_1 \\ \dot{z}_2 = \ddot{q} - \ddot{q}_d + C_1(z_2 - C_1 \cdot z_1) \end{cases} \quad (\text{IV. 40})$$

Pour ce système, on définit la fonction de Lyapunov suivante :

$$V_2(z_1, z_2) = \frac{1}{2} z_1^T \cdot z_1 + \frac{1}{2} z_2^T \cdot z_2 \quad (\text{IV. 41})$$

La dérivée temporelle de V_2 , le long de la solution de (IV. 40), s'écrit

$$\begin{aligned}
\dot{V}_2 &= z_1^T [\dot{z}_1] + z_2^T [\ddot{q} - \ddot{q}_d + C_1(z_2 - C_1 \cdot z_1)] \\
\dot{V}_2 &= z_1^T [z_2 - C_1 \cdot z_1] + z_2^T [\ddot{q} - \ddot{q}_d + C_1(z_2 - C_1 \cdot z_1)] \\
\Rightarrow \dot{V}_2 &= -z_1^T C_1 \cdot z_1 + z_2^T [\ddot{q} - \ddot{q}_d + C_1(z_2 - C_1 \cdot z_1) + z_1]
\end{aligned} \tag{IV.42}$$

On détermine la commande u , pour avoir $\dot{V}_2 = -z_1^T \cdot C_1 \cdot z_1 - z_2^T \cdot C_2 \cdot z_2$.

Avec $C_2 = \text{diag}([c_{21}, c_{22}, c_{23}])$ une matrice diagonale et $c_{2i} > 0$ pour $i = 1:3$.

Ce qui donne,

$$u = M(q) \cdot (\ddot{q}_d - C_1(z_2 - C_1 \cdot z_1) - z_1 - C_2 \cdot z_2) + V_m(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} + G(q) \tag{IV.43}$$

Pour ce choix, l'origine du système (IV.40) est asymptotiquement stable.

Avec la commande u , le système (IV.40) s'écrit

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - C_1 \cdot z_1 \\ \dot{z}_2 = -C_2 \cdot z_2 \end{cases} \tag{IV.44}$$

Il est évident que ce système est asymptotiquement stable.

$$\text{De plus, } z_2 \rightarrow 0 \Rightarrow z_1 \rightarrow 0 \Rightarrow \begin{cases} q_1 = qd_1 \\ q_2 = qd_2 \\ q_3 = qd_3 \end{cases} \tag{IV.45}$$

$$\text{Avec, } \begin{cases} z_1 = q - q_d \\ z_2 = \dot{q} - \dot{q}_d + C_1 \cdot (q - q_d) \end{cases} \tag{IV.46}$$

IV.4.2. Commande glissante-backstepping

La loi de commande est générée selon deux séquences. Dans la première séquence, nous utilisons la technique du Backstepping pour calculer les contrôles virtuels et les fonctions de stabilisation correspondantes. Dans la seconde séquence, nous mettons en évidence la technique du mode glissant pour calculer les contrôles réels dans l'étape finale du Backstepping, afin d'assurer la convergence vers zéro des erreurs entre les contrôles virtuels et leurs valeurs désirées [32].

$$V(z_1, s) = \frac{1}{2} z_1^T \cdot \dot{z}_1 + \frac{1}{2} s^T \cdot \dot{s} \tag{IV.47}$$

La dérivée temporelle de cette fonction est :

$$V(z_1, s) = z_1^T \cdot \dot{z}_1 + s^T \cdot \dot{s} \tag{IV.48}$$

On définit les surfaces de glissement, telles que

$$\begin{cases} s_1 = \dot{q}_1 - \dot{q}_{d1} + c_{21} \cdot (q_1 - q_{d1}) \\ s_2 = \dot{q}_2 - \dot{q}_{d2} + c_{22} \cdot (q_2 - q_{d2}) \\ s_3 = \dot{q}_3 - \dot{q}_{d3} + c_{23} \cdot (q_3 - q_{d3}) \end{cases} \tag{IV.49}$$

Avec,

$$\dot{s} = \ddot{q} - \ddot{q}_d + C_1(z_2 - C_1 \cdot z_1) \tag{IV.50}$$

Par ailleurs,

$$\dot{s} = -\bar{K} \cdot \text{sign}(s), \tag{IV.51}$$

Avec \bar{K} une matrice diagonale où $\bar{K}(i, i) > 0$ et $i = 1:3$.

D'où la loi de commande glissante-backstepping est

$$u = M(q) \cdot (\ddot{q}_d - C_1(z_2 - C_1 \cdot z_1)) + V_m(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} + G(q) - M(q) \cdot \bar{K} \cdot \text{sign}(s) \tag{IV.52}$$

Ou bien,

$$u = M(q) \cdot \phi_z + V_m(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} + G(q) - K \cdot \text{sign}(s) \tag{IV.53}$$

avec

$$\phi_z = (\ddot{q}_d - C_1(z_2 - C_1 \cdot z_1)) \text{ et } K > |\bar{K} \cdot M(q)|$$

Le schéma bloc de cette commande est illustré par la figure (IV.2)

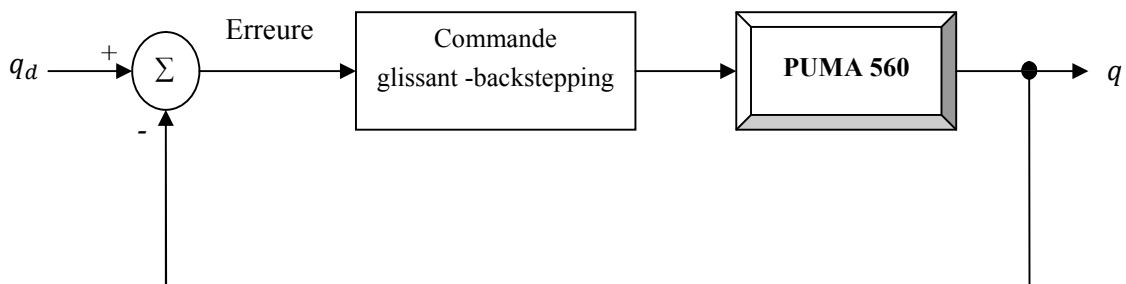
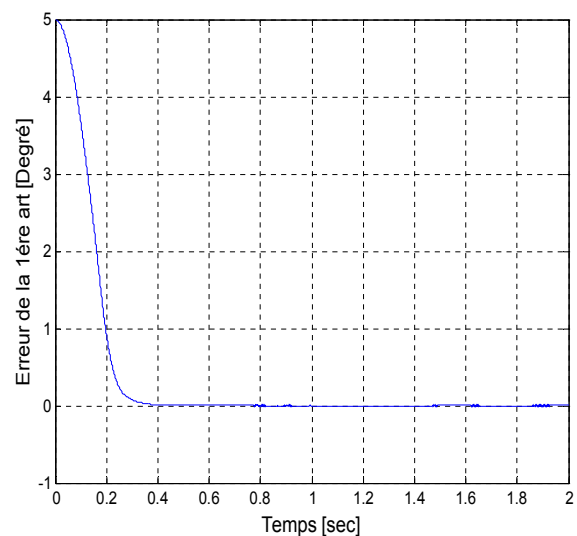
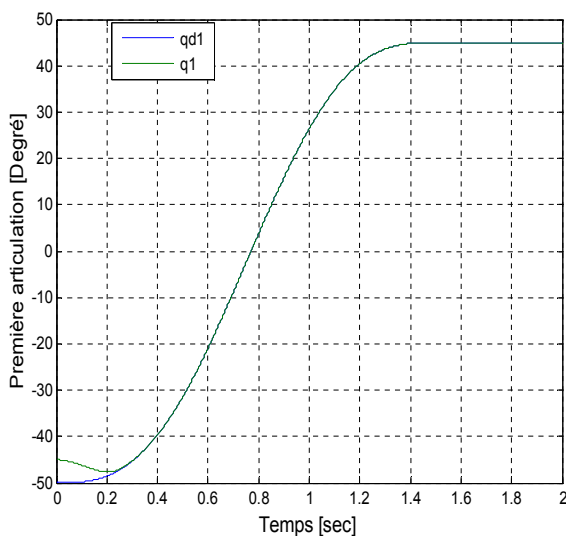


Figure IV.1. Schéma bloc de la commande glissante-backstepping appliquée au bras manipulateur

IV.4. 2.1. Résultats de simulation



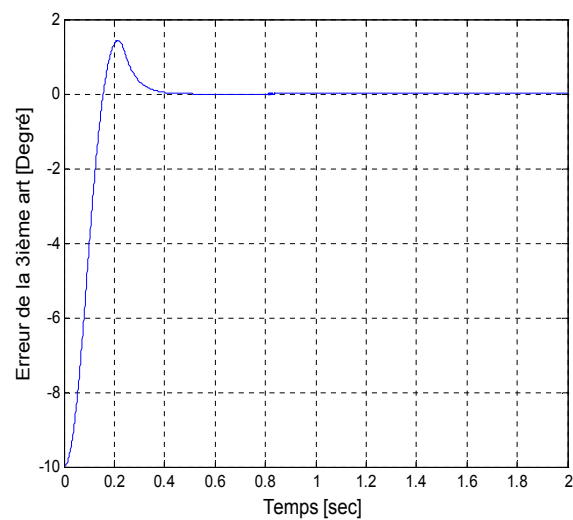
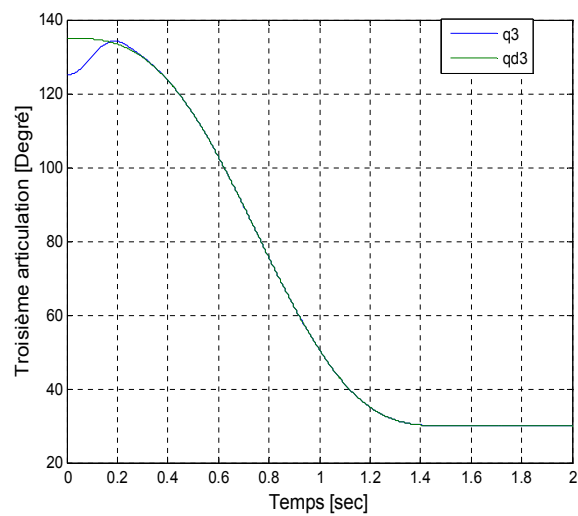
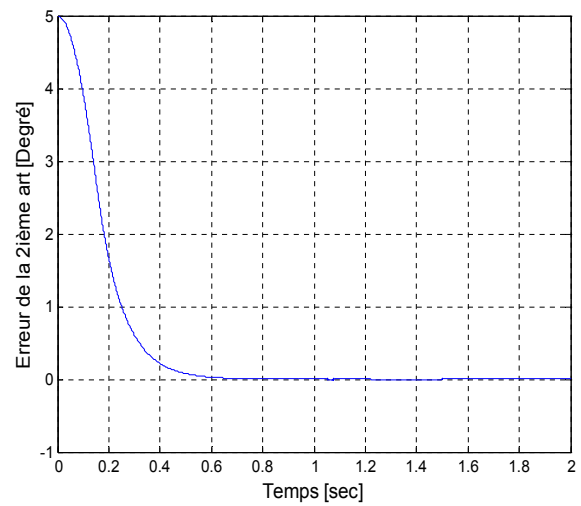
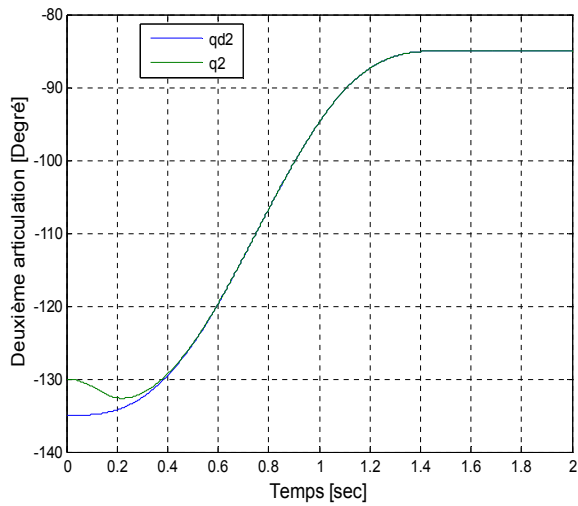
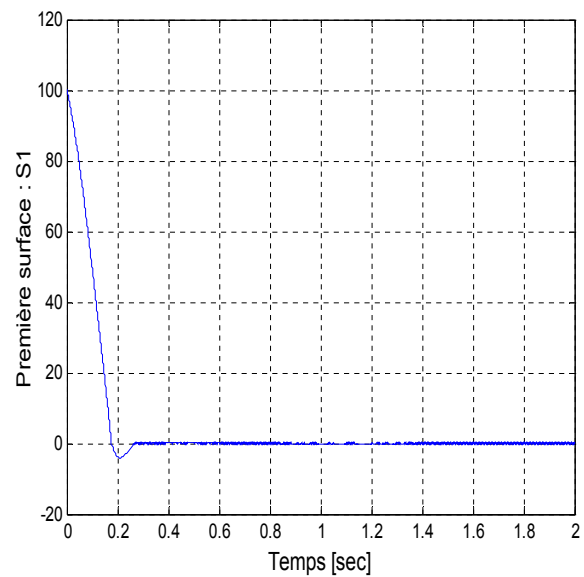
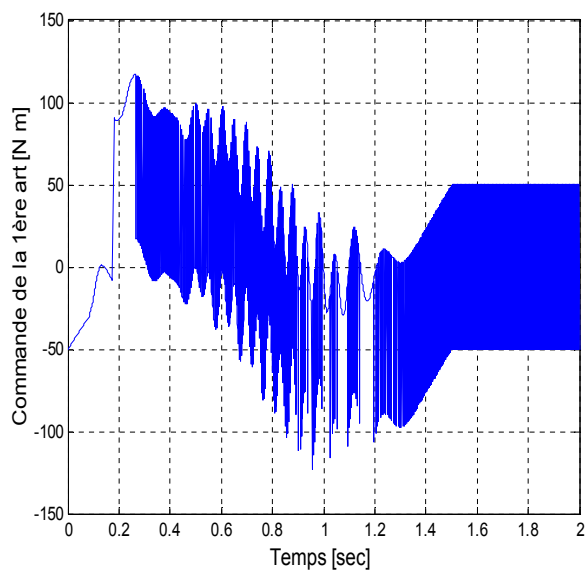


Figure IV.3. Positions articulaires et erreurs de poursuite de la commande glissante backstepping pour un test à vide



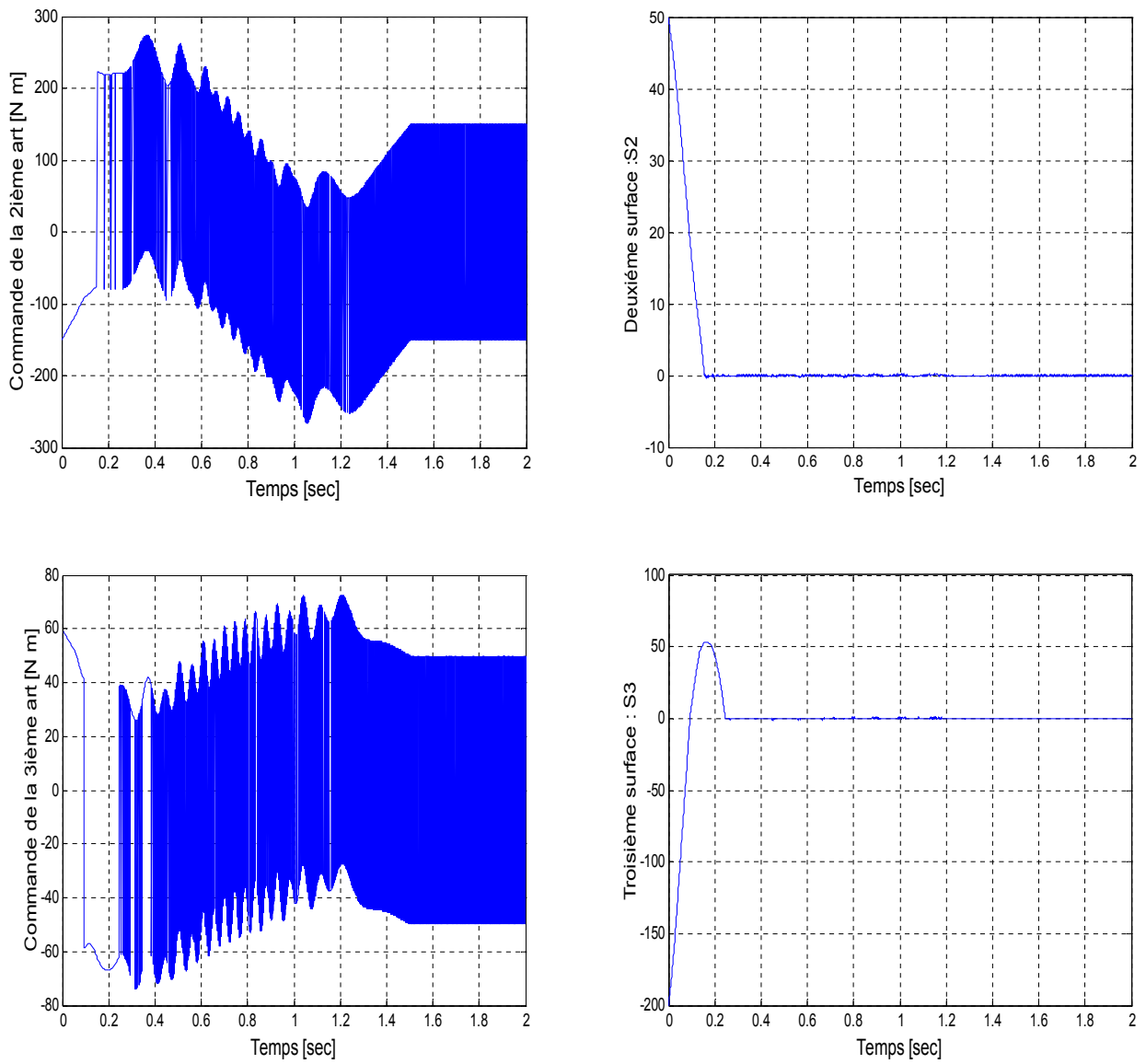
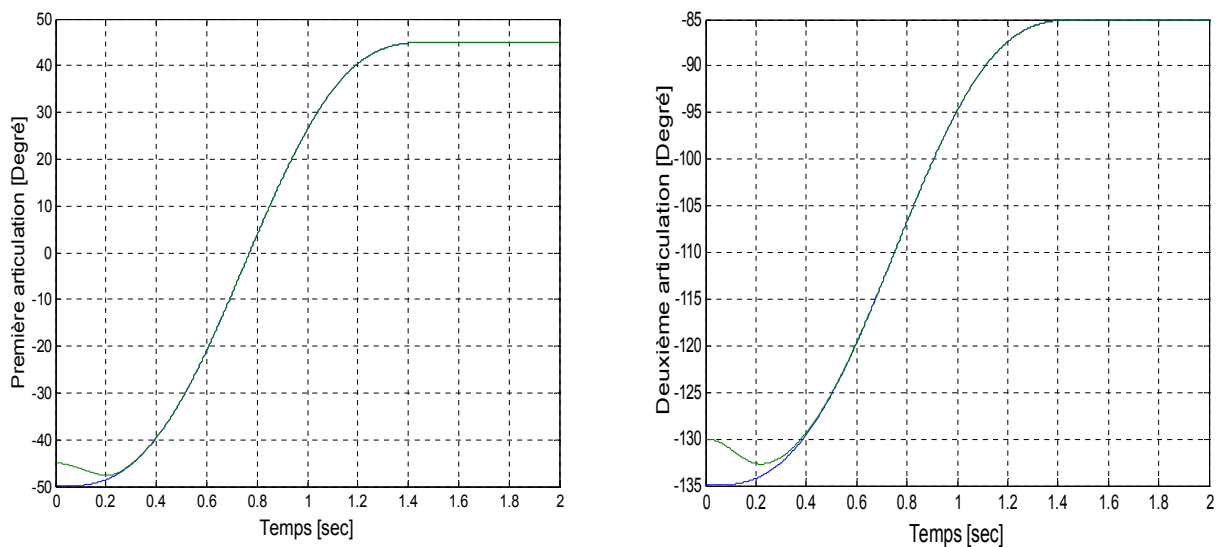


Figure IV.4. Surfaces de glissement et commandes effectives de la commande glissante backstepping pour un test à vide



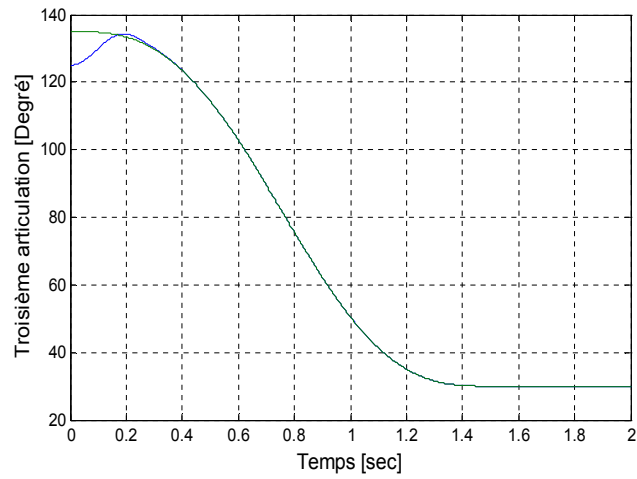
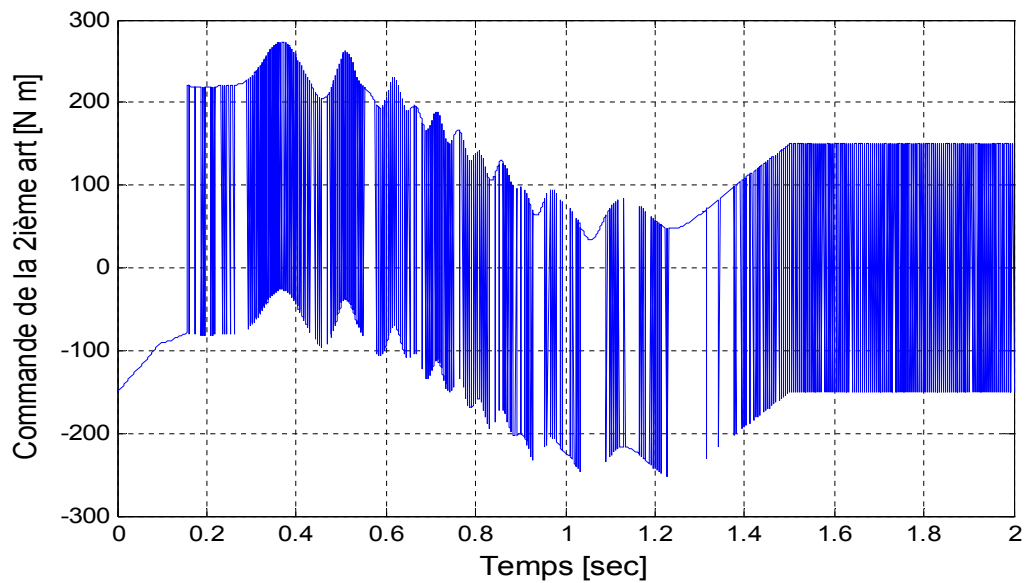
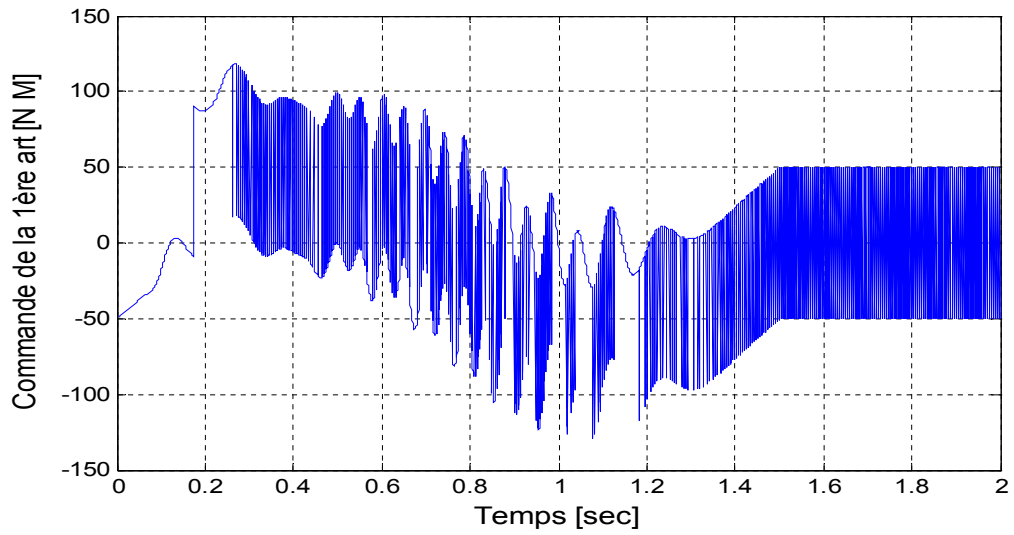


Figure IV.5. Positions articulaires de poursuite de la commande glissante backstepping pour un test à en charge



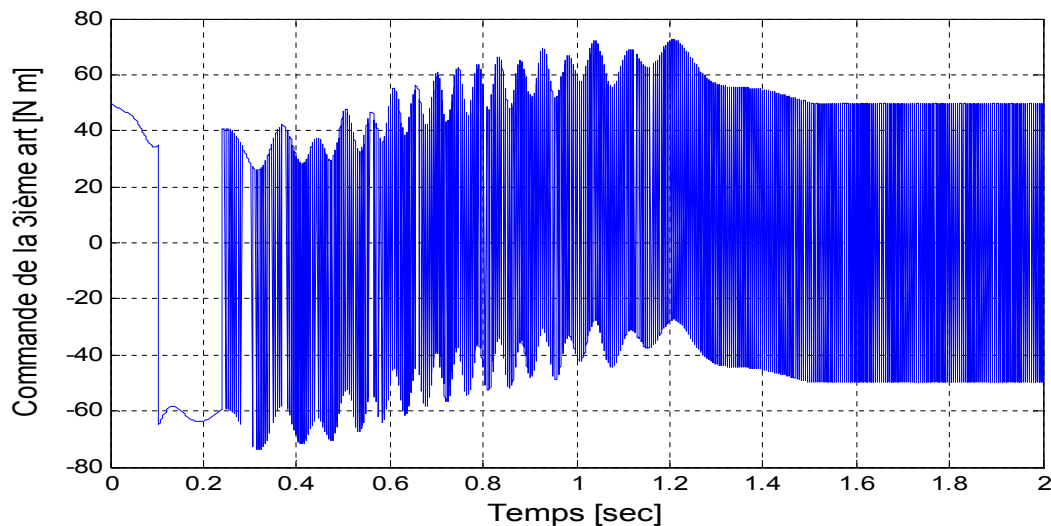


Figure IV.6. Commandes effectives de la commande glissante backstepping pour un test en charge

IV.4. 2.2. Commentaires sur les résultats

Les résultats présentés ci-dessus, sont ceux de la commande hybride glissante backstepping. On remarque que les erreurs de poursuite, figure (IV.3), sont faibles et convergent exponentiellement vers zéro. De plus, les temps de réponses, qui caractérisent le régime transitoire, sont aussi faibles (0.25 sec, 0.4 sec, 0.25 sec, respectivement). La figure (IV.4) illustre les commandes appliquées au bras manipulateur, on remarque bien que ces commandes sont de hautes fréquences, ceci est dû à la présence du terme signe dans la loi de commande.

Les résultats de test de robustesse sont ceux dans les figure (IV.5), (IV.6), ils montrent que cette commande présente une robustesse remarquable vis-à-vis les variations paramétriques, telle que la chute de la masse ($m_o = 10kg$) qui n'influe pas sur la poursuite de trajectoires.

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une loi de commande qui combine deux techniques robustes, le backstepping et le mode glissant.

L'objectif de ce chapitre était l'évaluation de la robustesse et les performances de la commande non linéaire par mode glissant et par backstepping de robot *PUMA 560*. Dans la première partie ont été présentées les idées clé de la commande par backstepping, ensuite nous avons mis en évidence son algorithme. La conception des lois de commande hybride glissante-backstepping, pour commander le robot manipulateur, fait l'objet de la deuxième partie.

Les simulations effectuées sur le robot manipulateur, montrent l'efficacité de cette approche de commande. En effet, nous avons constaté que les erreurs de poursuite sont relativement faibles. De plus, une robustesse vis-à-vis des variations paramétriques a été soulignée.

Le chapitre suivant est réservé à la clôture de notre travail.

ETUDE COMPARATIVE

V.1. Introduction

Pour examiner les différentes lois de commande, développées pour le robot manipulateur et le système hydraulique à réservoirs couplés, nous avons opté pour une étude comparative entre ces différentes commandes. Pour cela, nous définissons deux critères, le premier est en fonction de la commande appliquée, on peut le considérer comme un critère énergétique, le deuxième est en fonction de l'erreur résultante.

Pour bien examiner ces commandes, les résultats ont été pris dans les mêmes conditions, à titre d'exemple : la période d'échantillonnage, le temps de simulation, les gains de la commande, les poids initiaux, ...etc.

V.2. Etude comparative

Dans les tableaux suivant, nous avons présenté une comparaison quantitative entre les différentes approches développées dans ce document. Pour mieux éclaircir cette comparaison, on s'est intéressé à l'évolution temporelle de la commande et de l'erreur résultante (comparaison qualitative).

Critère	Commandes développées pour le robot PUMA 560	
	Commande VSC avec des surfaces N.L	Commande glissante-backstepping
$J_1 = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^p (u^T \cdot u)$	$2.1864 \cdot 10^7$	$2.0071 \cdot 10^7$
$J_2 = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^p (e^T \cdot e)$	117.4838	387.4829

Tableau V.1 Étude comparative entre les commandes développées pour le robot PUMA 560

Critère	Commandes développées pour le système CE105		
	Commande VSC avec des surfaces N.L	Floue-glissante	Neuro-Floue-glissante
$J_1 = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^p (u^2)$	5.6861 10 ⁵	2.4500 10 ⁵	2.2873 10 ⁵
$J_2 = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^p (e^2)$	172.4262	219.3757	191.5068

Tableau V.2. Étude comparative entre les commandes développées pour le système CE105

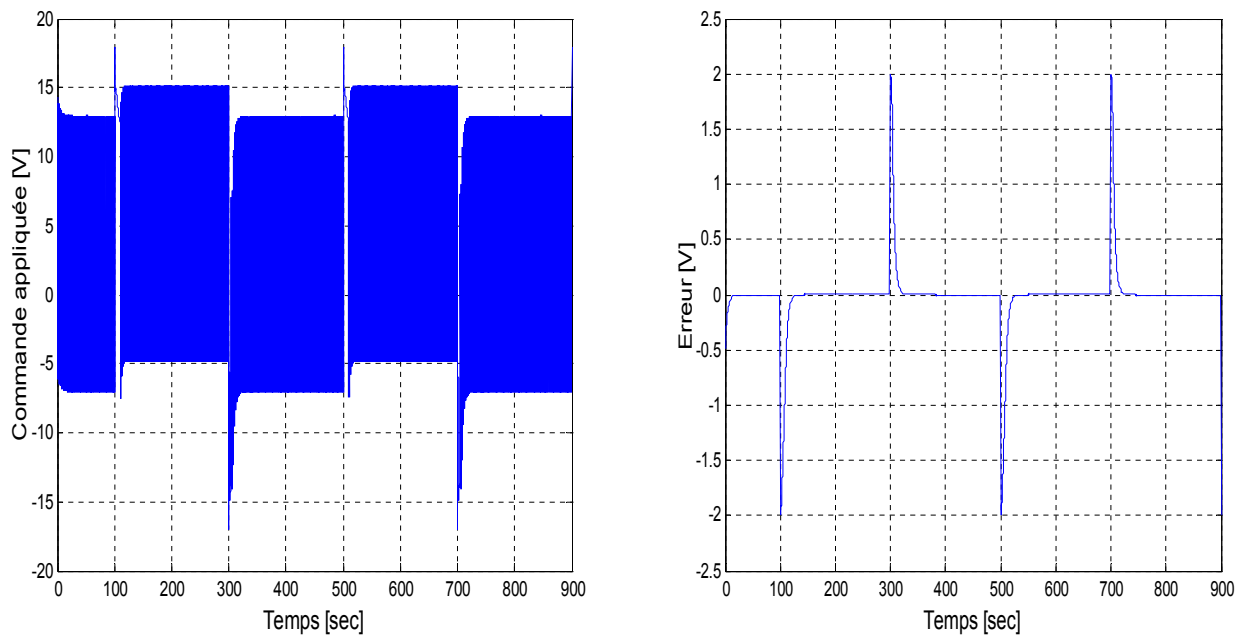


Figure V.1. Commande et erreur de la commande VSC avec une surface non linéaire appliquée au système CE105

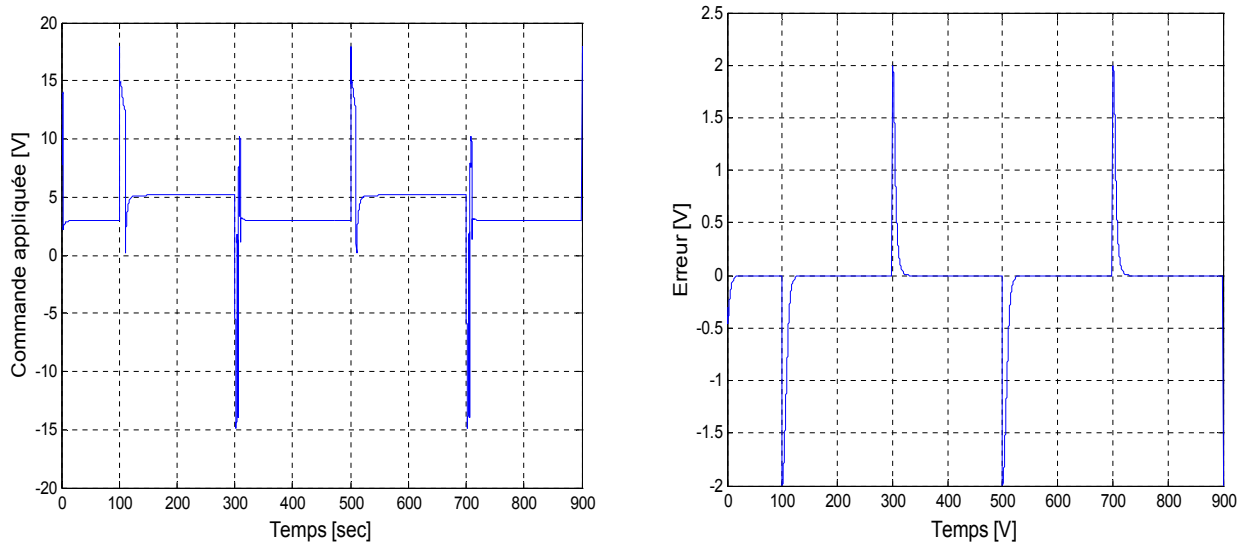


Figure V.2. Commande et erreur de la commande floue-glissante appliquée au système CE105

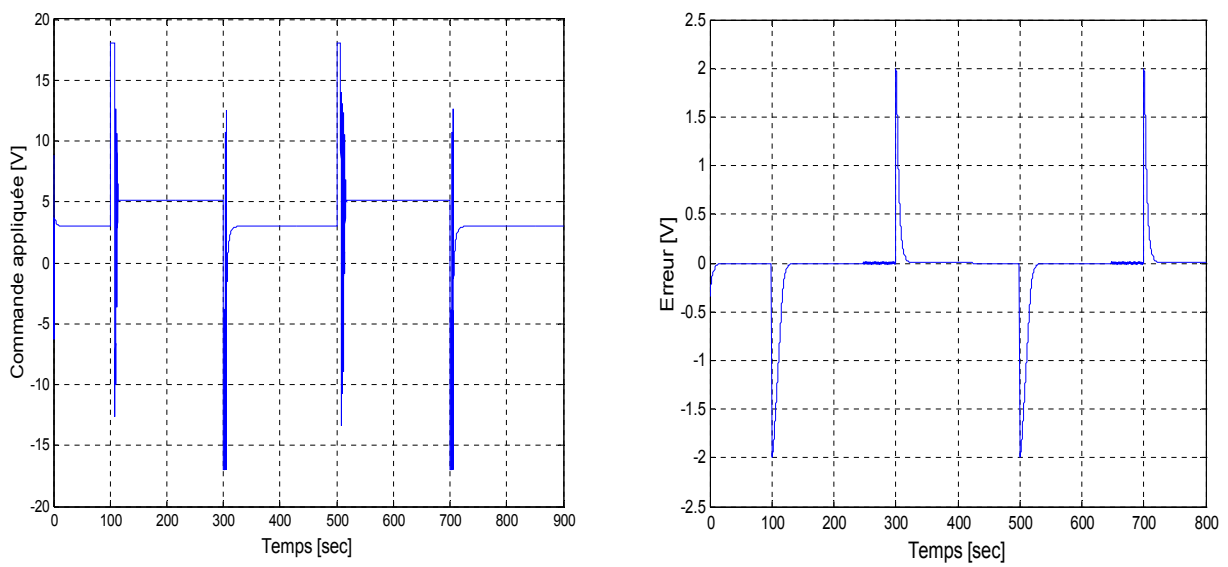


Figure V.3. Commande et erreur de la commande Neuro- floue-glissante appliquée au système CE105

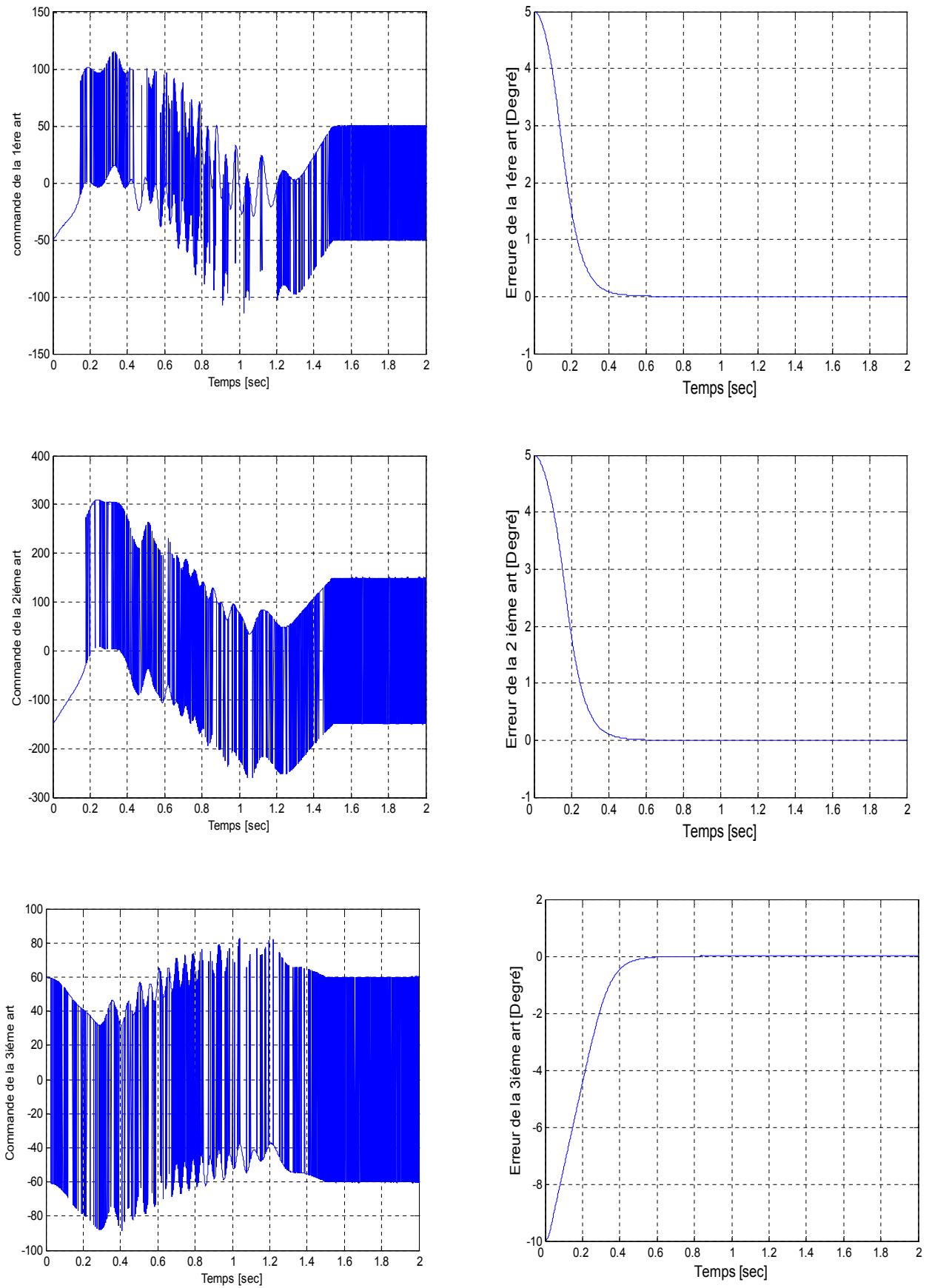


Figure V.4. Commandes et erreurs de la commande VSC avec des surfaces non linéaires appliquée au robot PUMA 560

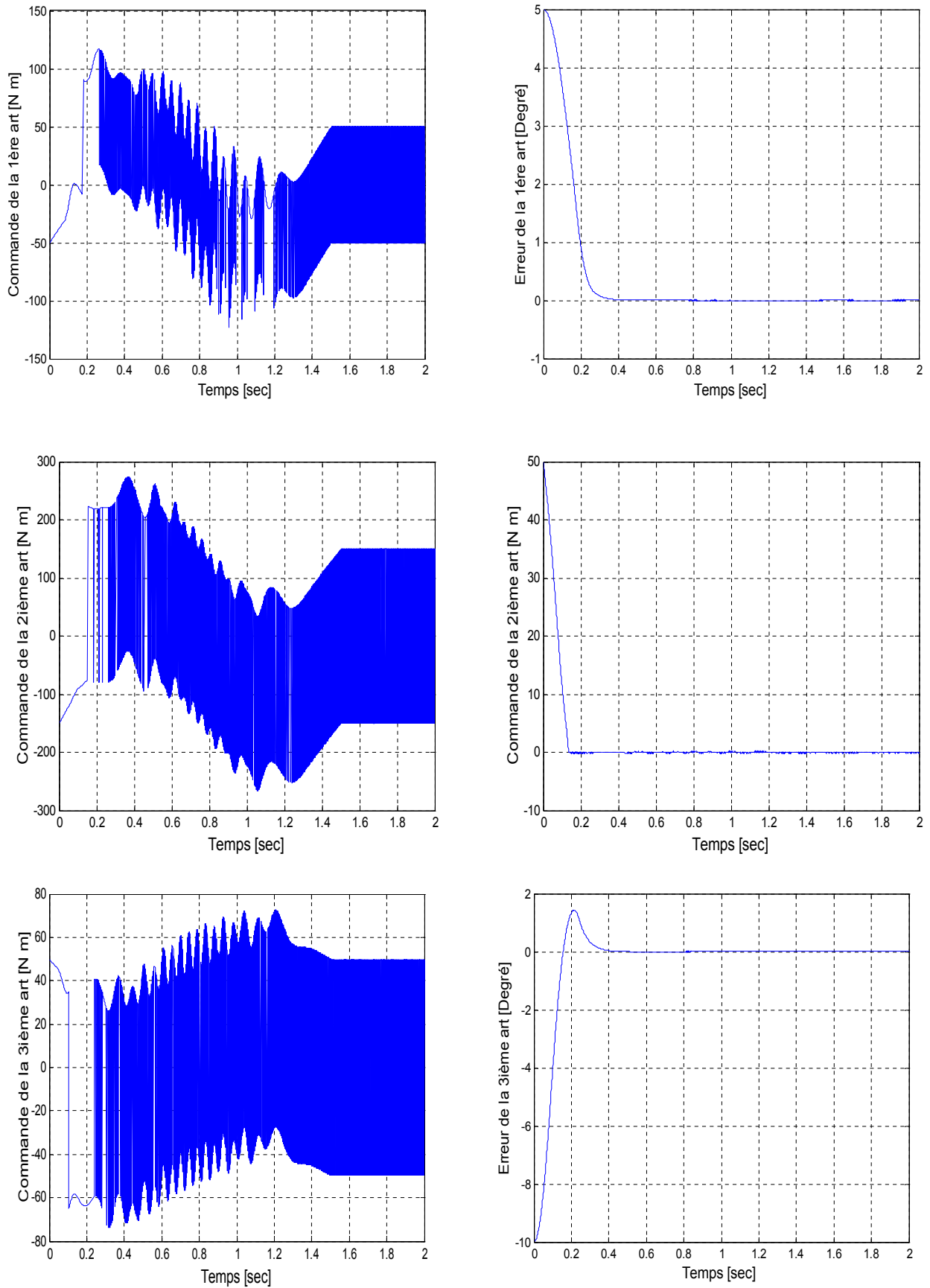


Figure V.5. Commande et erreur de la commande glissante-backstepping appliquée au robot PUMA 560

L'objectif visé par la première partie de ce chapitre est d'examiner les différentes lois de commandes synthétisées dans ce document et ceci dans les mêmes conditions. Cette comparaison s'est faite selon deux voies : quantitative et qualitative. Pour mettre en évidence les performances de chaque loi de commande, en termes de l'erreur résultante et de la valeur de la commande nécessaire pour réaliser une telle commande, nous avons adopté deux critères J_1 et J_2 (Tableaux V.1, V.2). Ensuite, nous nous sommes intéressés à la variation temporelle caractérisant ces deux grandeurs (la commande et l'erreur).

Les valeurs des deux critères pour les commandes développées dans le cas du système hydrauliques à réservoirs couplés sont celles dans le tableau V.2, où nous pouvons déduire que pour la commande Neuro-Floue-glissante, le critère J_1 prend la valeur la plus faible en simulation ($J_1 = 2.2873 \cdot 10^5$). De même, le critère J_2 prend sa valeur minimale pour la commande VSC aussi bien en simulation ($J_2 = 191.5068$).

Pour le robot PUMA 560 (tableau V.1), nous constatons que pour la commande glissante-backstepping le premier critère prend la valeur la plus faible, ($J_1 = 2.0071 \cdot 10^7$). La figure V.6 montre la commande appliquée de la commande glissante-backstepping. Dans celle-ci, nous remarquons qu'elle est lisse par rapport aux commandes par glissante, et l'effet du broutement est minime.

A partir de ce qui est cité, nous pouvons dire que la commande par mode de glissement combinée avec la commande intelligente est en générale la plus performante du point de vue minimisation de critère, et ceci pour système hydrauliques à réservoirs couplés. Néanmoins, les performances de cette commande hybride dépendent des poids initiaux du réseau de neurones et du taux d'apprentissage adopté, ainsi que les paramètres du système flou utilisé. Ce qui influe sur sa robustesse dans certaines applications.

La commande VSC, avec des surfaces non linéaires, sollicite une énergie importante, ceci se voit par le critère J_1 dans les deux tableaux. De plus, comme nous l'avons dit au préalable, cette commande est de hautes fréquences, ce qui donne naissance au broutement, le phénomène indésirable. Le calcul de la commande équivalente nécessite la connaissance du modèle du système à commander, ce qui est considéré comme une limitation à cette commande. Toutefois, cette commande manifeste une robustesse vis-à-vis des perturbations exogènes et des erreurs de modélisation.

La commande hybride glissante-backstepping nous offre une méthode pour la synthèse des surfaces de glissement d'une manière systématique. Néanmoins, cette approche nécessite un développement mathématique avancé.

Conclusion Générale

Dans ce travail de mémoire, nous nous sommes intéressés au problème de la commande à structure variable, Une première partie présente les concepts de base de la commande par modes glissants : la surface de glissement et la loi de commande discontinue traditionnellement utilisée pour forcer le système à rester sur cette surface. Présenter méthodes de synthèse classiques de la commande. Et présente un des problèmes majeurs de la commande par modes glissants : le chattering, et les méthodes classiques permettant d'en réduire les effets.

L'objectif visé par ce travail était d'entamer la commande à structure variable avec une nouvelle vision. Pour cela, des méthodes de commande par mode de glissement ont été abordées. En deuxième temps et après avoir présenté la modélisation du robot manipulateur et du système hydraulique, de surface de glissement non linéaire ont été proposé. Ensuite, la première méthode sert à mettre en évidence une commande à structure variable standard, La deuxième fait appel aux outils de l'intelligence artificielle (la logique floue et réseaux de neurones), pour remédie aux problèmes de la commande à structure variable classique. Quant à la troisième, c'est une commande hybride glissante-backstepping, dont le souci est de trouver une méthode systématique pour la synthèse des surfaces de glissement.

Cette étude nous a permis de formuler les remarques suivantes :

- La commande à structure variable classique avec des surfaces de glissement non linéaires garde ses avantages, notamment la robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et des perturbations exogènes ainsi que la simplicité dans sa synthèse.
- Il est possible de remédier aux problèmes de la commande à structure variable via les outils de la commande intelligente. Telle que, la logique floue peut être utilisée pour diminuer l'effet de la réticence (broutement) ; les réseaux de neurones peuvent être utilisés pour calculer la commande équivalente. Néanmoins, comme ses outils peuvent améliorer les performances de la commande, ils peuvent avoir un effet de dégradation dans certains cas, sur la robustesse de la commande.
- L'introduction de la commande récursive connue sous le nom backstepping nous offre une méthode systématique pour la synthèse des surfaces de glissement. Toutefois, pour les systèmes d'ordre supérieur, cette approche s'avère difficile à manipuler. En effet, la synthèse d'une loi de commande via le backstepping nécessite un développement mathématique un peu compliqué.

A l'issue de ces travaux, ce mémoire ouvre de nouvelles perspectives de recherche parmi lesquelles nous citons :

- Mise en œuvre expérimentale des lois de commande développées sur les deux systèmes
- Utilisation des algorithmes d'optimisations pour la détermination des différents paramètres de la loi de commande.
- Validation des commandes proposées sur d'autres systèmes.

Bibliographie

- [1] Bregeault Vincent, « Quelques contributions à la théorie de la commande par modes glissants », Thèse de Doctorat. Ecole Centrale de Nantes, 3 Décembre 2010.
- [2] Khebbache Hicham, « Tolérance aux défauts via la méthode backstepping des systèmes non linéaires », Mémoire de magistère en automatique, Université Ferhat Abbas de Setif, 2011.
- [3] Hamdi Mohamed et all, « Synthèse de lois de commande par floue mode glissement avec une surface de glissement non linéaire appliques au système hydraulique », Mémoire d'ingénieur d'état, Université de M'sila, 2009 / 2010.
- [4] Boubakir Ahcene, « Méthodes de commande par mode de glissement appliquées au bras manipulateur et au système hydraulique CE105 à réservoirs couplés », Mémoire de magistère, École Militaire Polytechnique, 04 / 02 / 2007.
- [5] Mohamed Adjoudj et all, « Commande par mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation montée dans une éolienne », Nature et Technologie, n° 02/Janvier 2010, Pages 27 à 34.
- [6] Zeglache Samir, « Coure de 1ere années master (commande du système multi variable) », Master Automatique, Université de M'sila, 2011-2012.
- [7] Saibi Ali, « Commande par régulateurs IP et par mode de glissement d'une machine synchrone à double étoile », Mémoire de magistère, Université Ibn Khaldoun (Tiaret) ,06 / 05 /2006.
- [8] Ali-Bey Mohamed, « Commande en effort des robots manipulateurs », Mémoire de magister Ecole Nationale Polytechnique, 29 juin 2005.
- [9] Kechich Abderrahmane et Benyounes Mazari, « La commande par mode glissant : application à la machine synchrone à aimants permanents », Afrique SCIENCE, 04(1) (2008), Pages 21 – 37.
- [10] Zeghad Hemza et all, « commande à structure variable d'un moteur a commutation électrique », Mémoire d'ingénieur d'état, Université de M'sila, 2009 / 2010.
- [11] Mebarki Rafik, « Commande du robot PUMA 560 en Force/Position par la méthode de l'impédance », Mémoire d'ingénieur d'état, École nationale polytechnique, 2005.
- [12] Chekireb H. et all, « conception, réalisation et commande d'un robot sacra », Mémoire d'ingénieur d'état, École nationale polytechnique, 2006.
- [13] Boubakir .A et all, « Loi de commande par mode de glissement avec une surface de glissement non linéaire appliquée au système hydraulique à réservoirs couplés », 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing, 03-04 November 2007.
- [14] Bali Nouredine, « Commandes prédictives appliquées au robot PUMA et au palier magnétique actif », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 15 Décembre 2007.

- [15] P. Wellstead, TecQuipment CE105 Coupled Tanks Apparatus, Control Systems Centre, Manchester, U.K, 1993.
- [16] Zeglache Samir, « TP de 2eme années master (commande du système non linéaire) », Master Automatique, Université de M'sila, 2011-2012.
- [17] Bouafia Saber, « Commande Hybride Floue-Glissant d'un Moteur à Courant Continu Sans Balais (BLDCM) », Mémoire d'ingénieur d'état, Université de M'sila, 2009 / 2010.
- [18] Labiod Salim, « Contribution à la Commande Adaptative Floue des Systèmes Non Linéaires », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 29 Janvier 2005.
- [19] Tlemçani Abdelhalim, « Contribution à l'application des commandes adaptatives par les systèmes flous à une machine synchrone à aimants permanents alimentée par un convertisseur multicellulaire série », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 03 Juillet 2007.
- [20] Rabah Belhadef, « Commande vectorielle et par logique floue de la machine asynchrone sans capteur », Mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique, Année 2008
- [21] Ould Abdou Taleb Moustapha, « Commande par mode de glissement floue avec observateur : application à différents pendules inversés », Mémoire de magister Ecole Nationale Polytechnique, 29 juin 2006.
- [22] Bennoui Hassina, « Apport de la logique floue et des réseaux de neurones pour la commande avec minimisation des pertes de la machine asynchrone », Mémoire de magister, Université de Batna, 21/05/2009.
- [23] Lotfi Baghli, « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques », Université Henri Poincaré, Nancy-I, 14 Janvier 1999.
- [24] Amamra Sid-Ali, « Commande par réseaux de neurones d'une machine asynchrone avec linéarisation hybride », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, 01/10/2005.
- [25] Lahouazi Ferhat, « Mise en œuvre d'une stratégie de commande neuro floue : Application a un pendule inversé », Mémoire de magister en automatique, 16/03/2011.
- [26] Ouiguini .R, « Une commande robuste par mode glissant flou appliquée à la poursuite de trajectoire d'un robot mobile non holonome », Université saad Dahleb de Blida, CISTEMA'2003 ,1-7.
- [27] Loukal Keltoum, « commandes non linéaires d'un système hydraulique à réservoirs couplés », Université de M'sila, 2012.
- [28] Ezzat Marwa et Mohamed Moustafa, « Commande non linéaire sans capteur de la machine synchrone a aimants permanents », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 17 Mai 2011.
- [29] Benbaha Noureddine, « Commande robuste tolérante aux défauts : Application à la Machine à Courant Alternatif », Mémoire de magister, Université de Batna, 02 /07/ 2009.

- [30] Choukchou-Braham Amal, «Contribution à la stabilisation des systèmes mécaniques sous actionnés », Thèse de Doctorat, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, 21 Mai 2011.
- [31] Martini Adnan, «Modélisation et Commande de vol d'un hélicoptère drone soumis à une rafale de vent », Thèse de Doctorat, Université Paul Verlaine – Metz, 14 novembre 2008.
- [32] M'hammed Guisser et all, «Atterrissage et décollage robuste d'un hélicoptère standard par les techniques mode glissant et Backstepping », Univ Hassan II Ain Chock, Morroco, e-STA copyright 2010 by see volume 7, N°1, pp1-8.

Annexe A

Masse des différentes liaisons

$$m_2 = 17.40 \text{ kg} ; m_3 = 5.04 \text{ kg} ; m_4 = 0.82 \text{ kg} ;$$

$$m_5 = 0.35 \text{ kg} ; m_6 = 0.09 \text{ kg} ; m_t = m_4 + m_5 + m_6$$

Paramètres géométriques

$$d_2 = 149.09 \text{ mm} ; l_2 = 431.8 \text{ mm} ; l_3 = 433.07 \text{ mm}.$$

Paramètres d'inertie

La liaison	$I_{xxi} [kg.m^2]$	$I_{yyi} [kg.m^2]$	$I_{zzi} [kg.m^2]$	$I_{Mi} [kg.m^2]$
1	-	$350 \cdot 10^{-3}$	-	1.14
2	$130 \cdot 10^{-3}$	$524 \cdot 10^{-3}$	$539 \cdot 10^{-3}$	4.71
3	$192 \cdot 10^{-3}$	$15.4 \cdot 10^{-3}$	$212 \cdot 10^{-3}$	0.83
4	$1.30 \cdot 10^{-3}$	$1.80 \cdot 10^{-3}$	$1.80 \cdot 10^{-3}$	-
5	$0.30 \cdot 10^{-3}$	$0.30 \cdot 10^{-3}$	$0.40 \cdot 10^{-3}$	-
6	$0.04 \cdot 10^{-3}$	$0.15 \cdot 10^{-3}$	$0.15 \cdot 10^{-3}$	-
4+5+6	$1.64 \cdot 10^{-3}$	$2.25 \cdot 10^{-3}$	$2.35 \cdot 10^{-3}$	-

Annexe B

B.1 Paramètres de simulation de la commande VSC appliquée au robot PUMA 560:

Les simulations qu'on a fait sur le modèle dynamique du robot *PUMA 560*, ont été faites avec $\eta^T = (30, 30, 30)$ pour les surfaces de glissements, et $K^T = (50, 150, 50)$ les gains de commutation de la commande discontinue. Avec la période d'échantillonnage $T = 0.001 \text{ sec}$, et le temps de simulation $t = 2 \text{ sec}$.

Test de robustesse : Pour tester la robustesse des lois de commande proposées, nous avons choisi le test de chute de la charge. Dans ceci, le robot fait une poursuite de trajectoires avec une charge de ($m_0 \text{ kg}$) et dès que la vitesse maximale est atteinte, cette charge chute ($m_0 = 0$ à $t = 0.8$), (voir figure II.1).

B.2 Paramètres de simulation de la commande VSC appliquée au système Hydraulique :

La section de chaque réservoir $A = 9350 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$; la section de chaque valve $S_n = 78.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$; coefficient de décharge $a_0 = 0.6$; coefficient de décharge $a_{12} = 1$; le gain de la pompe $K_Q = 450 \text{ cm}^3 / \text{min} / \text{V}$;

Le gain $K_h = 41 \text{ V/m}$; la période d'échantillonnage $T = 0.02 \text{ sec}$ et le temps de simulation $T_{max} = 900 \text{ sec}$; la constante de gravité $g = 9.81 \text{ m/sec}^2$. un gain de commutation $K = 8$, et le paramètre de la surface de glissement $\mu = 0.5$.

B.3 Paramètres de la simulation de la commande floue-glissante appliquée au système Hydraulique:

Ces résultats sont relevés pour un gain de commutation $K = 10$ et un paramètre d'ajustement, $r = 0.7$ avec la largeur de la bande $\phi = 0.01$, le paramètre de la surface de glissement $\mu = 0.5$. La période d'échantillonnage $T = 0.02 \text{ sec}$ et le temps de simulation $T_{max} = 900 \text{ sec}$

B.4 Paramètres de la simulation de la commande Neuro-floue-glissante appliquée au système Hydraulique:

Ces résultats sont relevés pour un gain de commutation $K = 10$ et un paramètre d'ajustement, $r = 0.5$ Avec la largeur de la bande $\phi = 0.02$. $K_{eq} = 7$, le taux d'apprentissage $\alpha = 0.2$, les poids initiaux $W_{z_{ij}} = 0.05$ et $W_{y_j} = 0.05$ le paramètre de la surface de glissement $\mu = 0.5$.

B.5 Paramètres de la simulation de la commande glissante-backstepping appliquée au système Hydraulique:

Les paramètres $c_{21} = 20$, $c_{22} = 10$, $c_{23} = 20$, $K_T = \text{diag}([50, 150, 50])$. Là aussi, la robustesse de la loi de commande a été examinée par le test de chute de la charge.

Dans ce cas, le robot effectue une poursuite de trajectoires avec une charge de $m_0 \text{ kg}$, et dès que la vitesse maximale est atteinte, cette charge chute.

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE**

SPECIALITE : AUTOMATIQUE

Proposé et dirigé par : - Mr. BOUGUERRA Abderrahmen

Présenté par : - CHERRAT Nidhal

Thème :

**Méthodes de Commande non Linéaires appliquées au système hydraulique
CE105 à réservoirs couplés et au bras manipulateur**

Résumé :

La théorie des systèmes à structure variable fait l'objet de multiples études depuis une cinquantaine d'années. Le but de ce travail est d'entamer cette commande avec une nouvelle vision. Pour cela, des méthodes de commande par mode de glissement ont été abordées. En premier temps, des surfaces de glissement non linéaires ont été proposées. Ensuite, la première méthode met en évidence une commande à structure variable basée sur les surfaces non linéaires. La deuxième, fait appel aux outils de l'intelligence artificielle pour remédier aux problèmes de la commande à structure variable classique, à savoir la logique floue et les réseaux de neurones, quant à la troisième, c'est une commande hybride glissante backstepping, dont le souci est de trouver une méthode systématique pour la synthèse des surfaces de glissement. Les lois de commande développées, ont été validées par simulation sur le robot *PUMA 560* et sur le système hydraulique *CE105* à réservoirs couplés.

Mots clés :

Mode de glissement, Logique floue, Réseau de neurones, Backstepping.

N° d'ordre : 068