

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: COMMANDE DES SYSTEMES ELECTRIQUES

THEME

**Commande non linéaires d'un système hydraulique CE105
à réservoirs couplés**

Proposé et dirigé par :

- Mr. BOUGUERRA Abderrahmen

Présenté par :

- KERMICHE Abdelhammid

Année Universitaire: 2013/2014

N° d'ordre : CSE-092

REMERCIEMENTS

Je remercie en premier lieu mon ALLAH de Nous donner La santé et la patience pour avoir Terminer ce travail.

*Ainsi, je tien également à exprimer mon vifs remerciements à notre encadreur **Mr. Abderrahmen BOUGUERRA** pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessée de je donner ses conseils et remarques*

Je remercie également, tous les membres du jury d'avoir accepter d'examiner ce travail. Ainsi que tous mes enseignants du Département du Génie électrique.

Je veux également remercier ma famille pour leur soutien moral particulièrement mes parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de mes longues années d'études.

Je tiens également à remercier tous mes collègues de l'étude pour leur soutien et leur soutien moral moi de terminer ce travail

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours soutenue et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail

A ma mère

A mon père

A mes frères

À toute la famille

A tous mes amis

A tous les enseignants au département de Génie Electrique.

A ma promotion de Master commande des systèmes électriques

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

2014

Sommaire

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

Chapitre 01

Modélisation et commande PID d'un système Hydraulique CE 105

1.1 Introduction	3
1.2 Modélisation du système hydraulique CE105 a réservoirs couples.....	3
1.2.1 Description du matériel de système hydraulique CE105	3
1.2.2 Modélisation du CE105.....	4
1.2 Commande par régulateur PID.....	7
1.2.1 Introduction	7
1.2.2 Principe	8
a) Action Proportionnelle	8
b) Action Intégrale.....	8
c) Action Dérivée	9
1.2.3 Différentes structures d'un PID.....	9
1.2.4 Avantages et inconvénients : réglabilité.....	10
1.3 Application de la commande PID sur le système CE105.....	11
1.3.1 Résultat de simulation	11
1.3.2 Commentaires sur ses résultats	13
1.4 Conclusion.....	13

Chapitre 02

Commande par la logique floue

2.1 Introduction	14
2.2 Historique.....	14
2.3 Théorie de la logique floue.....	15
2.3.1 Principe fondamental de la logique floue.....	15
2.3.2 Logique classique et logique floue.....	15
2.3.3 Application de la logique floue	15
2.3.4 Généralité sur la logique floue	16
2.3.5 Variables linguistiques	16
2.3.6 Sous ensembles flous.....	17
2.3.7 Caractéristiques d'un sous ensemble flou	18

2.3.8	Fonction d'appartenance	18
a)	Triangulaire	19
b)	Trapézoïdale	19
c)	Gaussienne	19
d)	Sigmoïdes	20
2.3.9	Opérateurs de la logique floue	20
a)	L'opérateur ET	20
b)	L'opérateur OU	20
c)	L'opérateur NON	21
2.4	Structure d'une commande floue	21
2.4.1	La base de connaissances	22
a)	Base de données	22
b)	Base de règle	22
2.4.2	Interface de fuzzification.....	22
2.4.3	Mécanisme d'inférence floue.....	22
a)	Méthode d'inférence max-min (méthode de Mamdani).....	23
b)	Méthode d'inférence max-produit (méthode de Larsen).....	23
c)	Méthode de som-produit (méthode de Sugeno)	23
2.4.4	Defuzzification.....	23
a)	La méthode du centre de gravité	23
b)	La méthode du maximum	24
c)	La méthode de la moyenne des maxima	24
2.4.5	Inférence flou	25
2.5	Les règles de contrôle.....	25
2.6	Règles floue.....	25
2.7	Application sur le système CE105	26
2.7.1	Définition des entrées / sorties	26
2.7.2	Base de Règle.....	27
2.7.3	Résultats de simulation.....	27
2.7.4	Commentaires sur les résultats.....	29
2.8	Conclusion	29

Chapitre 03

Commande par backstepping

3.1 Introduction	30
3.2 Définitions.....	30
3.3 Généralités sur la technique du backstepping	30
3.4 Les avantages de la commande backstepping	31
3.5 Principe de la commande par backstepping	31
3.6 Méthodes d'analyse de la stabilité des systèmes	31
3.6.1 La stabilité locale par la méthode de linéarisation	32
3.6.2 Méthode direct de Lyapunov.....	32
a) Théorème de Lyapunov.....	33
b) La synthèse de la commande par la méthode directe de Lyapunov.....	33
3.7 Technique de la commande par backstepping	34
3.8 Application au système CE105	37
3.8.1 Synthèse de la loi de commande	37
3.8.2 Résultats de simulation.....	39
3.8.3 Commentaires sur les résultats	40
3.9 Conclusion	40

Chapitre 04

Commande par linéarisation entrée-sortie

4.1 Introduction	41
4.2 La linéarisation entrée-sortie.....	41
4.3 Historique de la commande.....	41
4.4 Principe de linéarisation entrée – sortie	42
4.5 Avantage de la théorie entrée-sortie.....	43
4.6 Outils mathématiques	44
4.6.1 Gradient.....	44
4.6.2 Dérivée de Lie	44
4.6.3 Degrés relatif.....	45
4.6.4 Forme normale	47
1. Changement de variable	47
2. Equations d'état	47
3. Forme normale	48

4.6.5 Crochets de Lie	48
4.6.6 Difféomorphisme	49
4.7 Système a plusieurs entrées et plusieurs sorties	50
4.8 Application au système hydraulique CE105	51
4.8.1 Calcul du degré relatif.....	52
4.8.2 Calculé la Difféomorphisme	52
4.8.3 Le système en Z	52
4.8.4 Calculé la commande u	53
4.8.5 Résultats de simulation.....	53
4.8.6 Commentaires sur les résultats	54
4.9 Conclusion	55

Chapitre 05

Etude comparative

5.1 Introduction.....	56
5.2 Etude comparative.....	56
5.3. Commentaires sur les résultats	60
5.4 Conclusion	60
Conclusion générale	61
BIBLIOGRAPHIE	63

LISTE DES FIGURES

Chapitre 01

Modélisation et commande PID d'un système Hydraulique CE 105

Figure1. 1 Présentation du système hydraulique CE105 a réservoirs couplés.	4
Figure1. 2 Système hydraulique à réservoirs couplés.....	4
Figure1. 3 Schéma block du système CE105 en boucle ouvert sur MATLAB	7
Figure1. 4 Réponse en boucle ouvert du système CE105	7
Figure1. 5 régulateur PID.	8
Figure1. 6 Action Proportionnelles	8
Figure1. 7 Action Dérivée	9
Figure1. 8 Action Dérivée	9
Figure1. 9 PID série.....	9
Figure1. 10 PID mixte	9
Figure1. 11 PID parallèle	10
Figure1. 12 Schéma bloc de la régulateur PID appliquée au système hydraulique CE105	11
Figure1. 13 Schéma bloc en boucle fermé sur MATLAB	11
Figure1. 14 Résultats de simulation de la commande par régulateur PID appliquée au système CE105.	13

Chapitre 02

Commande par la logique floue

Figure2. 1 Logique classique et logique floue	15
Figure2. 2 Variable linguistique.....	16
Figure2. 3 Fonctions d'appartenance des deux variables linguistiques d'entrée normalisées x_1 et x_2	17
Figure2. 4 Fonctions d'appartenance de la variable linguistique de sortie normalisée x_r	17
Figure2. 5 Caractéristique d'un sous –ensemble floue	18
Figure2. 6 Fonction triangulaire.....	19
Figure2. 7 Fonction trapézoïdale.	19
Figure2. 8 Fonction Gaussienne.....	19
Figure2. 9 Fonction sigmoïde	20
Figure2. 10 Structure interne d'un système flou	21
Figure2. 11 Défuzzification par la méthode du maximum	24
Figure2. 12 Défuzzification par la méthode de la moyenne des maxima	25
Figure2. 13 Schéma bloc de la commande par la logique floue.	26
Figure2. 14 Fonctions d'appartenance des entrées/sorties.	27

Figure2. 15 Résultats de simulation de la commande Floue	28
--	----

Chapitre 03

Commande par backstepping

Figure3. 1 Interprétation géométrique du théorème de Lyapunov	33
Figure3. 2 Schéma bloc de la commande backstepping appliquée au système CE105	38
Figure3. 3 Résultats de simulation de la commande backstepping appliquée au système CE105.....	40

Chapitre 04

Commande par linéarisation entrée-sortie

Figure 4. 1 Schéma de principe de la linéarisation entrée sortie.....	42
Figure 4. 2 Schéma d'un système SISO en forme normale	49
Figure 4. 3 Schéma du principe de linéarisation entrée – sorties.....	49
Figure 4. 4 Résultats de simulation de la commande linéarisation entrée-sortie	54

Chapitre 05

Etude comparative

Figure 5. 1 Commande et l'erreur de la commande par régulateur PID appliqué de système CE105 .	57
Figure 5. 2 Commande et l'erreur de la commande par Logique floue	58
Figure 5. 3 Commande et l'erreur de la commande linéarisante entrée-sortie	59
Figure 5. 4 Commande et l'erreur de la commande par backstepping	59

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 01

Modélisation et commande PID d'un système Hydraulique CE 105

Tab 1. 1 Paramètres du système hydraulique.....	6
Tab 1. 2 les paramètres du contrôleur PID	12

Chapitre 02

Commande par la logique floue

Tab 2. 1 Table de règles de MacVicar-Whelan.....	27
--	----

Chapitre 05

Etude comparative

Tab 5. 1 Étude comparative entre les commandes développées pour le système CE105.....	56
---	----

Variables et symboles

C_i :	Paramètres de design pour le backstepping
\mathcal{D} :	Domaine d'intérêt
∂ :	Dérivée partielle
e :	Erreur de poursuite
τ :	Variable temps
u :	Variable manipulée (Commande)
V :	Fonction de Lyapunov
x :	Variable d'état
x_d :	Etat désiré
y :	Variable de sortie
y_d :	Trajectoire de référence
z :	Variable d'erreur dans le backstepping
∇ :	Le gradient
$[f, g](x)$:	Crochet de Lie
\emptyset :	Difféomorphisme
$D(x)$:	Matrice de découplage du système
r :	Degré relatif total
Δe :	La variation de l'erreur.

Introduction générale

La commande des systèmes constitue l'un des domaines les plus riches en termes d'algorithmes, outils d'analyse et technique de conception. Toutefois, la majorité de ces techniques sont basées sur la connaissance du modèle du système à commander. Du degré de validité de cette hypothèse, dépend la qualité du comportement du système compensé obtenu. Si le modèle du procédé est connu avec exactitude, un contrôleur bien conçu donne, en général, de bons résultats. [1]

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. [2]

Le premier type entre directement en jeu dans le modèle, tandis que le second type porte sur l'ordre sous-estimé du système. La commande robuste est la première technique de commande qui traite ce genre de problème. Dans la synthèse de lois de commande, un modèle nominal du procédé à contrôler, et des incertitudes paramétriques liées au modèle sont pris en compte. La structure du contrôleur robuste est facilement composée d'une partie "nominale" (retour d'état...), mais aussi de termes additionnels permettant de compenser au mieux les incertitudes liées au modèle, par exemple la commande par linéarisation entrée-sortie.

Motivation de la recherche

En particulier, les différents points motivants notre recherche sont, principalement, les suivants :

- Utiliser les outils de l'intelligence artificielle, notamment la logique floue.
- Pour utiliser la récursivité est "Backstepping" pour trouver une façon systématique pour corriger les problèmes du système
- Synthèse d'une loi de commande par linéarisation entrée-sortie.

Organisation de la mémoire

Cette thèse permet un contrôle de tous les résultats appliqués au système hydraulique réservoirs couplés CE105. Elle est constituée de cinq chapitres organisés de la façon suivante :

Le premier chapitre est consacré à rappeler le système hydraulique en général. Explication et les propriétés liées au système hydraulique CE105 a réservoirs couplés avec une analyse mathématique pour calculer modèle de CE105 et appliquer un régulateur PID sur ce système.

Nous présentons dans le deuxième chapitre les aspects théoriques de la logique floue et ses applications sur le modèle de ce système.

Le troisième chapitre portera sur la théorie de la commande par backstepping. A partir des conditions de stabilité de Lyapunov, sur les méthodes d'analyse de la stabilité des systèmes non linéaires, ensuite nous mettons l'accent sur la commande backstepping pour le cas du système hydraulique CE105.

Le quatrième chapitre, nous rappelons la théorie de la commande par linéarisation entrée-sortie et nous faisons la synthèse de cette technique sur le modèle de système hydraulique CE105.

Le cinquième chapitre est consacré à l'étude comparative entre les différentes lois de commandes proposées dans ce document.

Chapitre 01 : Modélisation et commande PID d'un système Hydraulique CE 105

1.1 Introduction

Le comportement électrique et dynamique d'un système quelconque peut être étudié définir par un modèle mathématique, c'est ce qu'on appelle modélisation. L'élaboration d'un modèle (modélisation) consiste à utiliser une loi physique, une règle de calcul empirique ou un système d'équations différentielles afin de construire un modèle relativement satisfaisant compte tenu des objectifs poursuivis et des moyens disponibles. Il est donc évident que cette étape de modélisation est un passage indispensable pour concevoir des systèmes de commande performants.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le modèle mathématique de système hydraulique CE 105, en utilisant la loi de Bernoulli et les équations d'équilibre d'écoulement et nous avons appliqué un contrôleur PID sur le modèle en MATLAB du système Hydraulique étudié. Ce modèle sera traduit sous forme de schéma bloc de manière à être simulé à l'aide du logiciel (MATLAB/SIMULINK).

1.2 Modélisation du système hydraulique CE105 a réservoirs couples

1.2.1 Description du matériel de système hydraulique CE105

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 [3], une valve rotative, utilisée pour changer la section du canal et, par conséquent, pour changer les caractéristiques d'écoulement entre les réservoirs

Il comporte également des capteurs de niveau, dans chaque réservoir, donnant une tension proportionnelle au niveau du liquide [4].

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. Un canal de débordement est inclus au-dessus de chaque réservoir. La sortie de la pompe est mesurée par un capteur de débit. Le problème à étudier est de maintenir le niveau désiré du liquide dans le deuxième réservoir lors du fonctionnement sous différentes conditions d'entrée/sortie.

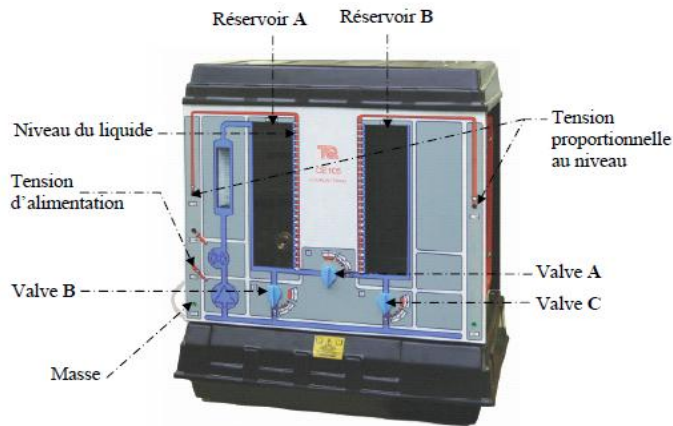


Figure1. 1 Présentation du système hydraulique CE105 a réservoirs couplés.

1.2.2 Modélisation du CE105

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

Comme il est illustré sur la figure 1.2, le CE105 contient deux réservoirs, et caractérisé par deux états h_1 (le niveau dans le premier réservoir) et h_2 (le niveau dans le deuxième réservoir) [1].

Et trois débits, Q_e c'est le débit d'entrée généré par la pompe, et Q_{12} est le débit entre le premier et le deuxième réservoir ; Q_0 est le débit sortant par la valve C.

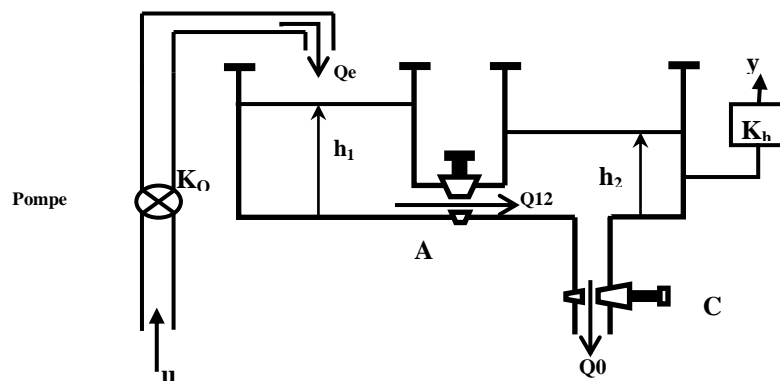


Figure1. 2 Système hydraulique à réservoirs couplés

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

$$A \cdot \frac{dh_1}{dt} = Q_e - Q_{12} \quad (1.1)$$

Pour le deuxième réservoir

$$A \cdot \frac{dh_2}{dt} = Q_{12} - Q_0 \quad (1.2)$$

Le débit d'entrée du deuxième réservoir Q_{12} dépend de la différence entre les deux hauteurs tel que :

$$Q_{12} = s_n \cdot a_{12} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} \quad (1.3)$$

Le débit de sortie Q_0 dépend seulement du niveau h_2 par :

$$Q_0 = s_n \cdot a_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2} \quad (1.4)$$

Avec, A la section du réservoir, h_i le niveau du liquide dans le réservoir, Q_e le débit d'entrée généré par la pompe ; et Q_{12} est le débit entre les deux réservoirs [5] tels que :

Alors :

$$\begin{cases} Q_{12} = S_n \cdot a_{12} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} \\ \text{et} \\ Q_0 = S_n \cdot a_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2} \end{cases} \quad (1.5)$$

s_n : est la section des valves A et C .

a_{12}, a_0 : représentent les coefficients de décharge de la valve A et C .

g : la constante de gravité, avec $g = 980 \text{ cm} / \text{s}^2$

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

$$\begin{cases} \frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{A} (Q_e - S_n \cdot a_{12} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)}) \\ \text{et} \\ \frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A} (S_n \cdot a_{12} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} - S_n \cdot a_0 \sqrt{2g \cdot h_2}) \end{cases} \quad (1.6)$$

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 :

$$Q_e = K_Q \cdot u \quad \text{Et,} \quad y_i = K_h \cdot h_i, \quad i = 1, 2. \quad (1.7)$$

Donc, il nous reste qu'à déterminer les gains K_Q et K_h . Ceci constitue l'objectif de l'étape suivante [5]

Le modèle qui décrit le comportement du système CE105 est le suivant :

$$\begin{cases} \dot{h}_1 = \frac{1}{A} (K_Q \cdot u - S_n \cdot a_{12} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)}) \\ \text{et} \\ \dot{h}_2 = \frac{1}{A} (S_n \cdot a_{12} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} - S_n \cdot a_0 \sqrt{2g \cdot h_2}) \end{cases} \quad (1.8)$$

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 :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{A} (S_n \cdot a_{12} \sqrt{2 \cdot g \cdot (x_2 - x_1)} - S_n \cdot a_0 \sqrt{2g \cdot x_1}) \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{A} (-S_n \cdot a_{12} \sqrt{2 \cdot g \cdot (x_2 - x_1)} + K_Q \cdot u) \\ y = K_h \cdot x_1 \end{cases} \quad (1.9)$$

En choisissant: $\beta_1 = \frac{S_n \cdot a_{12} \sqrt{2g}}{A}$, $\beta_2 = \frac{S_n \cdot a_0 \sqrt{2g}}{A}$, $K_u = \frac{K_Q}{A}$ (1.10)

Le modèle d'état:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \beta_1 \sqrt{(x_2 - x_1)} - \beta_2 \sqrt{x_1} \\ \dot{x}_2 = -\beta_1 \sqrt{(x_2 - x_1)} + K_u \cdot u \\ y = K_h \cdot x_1 \end{cases} \quad (1.11)$$

Dans notre travail, nous avons opté pour le cas où le système est non linéaire et couplé (avec la valve B fermée). Pour cette configuration le système est appelé "CE105 à réservoirs couplés".

Les paramètres du système sont donnés au tableau 1.1 :

Définition	symbole	valeur
Section du chaque réservoir	A	$9350 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$
Section de l'ouverture variable de chaque valve	s ₁	$78.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$
	s ₂	$78.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$
Coefficient de décharge	a ₁₂	1
	a ₀	0.6
Gain de la pompe	K _Q	$450 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{v}/\text{min}$
Gain du capteur de niveau	K _h	41 v/m
Constante de gravité	g	$9.81 \text{ m}/\text{sec}^2$

Tab 1. 1 Paramètres du système hydraulique.[1]

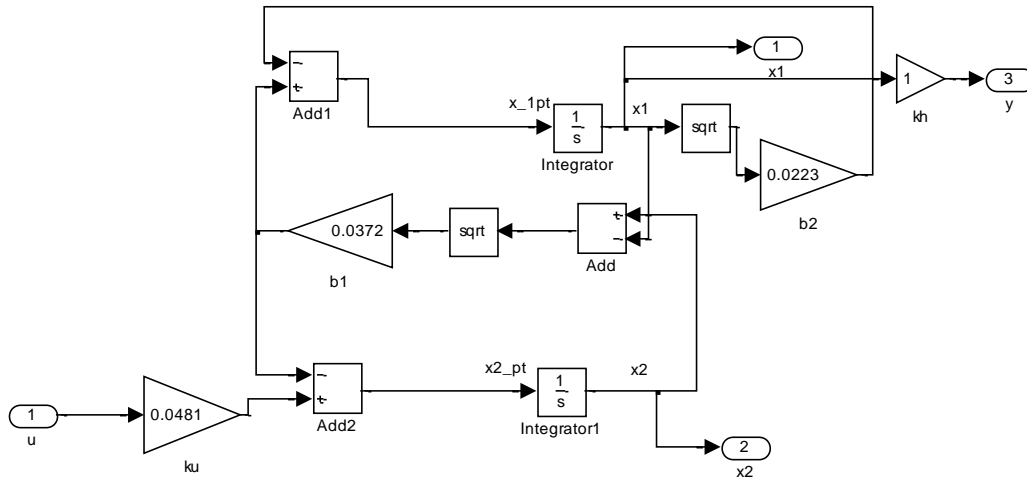


Figure1. 3 Schéma block du système CE105 en boucle ouverte sur MATLAB

La réponse en boucle ouverte du système CE105 est donnée par la figure 1.4 :

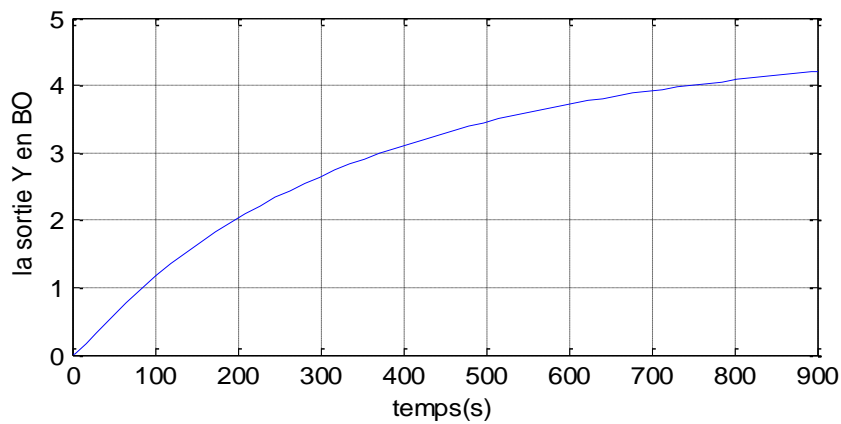


Figure1. 4 Réponse en boucle ouverte du système CE105

1.2 Commande par régulateur PID

1.2.1 Introduction

Encore utilisé en raison du poids du passé, à la fois matériel et culturel :

Matériel :

Grâce à la découverte de l'amplificateur opérationnel, le premier P.I.D. est commercialisé en 1930; puis dans les années 1940 beaucoup d'installations P.I.D. pneumatiques voient le jour; à partir des années 1970 l'arrivée des circuits intégrés permet la commande numérique beaucoup moins restrictive que le P.I.D. [6]

Culturel :

Plus de 70 ans d'expérience, la régulation P.I.D. reste encore la plus utilisée et bien qu'implantée en numérique, c'est toujours la version initiale du continu.

1.2.2 Principe

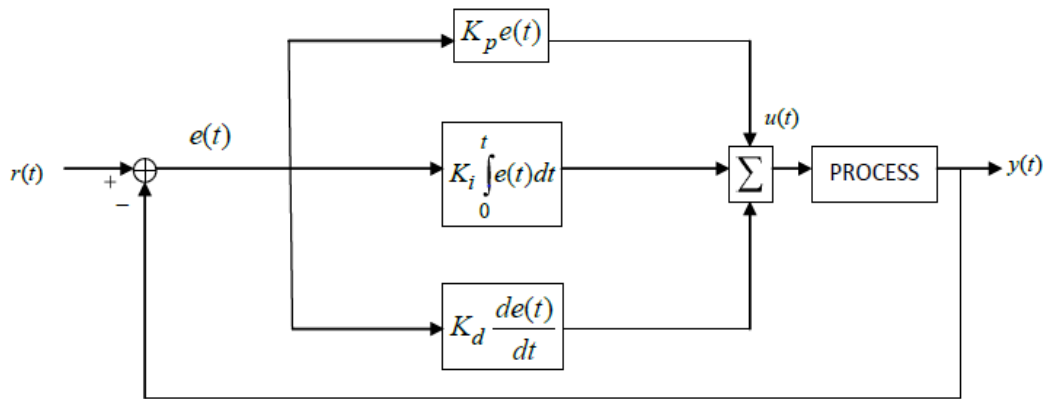


Figure1. 5 régulateur PID.

P: action proportionnelle à l'erreur de réglage (la plus naturelle)

I: action par intégration ; permet d'annuler l'erreur statique (pour une référence constante); dégrade généralement la réponse transitoire

D: action dérivée permet d'améliorer la réponse transitoire grâce à l'effet d'anticipation [7]

a) Action Proportionnelle

Pour cette action, l'erreur est multipliée par la constante P (pour Proportionnel) qui est négative, puis ajoutée (soustraction de l'erreur de mesure) à la quantité réglée.

P est valide uniquement sur la bande dans laquelle le signal de sortie du régulateur est proportionnel à l'erreur du système. Noter que si l'erreur de mesure est égale à zéro, la partie proportionnelle de la sortie du régulateur est également à zéro

Dans le cas d'un correcteur proportionnel, la loi de commande corrigée $u(t)$ est proportionnelle à l'écart

$$\varepsilon(t): u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) \quad (1.12)$$



Action Proportionnelle

Figure1. 6 Action Proportionnelles

b) Action Intégrale

Le terme I permet d'améliorer la précision mais il introduit un déphasage de -90° ce qui risque de rendre le système instable du fait de la diminution de la marge de phase.

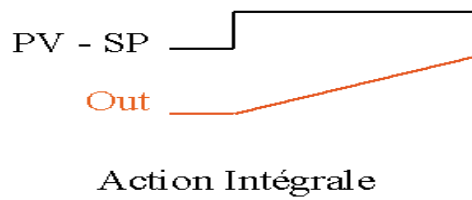


Figure1. 7 Action Intégrale

c) Action Dérivée

L'action D intervient uniquement sur la variation de l'erreur ce qui augmente la rapidité du système. Elle introduit aussi un déphasage de $+90^\circ$ ce qui augmente la stabilité du système. [5]

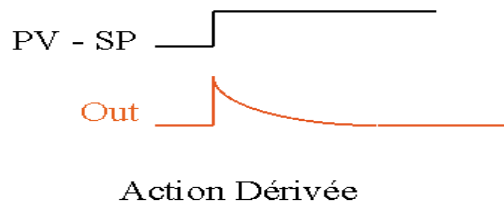


Figure1. 8 Action Dérivée

1.2.3 Différentes structures d'un PID

Il existe trois types d'algorithme PID :

a) le PID série

$$C(p) = K_c \frac{(1+T_i p)}{T_i p} (1+T_d p) \tag{1.13}$$

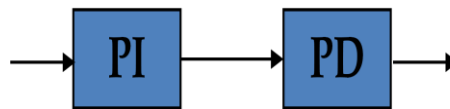


Figure1. 9 PID série

b) le PID mixte

$$C(p) = K_c (1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p) \tag{1.14}$$

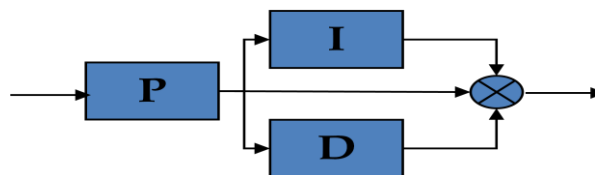


Figure1. 10 PID mixte

c) le PID parallèle

$$C(p) = K_c + \frac{1}{T_i p} + T_d p \quad (1.15)$$

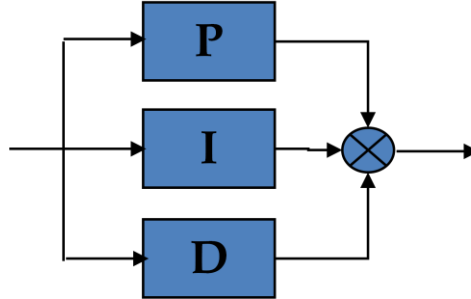


Figure1. 11 PID parallèle

1.2.4 Avantages et inconvénients : réglabilité

➤ **Avantage**

Matériel standardisé, conception et méthodes de calcul standard et simples, souvent empiriques.

➤ **Inconvénients**

- À peu près correct pour les bons systèmes, mais pas utilisable pour les systèmes à faible réglabilité, c'est-à-dire rapides (temps de montée) relativement au temps de retard (retard pur + temps de décollement) :

$$\frac{t_m}{t_r + t_d} < 4 \quad (1.16)$$

Plus la réglabilité augmente, plus le régulateur PID peut être simple :

$$\frac{t_m}{t_r + t_d} > 10 \text{ action P} \quad (1.17)$$

$$\frac{t_m}{t_r + t_d} > 7.5 \text{ action PI} \quad (1.18)$$

$$\frac{t_m}{t_r + t_d} > 4 \text{ action PID} \quad (1.19)$$

- Jamais utilisable pour les systèmes fortement non linéaires ou pour les systèmes multivariables (non découplés). [6]

Remarque

Nous pouvons étudier le système CE105 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). Pour cette configuration le système est appelé “CE105 à réservoirs couplés”.

1.3 Application de la commande PID sur le système CE105

Le schéma bloc de la commande est donné par la figure 1.12 :

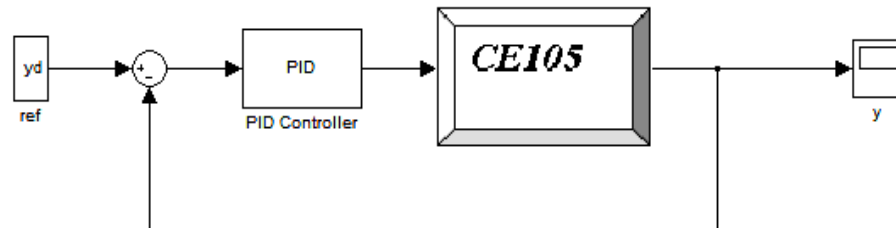


Figure1. 12 Schéma bloc de la régulateur PID appliquée au système hydraulique CE105

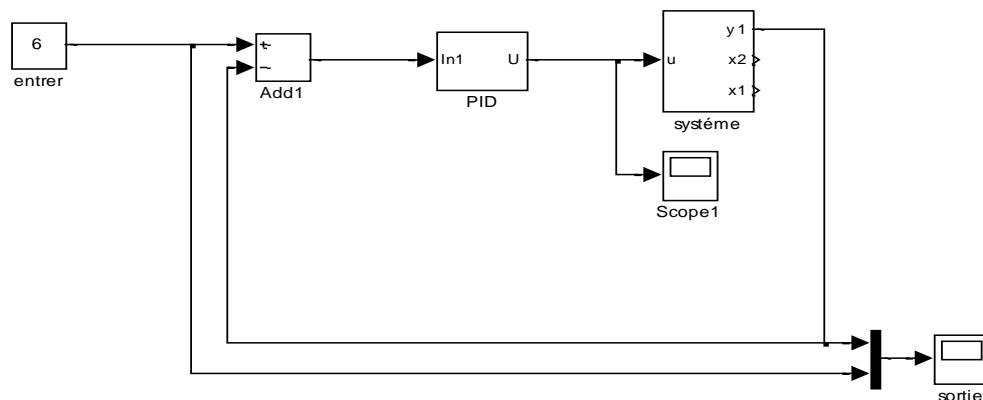


Figure1. 13 Schéma bloc en boucle fermé sur MATLAB

1.3.1 Résultat de simulation

Ces résultats ont été obtenus en utilisant le modèle mathématique du système hydraulique CE105 à réservoirs couplés avec les paramètres de simulation suivants [1] :

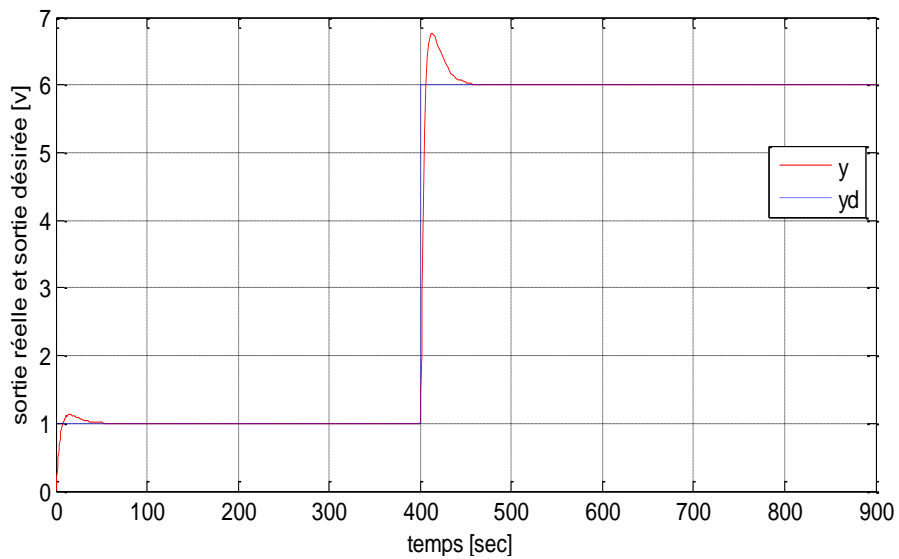
- ✓ la section de chaque réservoir $A = 9350.10^{-6}m^2$,
- ✓ la section de chaque valve $s_n = 78.5. 10^{-6}m^2$,
- ✓ coefficient de décharge $a_0 = 0.6$,
- ✓ coefficient de décharge $a_{12} = 1$,
- ✓ le gain de la pompe $K_Q = 450 \text{ cm}^3.V/min$,
- ✓ le gain $K_h = 41 \text{ V/m}$;
- ✓ la période d'échantillonnage $T = 0.2 \text{ sec}$ et
- ✓ le temps de simulation $T_{max} = 900 \text{ sec}$;

✓ la constante de gravité $g= 9.81m/s^2$.

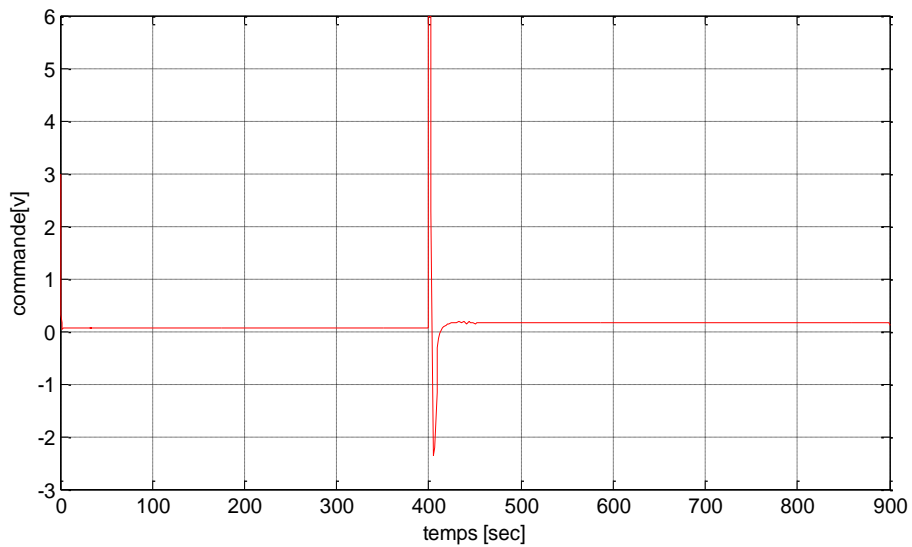
En utilisant les paramètres du contrôleur PID suivants:

paramètre	Valeur
k_p	3
k_i	0.2
k_d	10

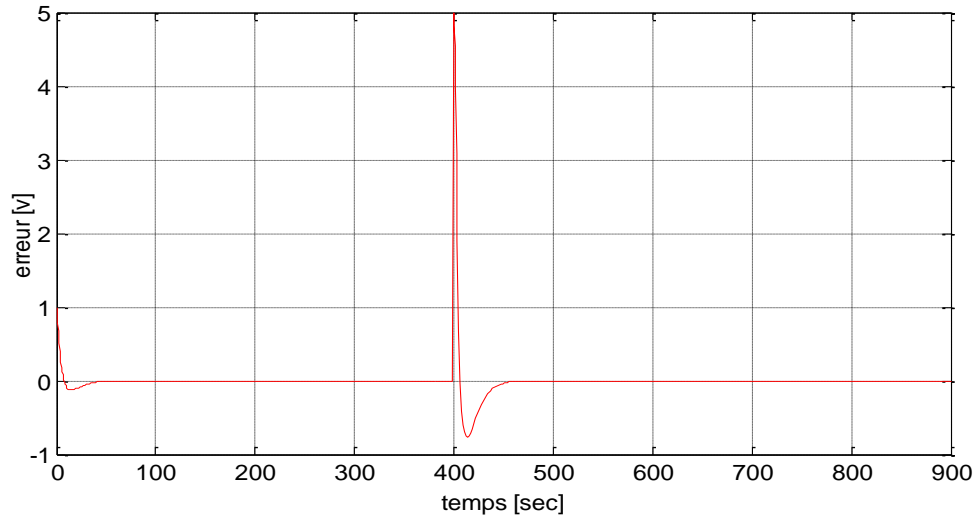
Tab 1. 2 les paramètres du contrôleur PID



a : la sortie



b : la commande



c : l'erreur

Figure1. 14 Résultats de simulation de la commande par régulateur PID appliquée au système CE105.

1.3.2 Commentaires sur ses résultats

Les résultats de simulation de la commande par régulateur PID appliquée sur le système hydraulique CE105, sont présentés sur les figures 1.14. Nous remarquons qu'on a abouti à des résultats satisfaisants en termes de poursuite, avec un petit dépassement et un temps de réponse environ de 40 secs, ce qui est acceptable par rapport à la nature des systèmes hydrauliques. Des pics sont apparus au niveau de la commande effective, ceci est dû au changement brusque de la consigne.

1.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la description de système hydraulique CE105. Dans notre travail, nous avons opté pour le cas où le système est non linéaire et couplé CE105 à réservoirs couplés. Dans ce chapitre, nous avons abordé à la méthode de synthèse d'une loi de commande par régulateur PID pour ce système non linéaire.

La simulation effectuée sur le système hydraulique CE105, permet de conclure que les erreurs de poursuites sont relativement faibles.

Chapitre 02 : Commande par la logique floue

2.1 Introduction

La logique floue a vu le jour après la logique booléenne. Cette dernière est basée sur le principe que toute proposition ne peut être que vraie ou fausse (tout ou rien), et pourtant la pensée humaine est beaucoup plus complexe et plus nuancée qu'un ensemble rigide de lois car, pour un être humain, le mot "rien" n'est pas tout à fait blanc ou noir, on trouve dans notre langage habituel "assez grand, presque chaud, pas chaud...etc.". Alors, les propositions nécessitent un élargissement à la logique classique. [8]

Dans ce chapitre, on présentera un aperçu général sur la théorie de la logique floue et ses principes de base. Ensuite, on montrera comment construire un régulateur flou, enfin une application sur le système hydraulique CE105.

2.2 Historique

La logique floue débute officiellement en 1965 avec la publication de l'article « fuzzy sets » (ensemble flou) par le professeur Lotfi Zadeh (professeur émérite à l'université de Berkeley en Californie s'intéressait à la compréhension de système complexe) il pose les bases théoriques de la logique floue. [9]

Les quelques points de repères historiques suivants permettent de situer dans le temps le développement de la logique floue et ses applications au réglage : Le 1973 Lotfi propose d'appliquer la logique floue aux problèmes de réglage. En 1974, première application du réglage par la logique floue appliquée à une turbine à vapeur, en 1975 E.H. Mamdani expérimente un régulateur flou qu'il perfectionne au cours des années suivantes. Sugeno décrit des applications industrielles possibles en régulation floue, tel que premiers produits industriels (JAPON) utilisant le principe de la logique floue appliqué à des problèmes de réglage et de commande. En 1995 J.S.R. Jang élargit la logique floue aux systèmes à réseaux de neurones et l'intelligence artificielle [9].

2.3 Théorie de la logique floue

2.3.1 Principe fondamental de la logique floue

Une des caractéristiques du raisonnement humain est qu'il est généralement fondé sur des données imprécises ou même incomplètes. En effet les connaissances dont nous disposons sur un système quelconque sont généralement incertaines ou vagues, soit parce que nous avons un doute sur leur validité ou alors nous éprouvons une difficulté à les exprimer clairement. Par exemple : dans la logique classique, une vitesse peut être qualifiée par les termes « Elevée ». Mais dans la logique floue, des échelons d'appréciation intermédiaires de la variable vitesse sont possibles. La «Vitesse» devient une variable linguistique dont les valeurs sont par exemple : « Très faible », « Faible », «Moyenne », «Elevée », « Très élevée». La logique floue peut être considérée comme une extension de la logique classique.

2.3.2 Logique classique et logique floue

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

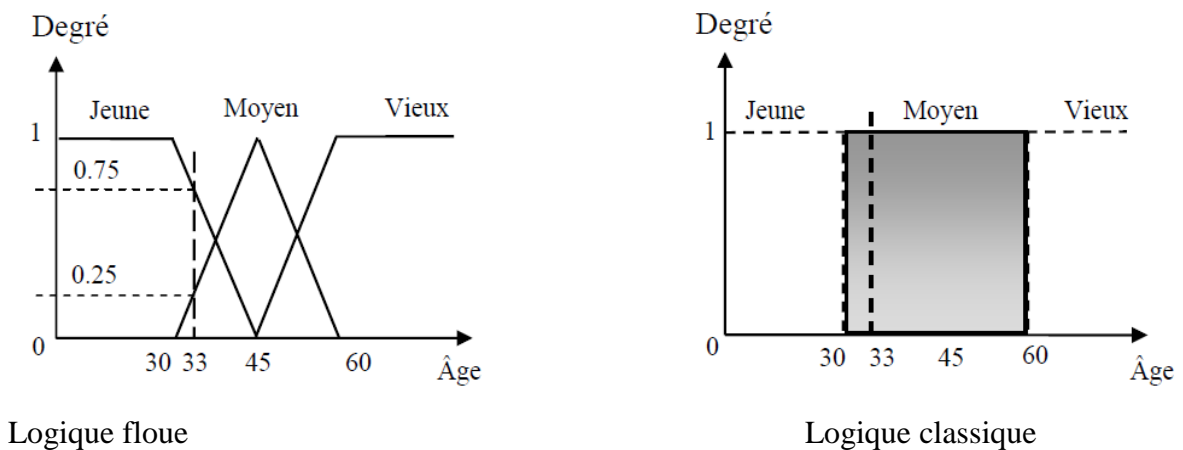


Figure2. 1 Logique classique et logique floue

2.3.3 Application de la logique floue

Tandis que son application au niveau des systèmes de réglage et de commande est relativement récente, depuis quelques années la commande par la logique floue a connu, essentiellement au Japon à partir de 1985 un essor appréciable. En effet, elle a été appliquée dans des problèmes industriels pour résoudre des problèmes de régulation aussi divers, liés à l'énergie, le transport, les machines outils, et la robotique [10].

2.3.4 Généralité sur la logique floue

On a mentionné que le principe général et la théorie de base de la logique floue englobent des aspects de la théorie des possibilités qui fait intervenir des ensembles d'appartenances appelés ensembles flous caractérisant les différentes grandeurs du système à commander et le raisonnement flou qui emploie un ensemble de règles floues établies par le savoir faire humain et dont la manipulation permet la génération de la commande adéquate ou la prise de la décision.

Ainsi, les éléments constituant la théorie de base de la logique floue sont :

- Les variables linguistiques et les ensembles flous.
- Les fonctions d'appartenance.
- et les inférences à plusieurs règles floues

2.3.5 Variables linguistiques

C'est une variable dont les valeurs ne sont pas des nombres, mais des mots ou phrases exprimés en langage naturel. La raison pour laquelle cette représentation est utilisée, est que le caractère linguistique est moins spécifique que le caractère numérique.

Une variable linguistique x est généralement caractérisée par un triplé $\{x, T(x), X\}$ où x désigne le nom de la variable, X son univers de discours, et $T(x)$ son ensemble de termes ou valeurs linguistiques [11].

Une variable linguistique est caractérisée par un triplet $(x, T(x), X)$ ou :

x: le nom de variable

T(x) : ensemble de termes de variable, c'est l'ensemble des noms des valeurs linguistiques de x dont chaque valeur est un sous-ensemble flou défini dans U .

X : l'univers de discours.

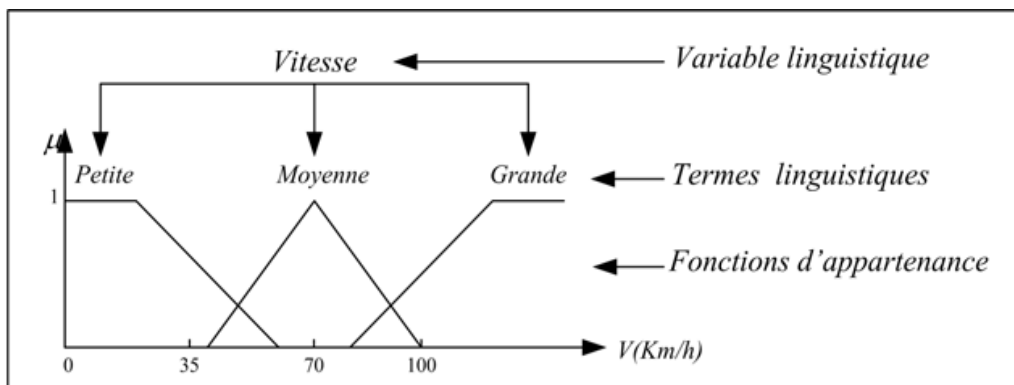


Figure2. 2 Variable linguistique

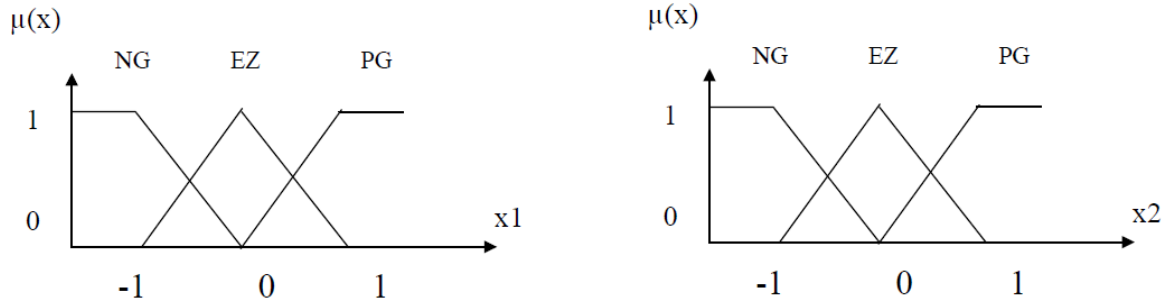


Figure2. 3 Fonctions d'appartenance des deux variables linguistiques d'entrée normalisées x_1 et x_2

La sortie du régulateur flou doit générer la variation du rapport cyclique du convertisseur qui est une troisième variable linguistique du régulateur ($xr = \delta d$), et qui est aussi normalisée. A titre d'exemple ses fonctions d'appartenance sont illustrées par la figure (2.4).

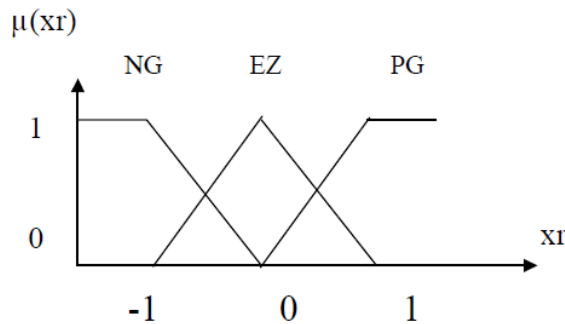


Figure2. 4 Fonctions d'appartenance de la variable linguistique de sortie normalisée xr

2.3.6 Sous ensembles floues

En logique binaire, la fonction d'appartenance caractérisant l'appartenance d'un élément x , de l'univers de discours X à un ensemble classique A , prend uniquement la valeur 0 et 1 :

$$\mu_A(x): X \rightarrow \{0,1\}$$

$$\begin{cases} x \rightarrow \mu_A(x) = 1 & \text{si } x \in A \\ \mu_A(x) = 0 & \text{si } x \notin A \end{cases} \quad (2.1)$$

Un sous ensemble flou peut être vu comme une généralisation du concept d'ensemble classique.

Dans la théorie des sous ensembles flous, les valeurs de la fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ sont comprises dans l'intervalle $[0 ; 1]$:

$$x \rightarrow \mu_A(x) / X \rightarrow [0,1] \quad (2.2)$$

Un ensemble flou A est défini par l'ensemble de paires ordonnées $(\mu_A(x), x)$ tel que :

$$A = \{(\mu_A(x), x) / x \in X\} \quad (2.3)$$

On peut avoir une autre forme de A comme :

$$\begin{cases} A = \int_u^n \frac{\mu_A(x)}{x} & \text{si X est continu} \\ A = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} & \text{si X est dicret} \end{cases} \quad (2.4)$$

2.3.7 Caractéristiques d'un sous ensemble flou

Les fonctions d'appartenances sont définies par quatre caractéristiques :

1-Le Type : elles peuvent être par exemple triangulaires, trapézoïdales, gaussiennes, sigmoïdes ou des singletons

2-Le Noyau : c'est la valeur qui satisfait entièrement la propriété décrite par A. Quand le noyau est réduit à un point, celui-ci est appelé valeur modale. Il est donné par

$$N(A) = \{x \in X / \mu_A(x) = 1\} \quad (2.5)$$

3-Le Support : la propriété est vérifiée, au moins partiellement. Il est donné par :

$$S(A) = \{x \in X / \mu_A(x) > 0\} \quad (2.6)$$

4-La Hauteur : c'est la valeur maximale de la fonction d'appartenance qui est égale 1 (voir la figure (2.5)).

$$H(A) = \max (\mu_A(x)) \quad (2.7)$$

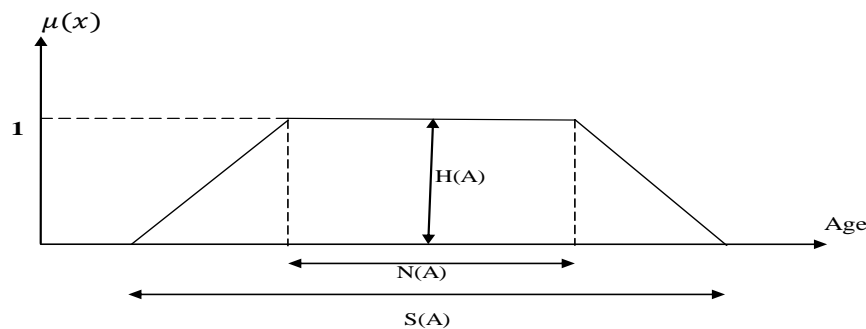


Figure2. 5 Caractéristique d'un sous –ensemble floue

2.3.8 Fonction d'appartenance

Pour faciliter le traitement numérique et l'utilisation des ensembles flous, il est nécessaire de donner une description mathématique aux fonctions d'appartenance. Les fonctions d'appartenance ci-dessous sont les plus souvent utilisées [11]

a) Triangulaire

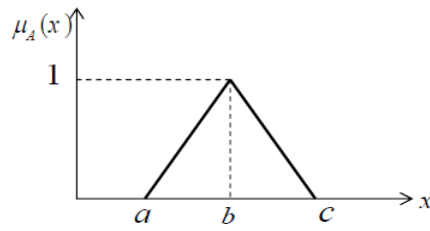


Figure2. 6 Fonction triangulaire.

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b < x \leq c \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.8)$$

b) Trapézoïdale

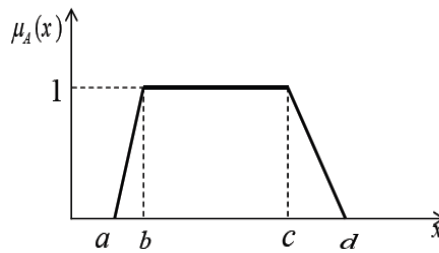


Figure2. 7 Fonction trapézoïdale.

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & a < x \leq b \\ 1 & b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c < x \leq d \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.9)$$

c) Gaussienne

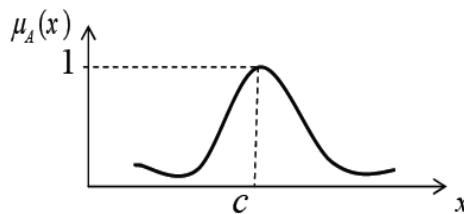


Figure2. 8 Fonction Gaussienne.

$$\mu(x) = \text{EXP} \left[- \left(\frac{x-m}{\delta} \right)^2 \right] \quad -\infty < x < +\infty \quad (2.10)$$

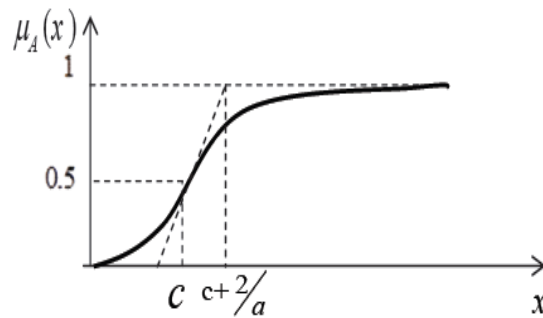
d) Sigmoïdes

Figure2. 9 Fonction sigmoïde.

2.3.9 Opérateurs de la logique floue

Supposant deux fonctions d'appartenance $u_a(x)$ et $u_b(x)$ 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 est 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. [12]

a) L'opérateur ET

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

$$u_c(z) = u_A \text{ et } B(z) = \min(u_A(x), B(y)) \quad (2.11)$$

Cet opérateur est commutatif, associatif, admet 0 comme élément absorbant et 1 comme élément neutre.

b) L'opérateur OU

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

$$u_c(z) = u_A \text{ ou } B(z) = \max(u_A(x), B(y)) \quad (2.12)$$

Cet opérateur est commutatif, associatif, admet 1 comme élément absorbant et 0 comme élément neutre.

c) L'opérateur NON

Il est caractérisé en logique floue par la fonction :

$$uc(z) = u\bar{A}(x) = 1 - uA(x) \quad (2.13)$$

Dans certaines circonstances, il est judicieux de choisir d'autres opérateurs en plus de OU, ET NON [12].

2.4 Structure d'une commande floue

La commande par la logique floue est de grande actualité aujourd'hui. La commande par la logique floue au même but qu'une commande classique. En effet, cette méthode permet d'obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire des modélisations approfondies. Par opposition à un régulateur classique, Le régulateur flou ne traite pas une relation mathématique bien définie (algorithme de réglage), mais utilise des inférences avec plusieurs règles, se basent sur des variables linguistiques. [13]

Le régulateur par logique flou est composé de quatre éléments de base suivants est présente sur la figure (2.10):

- Interface de fuzzification,
- Base de connaissances,
- Moteur d'inférence floue,
- Interface de défuzzification

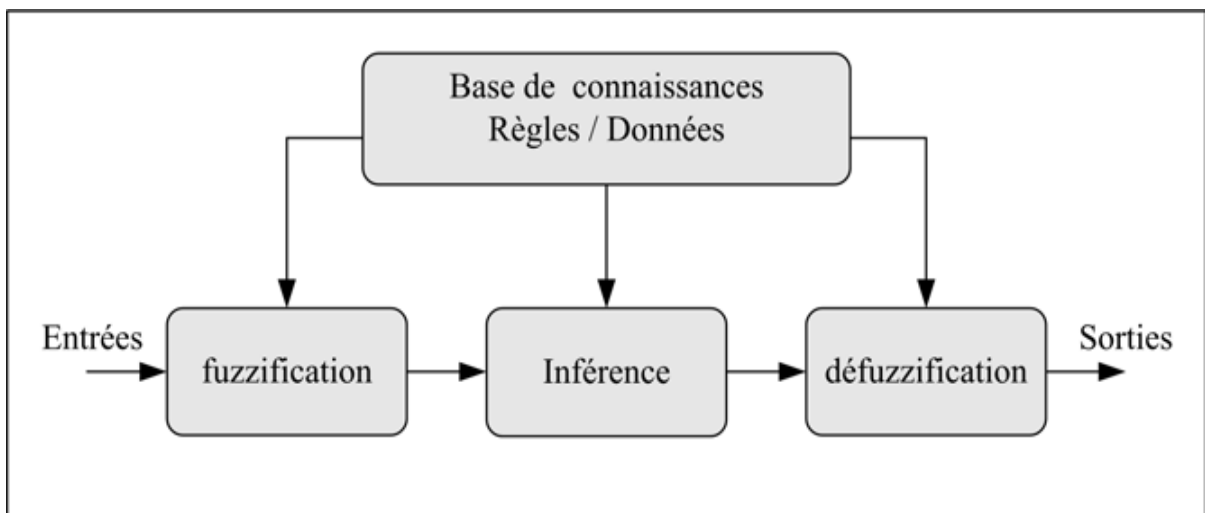


Figure2. 10 Structure interne d'un système flou

2.4.1 La base de connaissances

Elle contient les informations du domaine d'application et du contrôle. Elle est définie par les deux bases suivantes [14]

a) Base de données

Elle fournit des informations nécessaires qui sont utilisées pour l'exploration des règles de contrôle flou ainsi que la manipulation des données dans le contrôleur flou.

b) Base de règle

Elle caractérise le but et la politique du contrôle flou via un ensemble de règles de contrôle flou.

2.4.2 Interface de fuzzification

La fuzzification est l'opération de projection des variables physiques réelles sur des ensembles flous caractérisant les valeurs linguistiques prises par ces variables. Le bloc de fuzzification effectue les fonctions suivantes :

- Définition des fonctions d'appartenance de toutes les variables d'entrées ;
- Transformation des grandeurs physiques (réelles ou numériques) à des grandeurs linguistiques ou floues ;
- Représentation d'échelle transférant la plage des variables d'entrées aux univers de discours correspondants ;

Pour les fonctions d'appartenance, on utilise généralement les formes triangulaires et trapézoïdales [16] [15].

2.4.3 Mécanisme d'inférence floue

L'inférence floue ou la logique de prise de décision est le cœur du contrôleur flou qui possède la capacité de simuler les décisions humaines et de déduire (inférer) les actions de commande floue à l'aide de l'implication floue et des règles d'inférence de la logique floue.

Elle utilise les variables floues transformées par la fuzzification et les règles d'inférence pour créer et déterminer les variables floues de sortie, en se basant sur des opérations floues appliquées aux fonctions d'appartenance. Comme on l'a mentionné, il existe plusieurs possibilités pour réaliser les opérateurs flous qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance.

On introduit la notion de mécanisme ou méthode d'inférence, qui dépend des relations utilisées pour réaliser les différents opérateurs dans une inférence, permettant ainsi un

traitement numérique de cette dernière. Pour le réglage par logique floue, on utilise en général l'une des trois méthodes suivantes [17] [15]:

- Méthode d'inférence max-min (méthode de Mamdani)
- Méthode d'inférence max-produit (méthode de Larsen)
- Méthode de som-produit (méthode de Sugeno)

a) Méthode d'inférence max-min (méthode de Mamdani)

Méthode d'inférence max-min, réalise, au niveau de la condition, l'opérateur OU par la formation du maximum et l'opérateur ET par la formation du minimum [18].

b) Méthode d'inférence max-produit (méthode de Larsen)

La méthode d'inférence max-produit est réalisée, au niveau de la condition, l'opérateur «ET » par la formation du produit. La condition dans chaque règle, introduite par « ALORS » est réalisée par la formation du produit. L'opérateur « OU », qui lie les différentes règles, est réalisé par la formation du maximum [19].

c) Méthode de som-produit (méthode de Sugeno)

L'opérateur « ET » est réalisé par la formation du minimum, la conclusion de chaque règle floue a une forme polynomiale. La sortie est égale à la moyenne pondérée de la sortie de chaque règle floue [19].

Le tableau suivant résume la façon utilisée par ces trois méthodes d'inférence pour représenter les trois opérateurs de la logique floue " Et, ou et Alors".

2.4.4 Defuzzification

Elle consiste à définir précisément qu'elle doit être l'action sur le processus. En effet, le procédé ne peut pas interpréter des ordres linguistiques fournis par les méthodes d'inférences.

L'opération de défuzzification permet de calculer à partir de la fonction d'appartenance résultante, la valeur réelle de la variable de sortie à appliquer au processus. Il existe plusieurs méthodes de défuzzification : méthode du maxima, méthode du centre de gravité, méthode de la moyenne des maxima. Il est toutefois reconnu que la méthode du centre de gravité donne les meilleurs résultats [20].

a) La méthode du centre de gravité

Dans le cas où la fonction d'appartenance associée à la caractérisation floue résultant de la phase de composition est de la forme $f(v)$, la valeur numérique délivrée par la formule :

$$\text{Valeur} = \frac{\int_U v f(v) dv}{\int_U f(v) dv} \quad (2.14)$$

Avec valeur définie sur l'univers de discours U de v où $\int_U v f(v) dv$ représente le moment de $f(v)$. Cette formule est issue de celle appliquée dans le cas discret (moyenne pondérée), à savoir :

$$\text{Valeur} = \frac{\sum v_i \mu_A(v_i)}{\sum \mu_A(v_i)} \quad (2.15)$$

Où les v_i représentent les niveaux de discrétisation de la variable de sortie v et μ_A les fonctions caractéristiques de la caractérisation floue de sortie A associée à v .

Bien que les fonctions d'appartenance des caractérisations floues puissent être quelconques, force est de constater que, dans la littérature, l'on recourt souvent à des fonctions trapézoïdales, et surtout triangulaires.

Cela s'explique certainement par la facilité des opérations pouvant être réalisées sur ces fonctions, notamment dans les phases d'inférence et de Défuzzification.

En décomposant la caractérisation floue résultant de la phase de composition en polygones convexes élémentaires (triangles par exemple).

b) 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



Figure2. 11 Défuzzification par la méthode du maximum

c) La méthode de la moyenne des maxima

Pour une variable de sortie donnée, la valeur numérique délivrée est calculée comme la moyenne des valeurs appartenant à la caractérisation floue de sortie et ayant comme degré d'appartenance le maximum de la fonction caractéristique de cette caractérisation floue (Fig.2.12).

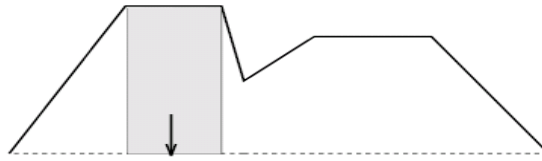


Figure2. 12 Défuzzification par la méthode de la moyenne des maxima

Une étude comparative de ces différentes approches peut être trouvée dans [21]. Il en ressort que la méthode de la moyenne des maxima assure de meilleures performances de transitions alors que la méthode du centre de gravité est plus régulière dans ses sorties.

2.4.5 Inférence floue

L'inférence floue est une relation floue définie entre deux sous-ensembles. La définition de la relation peut théoriquement faire intervenir n'importe quel opérateur de combinaison.

Pourtant, on utilise souvent les inférences floues définies par Mamdani et Sugeno.

2.5 Les règles de contrôle

C'est un ensemble de règles linguistiques qui assure le contrôle du processus. La connaissance du processus, au sens physique ou d'après les dires d'experts, permet de raisonner en temps de contrôle et de remplir des tables de règles.

2.6 Règles floues

La connaissance experte permet de déduire une proposition ou une décision définissant une loi de commande à partir d'une ou plusieurs règles floues appelées règles d'inférences. Celles-ci sont liées par des opérateurs flous ET, OU, ALORS, ...etc. Ces règles peuvent avoir la forme suivante :

Si condition une ET/OU si condition deux ALORS décision ou action.

A titre d'illustration, on prend l'exemple suivant :

Si l'erreur de vitesse est nulle 'ET' si la variation de l'erreur de vitesse est nulle ALORS garder un couple de référence constant.

Généralement, la décision ou l'action dépendant de deux variables linguistiques est donnée par [22]

Action ou opération = Si condition 1 ET 1' ALORS opération 1 OU Si condition 2 ET 2' ALORS opération 2 OU Si...
 Si condition m ET m' ALORS opération m

2.7 Application sur le système CE105

La logique floue permet d'exploiter les informations linguistiques émanant de l'expert humain décrivant le comportement dynamique du système autour de certains points de fonctionnement.

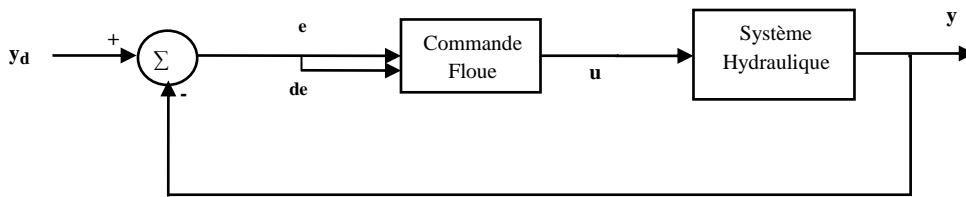
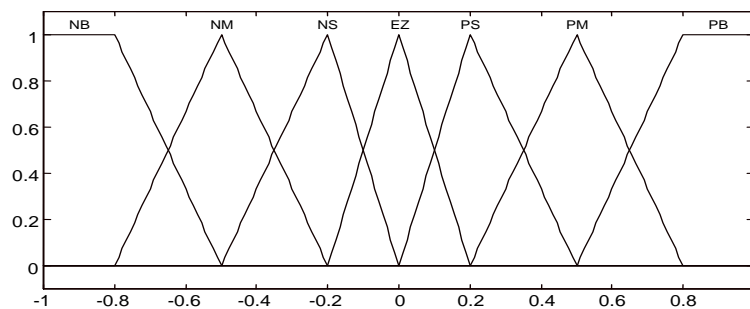


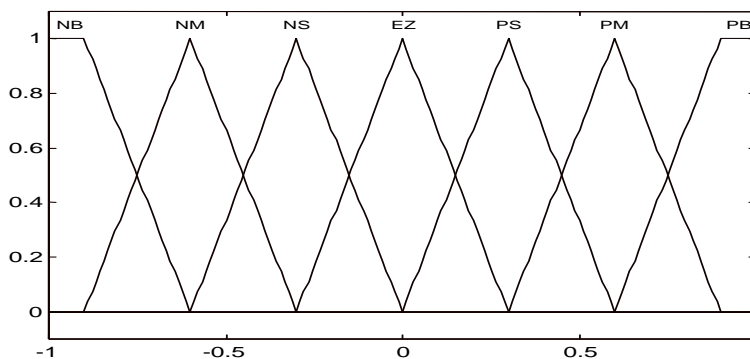
Figure2. 13 Schéma bloc de la commande par la logique floue.

2.7.1 Définition des entrées / sorties

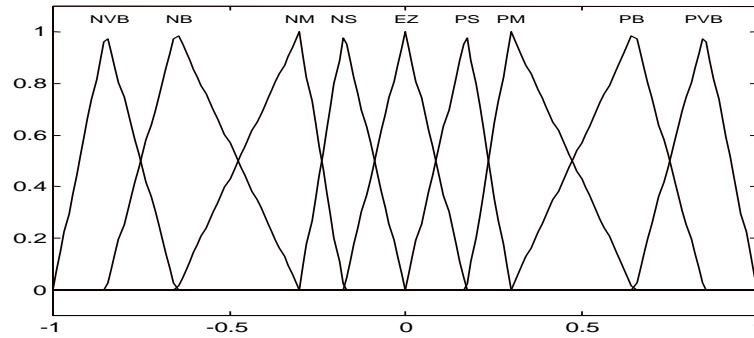
Le régulateur flou utilisé est de type Mamdani dont les entrées sont : l'erreur et sa variation et pour le choix de la forme des fonctions d'appartenance, nous avons opté pour la forme triangulaire et trapézoïdale



(a) : l'entrée $e(t)$.



(b) : l'entrée $\Delta e(t)$.



(c) : La sortie $u(t)$

Figure2. 14 Fonctions d'appartenance des entrées/sorties.

Avec : NVB : négatif plus grand ; NM : négatif moyen ; NM : négatif moyen; EZ : environ zéro ; PM : positif moyen ; PB : positif grand ; PVB : positif plus grand.

2.7.2 Base de Règle

e		e						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
de	NB	NVB	NVB	NVB	NB	NM	NS	ZE
	NM	NVB	NVB	NB	NM	NS	ZE	PS
	NS	NVB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
	ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PVB
	PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PVB	PVB
	PB	ZE	PS	PM	PB	PVB	PVB	PVB

Tab 2. 1 Table de règles[1]

2.7.3 Résultats de simulation

Les résultats de la commande logique floue appliquée au système hydraulique à réservoirs couplés sont illustrés par les figures 2.15

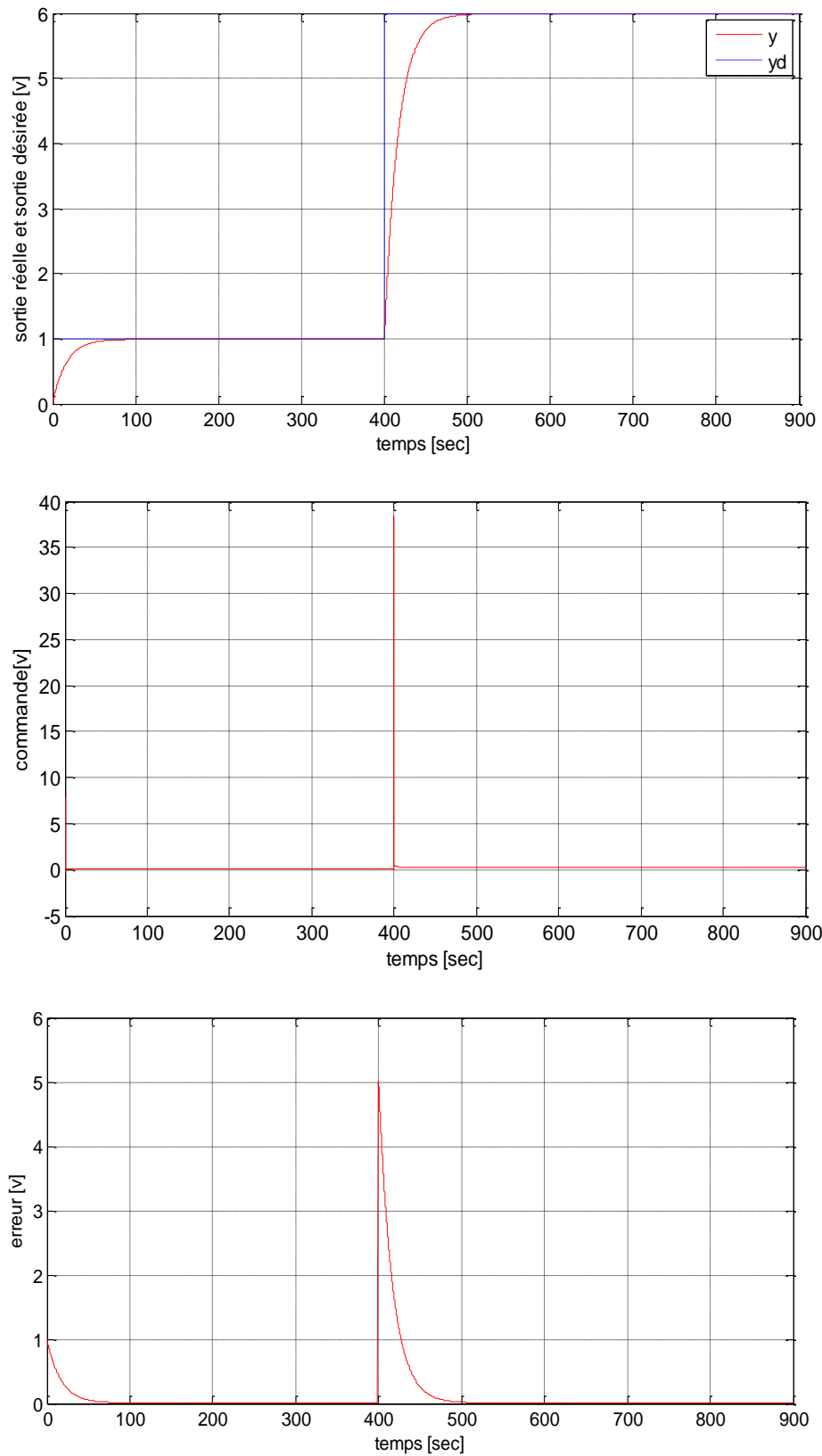


Figure2. 15 Résultats de simulation de la commande Floue

2.7.4 Commentaires sur les résultats

A travers les résultats de simulation disponibles dans la Les figures 2.15 Montrez-nous que l'application commande Floue Nous donne un contrôle considérable et système efficace Par exemple, le temps de réponse est environ 70 sec, ce qui est normal par rapport à la Dynamique lente qui caractérise les systèmes hydraulique. En outre, la commande synthétisée est robuste vis-à-vis les erreurs de modélisations et les variations paramétriques.

2.8 Conclusion

Les commandes à base de logique floue apportent une amélioration significative des performances par rapport à des commandes linéaires plus classiques. Les résultats obtenus en utilisant un contrôleur flou appliqué au système hydraulique. Permettent de conclure que : La régulation par logique floue donne de bonnes performances pour ce qui est de la qualité des réponses dynamiques du système. C'est l'une des principales propriétés de la logique floue qui permet de définir et d'atteindre avec facilité un équilibre optimal.

Chapitre 03 : Commande par backstepping

3.1 Introduction

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 [23]. Cette technique offre une méthode systématique, en combinant la notion de contrôle de Lyapunov avec une procédure récursive 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.

L'objectif de cette technique est de calculer, en plusieurs étapes, une commande qui garantie la stabilité globale du système [24]. Contrairement à la plupart des autres méthodes, le backstepping n'a aucune contrainte de non linéarité.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la commande non linéaire commande backstepping. On traitera d'abord les principes fondamentaux de cette commande, par la suite nous les appliquerons au système hydraulique CE105.

3.2 Définitions

Quelques définitions relatives à la stabilité des systèmes non linéaires seront données. Les méthodes d'analyse seront brièvement présentées. On parlera surtout des méthodes de Lyapunov et plus particulièrement sa deuxième méthode, qui constitue l'élément essentiel de la technique du backstepping. [24]

3.3 Généralités sur la technique du backstepping

L'idée consiste à calculer une loi de commande afin de garantir que la dérivée d'une certaine fonction (de Lyapunov) soit définie positive et que sa dérivée soit toujours négative. La méthode consiste à fragmenter le système en un ensemble de sous-systèmes imbriqués d'ordre décroissant. Le calcul de la fonction de Lyapunov s'effectue, ensuite, récursivement en partant de l'intérieur de la boucle. A chaque étape, l'ordre du système est augmenté et la partie non stabilisée lors de l'étape précédente est traitée. À la dernière étape, la loi de commande est

trouvée. Celle-ci permet de garantir, en tout temps, la stabilité globale du système compensé tout en travaillant en poursuite et en régulation [25].

3.4 Les avantages de la commande backstepping

Les avantages de la technique de backstepping, c'est qu'on peut l'associer à d'autres méthodes de l'automatique moderne dans l'objectif d'améliorer les performances. La commande par mode de glissement non linéaire est l'une des méthodes qui s'associe à la technique de backstepping avec une procédure très simple [26].

Aussi, une autre solution permettant d'améliorer la robustesse de la commande par backstepping et pour être en mesure d'éliminer les erreurs résiduelles, en présence de perturbation à moyenne non nulle, une action intégrale est introduite dans les contrôleurs générés par le backstepping [27].

3.5 Principe de la commande par backstepping

L'idée consiste à calculer une loi de commande afin de garantir que la dérivée d'une certaine fonction (de Lyapunov) définie positive, soit toujours négative. Pour cela, le système est décomposé en un ensemble de sous-systèmes imbriqués.

Le calcul de la fonction de Lyapunov s'effectue, ensuite, récursivement en partant de l'intérieur de la boucle. A chaque étape, l'ordre du système est augmenté et la partie non stabilisée lors de l'étape précédente est traitée. [28]

La loi de commande à appliquer est synthétisée à la dernière étape. Elle doit garantir, à chaque instant, la stabilité globale du système compensé tout en travaillant en poursuite ou en régulation. [29]

3.6 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 [30].

3.6.1 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 :

$$\dot{x} = f(x_e) + (x - x_e) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{x=x_e} + h(x, t) \quad (3.1)$$

$h(x, t)$ 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 :

$$\dot{x} = A \cdot x \quad \text{Tel que} \quad A = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (3.2)$$

Considérant maintenant le système régi par l'équation suivante:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad \text{Tel que} \quad f(0,0) = 0 \quad (3.3)$$

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

$$A = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{(x_e=0, u=0)}, \quad B = \left(\frac{\partial f}{\partial u} \right)_{(x_e=0, u=0)} \quad (3.4)$$

Théorème 3.1 : 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.

3.6.2 Méthode directe 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) [31]. 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 [5].

a) 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 :

$$\dot{x} = f(x), x_e = 0 \tag{3.5}$$

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

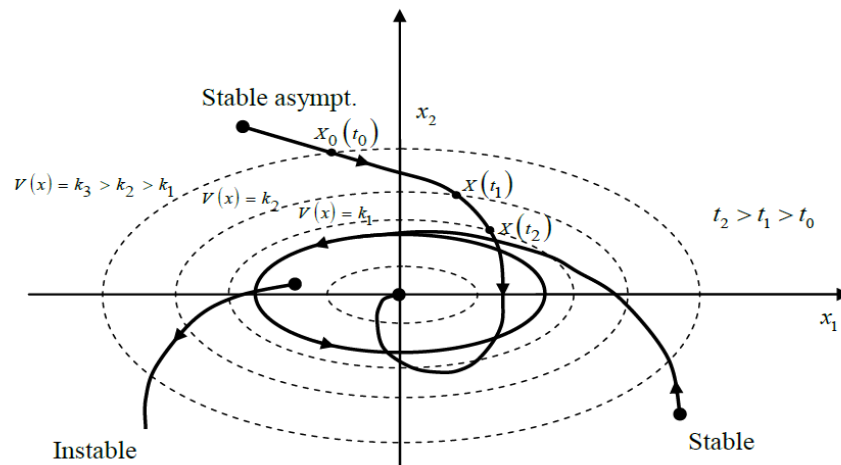


Figure3. 1 Interprétation géométrique du théorème de Lyapunov

b) 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 [30].

3.7 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 [32,23].

Algorithme de base

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

$$\dot{x}_1 = f_1^T(x_1)\vartheta + g_1(x_1)x_2 \quad (3.6)$$

$$\dot{x}_2 = f_2^T(x_1, x_2)\vartheta + g_2(x_1, x_2)x_3 \quad (3.7)$$

$$\dot{x}_3 = f_3^T(x_1, x_2, x_3)\vartheta + g_3(x_1, x_2, x_3)u \quad (3.8)$$

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 (3.2), où la variable d'état x_2 est traitée comme une commande (fictive) et l'on définit la première valeur désirée :

$$(x_1) \triangleq \alpha_0 = y_r \quad (3.9)$$

La première variable d'erreur se définit par,

$$e_1 = x_1 - \alpha_0 \quad (3.10)$$

Avec ces variables, le système (3.10) s'écrit

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{\alpha}_0 = f_1^T \vartheta + g_1 x_2 - \dot{\alpha}_0 \quad (3.11)$$

On prend la fonction de Lyapunov suivante,

$$V_1(e_1) = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (3.12)$$

Sa dérivée, est donnée par,

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 [f_1^T \vartheta + g_1 x_2 - \dot{\alpha}_0] \quad (3.13)$$

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 :

$$[f_1^T \vartheta + g_1 x_2 - \dot{\alpha}_0] e_1 = -k_1 e_1 \quad (3.14)$$

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

$$(x_2)_d = \frac{1}{g_1} [-k_1 e_1 - f_1^T \vartheta + \dot{\alpha}_0] \quad (3.15)$$

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

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 \leq 0 \quad (3.16)$$

Ce qui assure la stabilité asymptotique de (3.7)

Etape 2

On considère le sous-système (3.2), (3.3) et l'on définit la nouvelle variable d'erreur

$$e_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (3.17)$$

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 :

$$\dot{e}_1 = f_1^T \vartheta - \dot{\alpha}_0 + g_1 (e_2 + \alpha_1) \quad (3.18)$$

$$\dot{e}_2 = f_2^T \vartheta - \dot{\alpha}_1 + g_2 x_3 \quad (3.19)$$

Pour lequel on choisit comme fonction de Lyapunov,

$$V_2(e_1, e_2) = V_1 + \frac{1}{2} e_2^2 \quad (3.20)$$

Cette dernière à pour fonction dérivée, le long de la solution de (3.13), (3.14)

$$\dot{V}_2(e_1, e_2) = \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} &= e_1 [f_1^T \vartheta - \dot{\alpha}_0 + g_1(e_2 + \alpha_1)] + e_2 [f_2^T \vartheta - \dot{\alpha}_1 + g_2 x_3] \\ &= e_1 [f_1^T \vartheta - \dot{\alpha}_0 + g_1 \alpha_1] + e_2 [f_2^T \vartheta - \dot{\alpha}_1 + g_2 x_3 + g_1 e_1] \\ &= -k_1 e_1^2 + e_2 [f_2^T \vartheta - \dot{\alpha}_1 + g_2 x_3 + g_1 e_1] \end{aligned} \quad (3.22)$$

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

$$(x_3)_d = \alpha_2 = \frac{1}{g_2} [\dot{\alpha}_1 - f_2^T \vartheta - g_1 e_1 - k_2 e_2] \quad (3.23)$$

Pour $k_2 > 0$ on trouve que,

$$\dot{V}_2 \leq -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 \leq 0 \quad (3.24)$$

D'où la stabilité asymptotique de l'origine.

Etape3

Le système (3.2), (3.3) est maintenant considéré dans sa globalité. La variable d'erreur est définie,

$$e_3 = x_3 - \alpha_2 \quad (3.25)$$

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

$$\dot{e}_1 = f_1^T \vartheta - \dot{\alpha}_0 + g_1(e_2 + \alpha_1) \quad (3.26)$$

$$\dot{e}_2 = f_2^T \vartheta - \dot{\alpha}_1 + g_2(e_3 + \alpha_2) \quad (3.27)$$

$$\dot{e}_3 = f_3^T \vartheta - \dot{\alpha}_2 + g_3 u \quad (3.28)$$

Avec comme fonction de Lyapunov,

$$V_3(e_1, e_2, e_3) = V_2 + \frac{1}{2} e_3^2 \quad (3.29)$$

Sa dérivée devient,

$$\begin{aligned} \dot{V}_3(e_1, e_2, e_3) &= \dot{V}_2 + e_3 \dot{e}_3 \\ &= -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 + e_3 [f_3^T \vartheta - \dot{\alpha}_2 + g_3 u + g_2 e_2] \end{aligned} \quad (3.30)$$

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,

$$u = \frac{1}{g_3} [\dot{\alpha}_2 - f_3^T \vartheta - g_2 e_2 - k_3 e_3] \quad (3.31)$$

Où $k_3 > 0$

Avec ce choix, on a :

$$V_3(e_1, e_2, e_3) \leq -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 \leq 0 \quad (3.32)$$

Ceci traduit la stabilité, en boucle fermée, du système original (3.2), (3.3) et le réglage à zéro de l'erreur de poursuite [33].

3.8 Application au système CE105

3.8.1 Synthèse de la loi de commande

L'application de la technique du backstepping pour le système hydraulique CE105 est effectuée en deux étapes.

Etape1 : La première variable d'erreur se définit par $e_1 = y - y_r = K_h \cdot x_1 - y_r$, avec y_r la sortie désirée.

Dérivons cette dernière équation, on obtient :

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= K_h \cdot \dot{x}_1 - \dot{y}_r \\ &= K_h (\beta_1 \sqrt{(x_2 - x_1)} - \beta_2 \sqrt{x_1}) - \dot{y}_r \end{aligned} \quad (3.37)$$

Pour commencer le backstepping, nous devons choisir la première fonction de Lyapunov candidate. Dans le but de simplifier la synthèse de la commande, la première fonction candidate est choisie comme suit

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (3.38)$$

La dérivée temporelle de cette fonction le long de la solution du système (3.36), est

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 (K_h (\beta_1 \sqrt{(x_2 - x_1)} - \beta_2 \sqrt{x_1}) - \dot{y}_r) \quad (3.39)$$

On choisit $\phi = K_h (\beta_1 \sqrt{(x_2 - x_1)})$ comme commande virtuelle. En suite, on s'intéresse à la valeur que doit prendre cette commande, la fonction stabilisante $a = \phi$, pour que l'origine $e_1 = 0$ du système (3.36) soit stable. Pour cela, la dérivée \dot{V}_1 s'écrit

$$\dot{V}_1 = e_1 (a - \beta_2 \sqrt{x_1}) - \dot{y}_r \quad (3.40)$$

Selon la stabilité au sens de Lyapunov, l'origine du système (3.39) est asymptotiquement stable lorsque $V_1 < 0$. Ainsi, On définit la fonction stabilisante a pour avoir

$\dot{V}_1 = -c_1 e_1^2 < 0$, avec c_1 est un paramètre positif.

$$a = K_h \beta_2 \sqrt{x_1} + \dot{y}_r - c_1 e_1 \quad (3.41)$$

Finalement, on définit la deuxième variable d'erreur e_2 , à stabiliser dans la deuxième étape, telle que :

$$e_2 = \phi - a \quad (3.42)$$

$$e_2 = K_h (\beta_1 \sqrt{(x_2 - x_1)}) - K_h \beta_2 \sqrt{x_1} + \dot{y}_r - c_1 e_1 \quad (3.43)$$

Etape2 : Les équations du système dans l'espace des phases (e_1, e_2) , s'écrivent :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - c_1 e_1 \\ \dot{e}_2 = K_h \beta_1 \left(\frac{f_2(x_1, x_2) + K_h u - f_1(x_1, x_2)}{2\sqrt{(x_2 - x_1)}} \right) - K_h \beta_2 \frac{f_1(x_1, x_2)}{2\sqrt{x_1}} - \ddot{y} + c_1 (e_2 - c_1 e_1) \end{cases} \quad (3.44)$$

On peut mettre \dot{e}_2 , sous la forme suivante :

$$\begin{cases} A(x) = \frac{K_h \beta_1 K_u}{2\sqrt{(x_1-x_2)}} \\ B(x) = K_h \cdot \left(\beta_1 \cdot \frac{f_2(x_1, x_2) - f_1(x_1, x_2)}{2\sqrt{(x_1-x_2)}} - \beta_2 \frac{f_1(x_1, x_2)}{2\sqrt{x_1}} \right) - \ddot{y} + c_1(e_2 - c_1 e_1) \end{cases} \quad (3.45)$$

Donc le système (3.42) s'écrit,

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - c_1 e_1 \\ A(x)u + B(x) + c_1(e_2 - c_1 e_1) \end{cases} \quad (3.46)$$

Afin de stabiliser l'origine ($e_1 = 0, e_2 = 0$) du système (3.46). On définit la fonction de Lyapunov candidate V_2 comme suit :

$$V_2(e_1, e_2) = \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2 \quad (3.47)$$

La dérivée de V_2 le long de la solution du système (3.47), donne :

$$\dot{V}_2 = e_1(e_2 - c_1 e_1) + e_2(A(x) \cdot u + B(x) + c_1(e_2 - c_1 e_1)) \quad (3.48)$$

$$= -c_1 e_1^2 + e_2(e_1 + A(x)u + B(x) + c_1(e_2 - c_1 e_1)) \quad (3.49)$$

$$-c_2 e_2 = e_1 + A(x)u + B(x) + c_1(e_2 - c_1 e_1) \quad (3.50)$$

Après utilisation du critère de stabilité au sens de Lyapunov, loi de commande stabilisante s'écrit de la manière suivante :

$$u = -\frac{((c_1+c_2)e_2+(1-c_1^2)e_1+B(x))}{A(x)} \quad (3.51)$$

Où c_1, c_2 deux paramètres de synthèse positif.

Dans ce cas la dérivée de la fonction de Lyapunov \dot{V} , s'écrit :

$$\dot{V} = -c_1 e_1 - c_2 e_2 \quad (3.52)$$

et le système (3.46) devient :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - c_1 \cdot e_1 \\ \dot{e}_2 = -c_2 \cdot e_2 \end{cases} \quad (3.53)$$

Par conséquent, l'origine ($e_1 = 0, e_2 = 0$) est asymptotiquement stable.

La loi de commande synthétisée et la fonction de Lyapunov sont les suivantes,

$$\begin{cases} u = -\frac{((c_1+c_2)(K_h\beta_1\sqrt{(x_2-x_1)} - K_h\beta_2\sqrt{x_1} - \dot{y}_r + c_1e_1) + (1-c_1^2)e_1 + B(x))}{A(x)} \\ V(x_1, x_2) = 1/2e^2 + 1/2(K_h\beta_1\sqrt{(x_2-x_1)} - K_h\beta_2\sqrt{x_1} - \dot{y}_r + c_1e)^2 + 1/2((1-c_1^2)e_1)^2 \end{cases} \quad (3.54)$$

Le schéma bloc de cette commande est illustré par la figure (3.2)

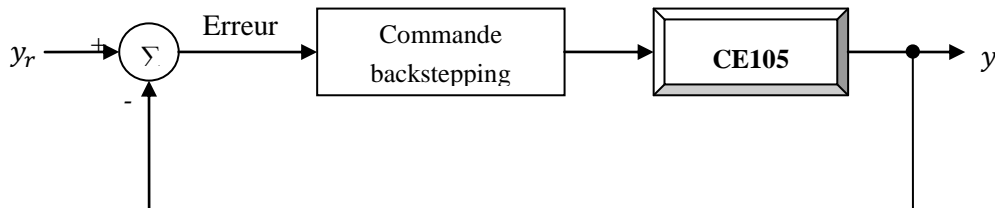
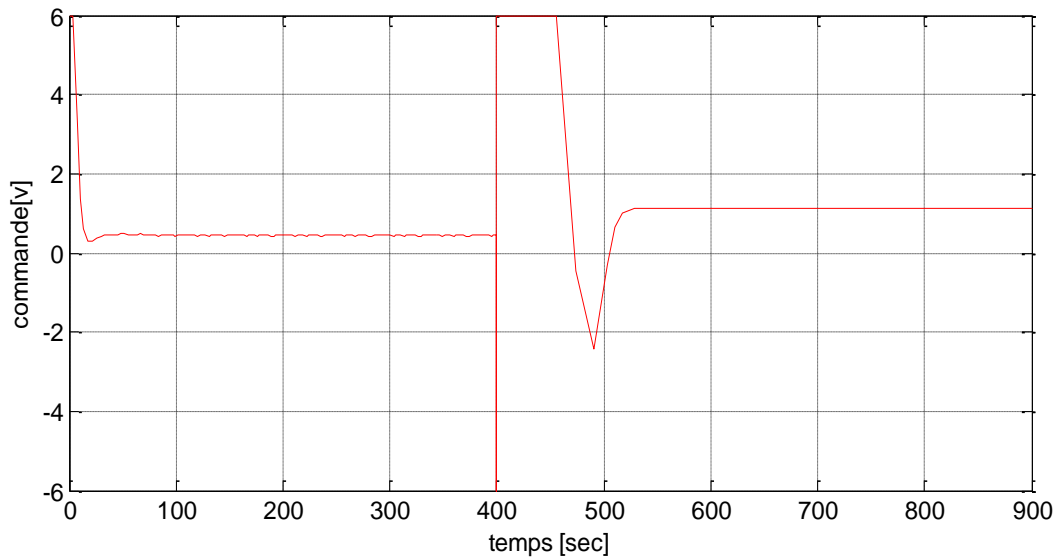
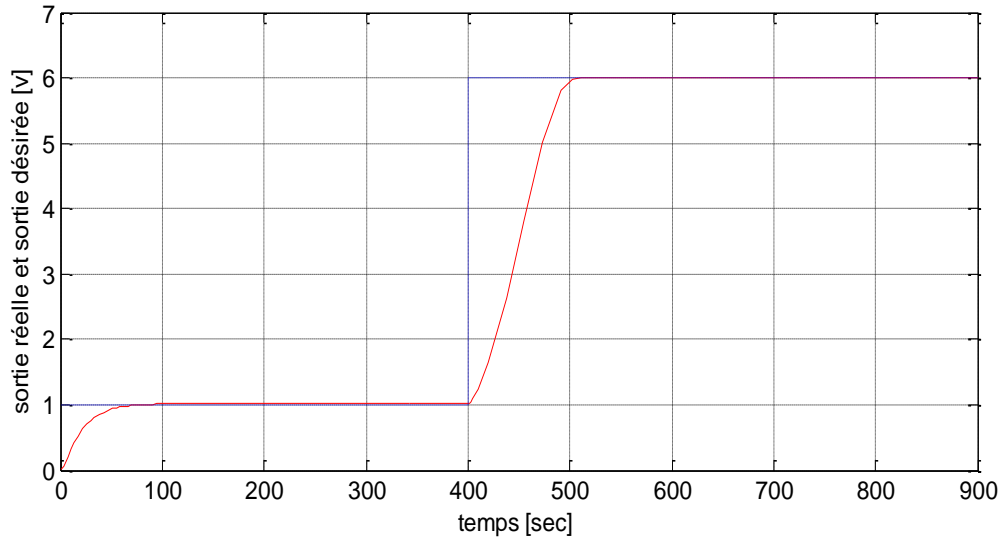


Figure3. 2 Schéma bloc de la commande backstepping appliquée au système CE105

3.8.2 Résultats de simulation

Les résultats de la commande backstepping appliquée au système hydraulique à réservoirs couplés sont illustrés par les figures 3.3. Ces résultats ont été pris avec les paramètres $c_1 = 0.1$ et $c_2 = 0.4$



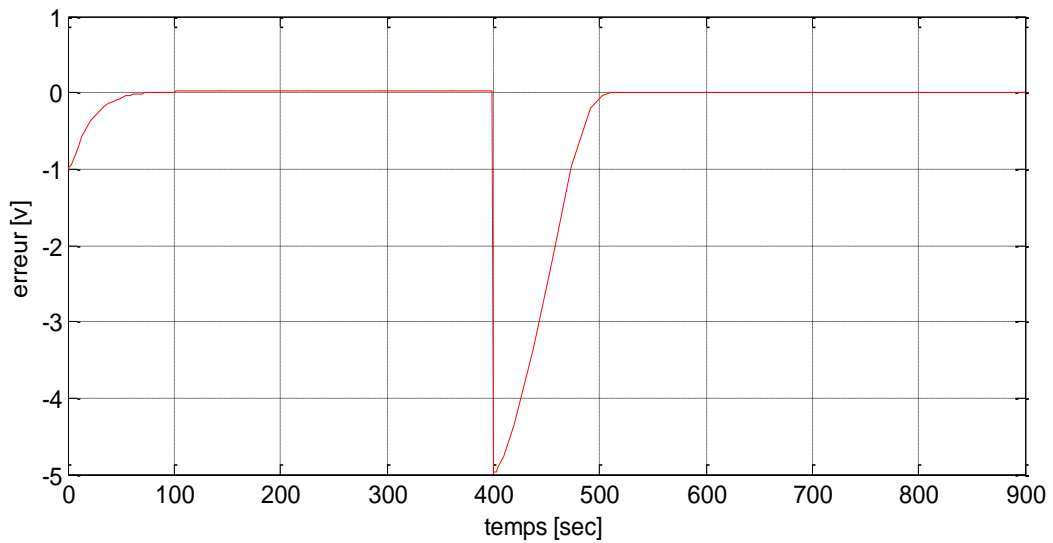


Figure3. 3 Résultats de simulation de la commande backstepping appliquée au système CE105.

3.8.3 Commentaires sur les résultats

Les résultats de simulation de cette commande sont illustrés par la figure 3.3. Les performances de cette commande sont jugées satisfaisantes en termes de poursuite de consigne. Par exemple, le temps de réponse est environ 80 secs,

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé une méthode de commande réursive appelée backstepping et appliquée sur le hydraulique CE105. Dans la première partie, des notions de base sur l'étude de la stabilité des systèmes non linéaires ont été exposées, ensuite nous avons mis en évidence l'algorithme de backstepping. La conception des lois de commande backstepping, pour commander le système hydraulique à réservoirs couplés.

Les simulations effectuées sur le système hydraulique CE105 à réservoirs couplés, montrent l'efficacité de cette approche de commande. En effet, nous avons constaté que les erreurs de poursuite sont relativement faibles.

Chapitre 04 : Commande par linéarisation entrée-sortie

4.1 Introduction

La linéarisation classique basée sur le calcul de la jacobine donne une approximation du comportement d'un système donné autour d'un point de fonctionnement. Pour une large variation autour de ce point de fonctionnement, la commande basée sur cette linéarisation perd ses performances, et le système perd sa stabilité [34]. La linéarisation par retour d'état est une autre approche qui fait face à ces limitations. Elle transforme le modèle non linéaire en un modèle équivalent linéaire, sur toute la plage de fonctionnement. Cette linéarisation se fait en deux étapes : [35]

- une transformation de coordonnées.
- un retour d'état non linéaire.

Suivant le choix des sorties du système, la linéarisation est soit exacte soit partielle, pour la linéarisation partielle, une partie du système est rendue inobservable. La stabilité de cette partie non observable doit être mise en compte.

La linéarisation par retour d'état (linéarisation par bouclage) est une approche de conception de la commande non-linéaire, qui a attiré les chercheurs ces dernières années. L'idée de base de cette approche est la manipulation algébrique de la dynamique du système non linéaire complètement ou partiellement (fully or partly) et sa transformation dans un système linéaire.

Dans ce chapitre, Nous présentons le principe de la technique de linéarisation au sens des entrées-sorties et nous appliquons cette méthode sur le système hydraulique CE105

4.2 La linéarisation entrée-sortie

Dans les deux dernières décennies, la théorie de la commande par le retour d'état a connu des développements significatifs. Cette méthode est basée sur la théorie de la géométrie différentielle pour la commande des systèmes non linéaires [36].

4.3 Historique de la commande

L'origine de la théorie E/S remonte principalement aux travaux de "Lur'e" et "Postnikov" sur le problème de la stabilité absolue et sur la théorie de réseaux électriques.

Cette dernière a enrichi le cadre de la théorie des systèmes avec des concepts physiques fondamentaux [37].

Un des premiers travaux à appliquer la théorie des opérateurs à la résolution de problème de contrôle revient [37]. Ce résultat, connu aujourd'hui sous le critère du cercle. Par ailleurs, les travaux de Yula et al ont établi à première connexion entre la théorie des circuits et la théorie de stabilité E/S.

Dans la littérature occidentale, motivés par des problèmes de perturbations non-linéaires dans des boucles limités en bande passante, Zames et plus tard sandberg ont introduit les bases du théorème du petit gain. Ainsi, dans le travail fondamental de Zames, les bases principales de la théorie E/S ont été établies en introduisant des concepts clés tels que gain, positivité, etc.

4.4 Principe de linéarisation entrée – sortie

La linéarisation entrée-sortie consiste à rendre linéaire la relation dynamique entre l'entrée de commande d'un système et sa sortie en utilisant une loi de commande non linéaire. Cette dernière est dite linéarisante. Une autre loi de commande linéaire est ensuite employée pour stabiliser le système linéaire ainsi obtenu. La figure (4.1) ci-dessous illustre bien le principe. Une autre approche de linéarisation se distingue fortement de la linéarisation autour d'un point de fonctionnement. En effet, le modèle linéaire obtenu avec cette dernière n'est valide que dans un voisinage du point de fonctionnement, c'est donc un modèle approché. Par contre, le modèle linéaire que donne la linéarisation entrée-sortie est valide dans tout l'espace d'état. Le compensateur linéaire qui stabilise ensuite le système est en principe plus performant. Le cas des systèmes à une entrée et une sortie est d'abord présenté à cause de sa simplicité [37].

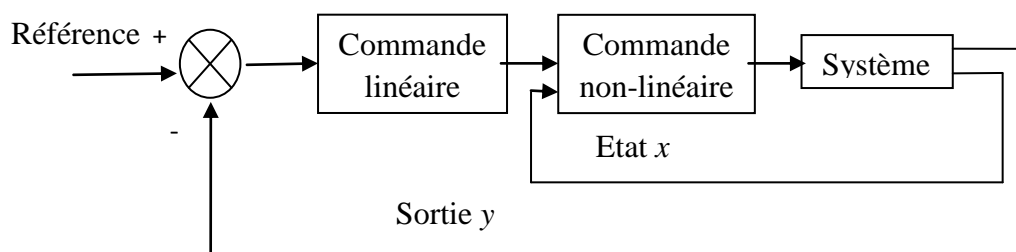


Figure 4. 1 Schéma de principe de la linéarisation entrée sortie

Le but de cette technique est de transformer le système multi entrée non linéaire en un système linéaire en utilisant un retour d'état linéarisation avec découplage entrée-sortie.

De là, on pourra appliquer la théorie des systèmes linéaire [38].

Soit un système d'ordre n , multi entrée et multi sortie, décrit par la représentation d'état non

Linéaire suivante :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= h(x) \end{aligned} \tag{4.1}$$

Avec :

u et y : vecteur de commande (d'entrée), vecteur de sortie, respectivement.

$f(x), g(x)$: champs de vecteurs.

$h(x)$: vecteur de sortie.

Les éléments des champs vectoriels f, g et h sont des fonctions lisses. Si l'on considère le cas des systèmes avec m entrées et m sorties, on cherche un bouclage statique de la forme $u = \alpha(x) + \beta(x)v$, tel que le comportement entrée – sortie du système (4.1) après bouclage soit linéaire et découplé. Ainsi on obtient un ensemble de m sous systèmes mono sortie indépendants où les entrées du sous système i n'affectent pas la sortie y_i et réciproquement [38].

Avec :

v : nouvelle variable de commande du système linéaire, $v \in R^m$.

β : Matrice non singulière de dimension $m \times m$.

α : Vecteur de dimension $m \times 1$.

On utilise souvent des notions de la géométrie différentielle et de topologie, telles que la dérivée de Lie, le crochet de Lie, le difféomorphisme, la distribution, et l'involutivité.

La nouvelle commande v permet de ramener le comportement entrée sortie du système, défini par l'équation (4.1) à celui d'un système linéaire, par différentiation des sorties y_i du système jusqu'à l'apparition des anciennes commandes u_i en utilisant la dérivée de Lie.

1. choix des grandeurs de sortie du système,
2. calcul du degré relatif vectoriel et changement de coordonnées,
3. retour d'état non-linéaire,
4. stabilité asymptotique et poursuite de référence.

4.5 Avantage de la théorie entrée-sortie

La théorie des entrée-sortie présente au moins trois avantages :

- 1- Elle est cohérente avec un des points de vue de la théorie du contrôle qui dit qu'il est

préférable de gardé le système plus simple. Chacun de ces derniers est vu comme une application d'une entrée à une sortie, c'est-à-dire un opérateur.

2- Elle est générale, donc il est possible de faire des conclusions bien utiles sur un système à contre-réaction, même si l'on n'a pas une connaissance stricte de la structure interne de chaque bloc élémentaire qui le compose.

3-Elle fournit une généralisation naturelle au cas non-linéaire en utilisant le fait que la stabilité d'un système linéaire invariante dans le temps est liée aux marges de phase et de gain.

4.6 Outils mathématiques

Dans cette section, nous présentons quelques outils mathématiques nécessaires pour assimiler la technique de linéarisation au sens des entrées-sorties.

4.6.1 Gradient

On définit le gradient d'une fonction scalaire $h(x)$ par rapport au vecteur x , par de vecteur ligne, $\nabla h(x)$ défini par $\nabla h(x)_i = \frac{\partial h}{\partial x_i}$. D'une façon similaire, le gradient d'un champ de vecteur $f(x)$ est défini par le Jacobien de f (matrice de $(n \times n)$ éléments) comme suit :

$$\nabla f(x)_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j} . \quad (4.2)$$

4.6.2 Dérivée de Lie

Etant donnée la fonction scalaire $h_i(x)$ définie de $R^n \rightarrow R$ et un champ de vecteur $f(x)$ continu défini de $R^n \rightarrow R^n$, la dérivée de Lie de $h_i(x)$ selon la direction du champ vectoriel $f(x)$ est défini comme suite [39] :

Le système (4.1) est dit de degré relatif r si

$$\begin{aligned} L_g L_f^i h(x) &= 0 \quad 0 \leq i \leq r-1 \\ L_g L_f^{r-1} h(x) &\neq 0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

avec $L_f h$: dérivée de Lie :

$$L_f h(x) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial h(x)}{\partial x_i} f_i \quad (4.4)$$

La définition précédente, peut être réécrite comme suit :

$$L_f h(x) = \nabla h f(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x_1} & \frac{\partial h}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

La dérivée de Lie d'ordre i est

$$L_f^i h = L_f(L_f^{i-1} h) = \nabla(L_f^{i-1} h) f = \frac{\partial L_f^i h}{\partial x} f(x) \quad i=1, 2, \dots \quad (4.6)$$

$$L_f^0 h = h$$

De la même manière, si g est un autre champ vectoriel, la fonction scalaire $L_g L_f h(x)$ est donnée par :

$$L_g L_f h(x) = \nabla(L_f h) g(x) = \frac{\partial L_f h}{\partial x} g(x) \quad (4.7)$$

4.6.3 Degrés relatif

Le degré relatif (noté r) d'un système SISO peut être défini de manière intuitive comme étant le nombre minimum de fois qu'il faut dériver par rapport au temps l'expression de la sortie (y) pour voir apparaître explicitement l'entrée (u) :

$$L_g L_f^i h(x) = 0 \quad 0 \leq i \leq r-1 \quad (4.8)$$

$$L_g L_f^{r-1} h(x) \neq 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} y(x) = h(x) \\ y^{(1)} = h_1(x) \\ y^{(2)} = h_2(x) \\ \vdots \\ y^{(r-1)}(x) = h_{r-1}(x) \\ y^{(r)}(x) = a(x) + b(x)u \end{array} \right. \quad (4.9)$$

Afin de déterminer la loi de commande non linéaire nous calculons le degré relatif de la sortie i.e. le nombre de fois qu'il faut dériver la sortie afin de faire apparaître l'entée u.

La dérivation temporelle de la sortie y donne :

$$\dot{y} = \frac{dh(x)}{dx} \frac{dx}{\partial t} \quad (4.10)$$

$$= \frac{dh(x)}{dx} (f(x) + g(x)u) \quad (4.11)$$

$$= L_f h(x) + L_g h(x)u$$

Si $L_g h(x) \neq 0 \quad \forall x \in \mathfrak{R}^n$, on montre aisément que la commande :

$$u = \frac{1}{L_g h(x)} (-L_f h(x) + v) \quad (4.12)$$

Conduit au système linéaire représentant un simple intégrateur :

$$\dot{y} = v \quad (4.13)$$

Si $L_g h(x) = 0$, on continue la dérivation pour obtenir :

$$y^{(i)} = L_f^i h(x) + L_g L_f^{i-1} h(x) u \quad i = 1, 2, \dots \quad (4.14)$$

avec $L_g L_f^{i-1} h(x) \neq 0$. La méthode consiste donc à déterminer le degré de dérivation r à partir duquel le coefficient multiplicateur de la commande $u (L_g L_f^{i-1} h(x))$ n'est pas nul, r est le degré relatif de h . On montre que pour

$$y^{(r)} = L_f^r h(x) + L_g L_f^{r-1} h(x) u \quad (4.15)$$

La commande

$$u = \frac{1}{L_g L_f^{r-1} h(x)} (-L_f^r h(x) + v) \quad (4.16)$$

conduit au système linéaire équivalent à une chaîne de r intégrateurs :

$$y^{(r)} = v \quad (4.17)$$

Si le degré relatif est supérieur à 1, on a : $L_g h(x) = 0$. Donc : $\dot{y} = L_f h(x)$

Et on montre que :

$$\begin{aligned} y^{(i)} &= L_f^i h(x) \quad 0 \leq i \leq r \\ y^{(r)} &= L_f^r h(x) + L_g L_f^{r-1} h(x) \end{aligned} \quad (4.18)$$

Le gain K est tel que la matrice des paramètres $A_s = A - BK$ est une matrice stable.

$$v = -kz = -k_1 z_1 - k_2 z_2 \dots - k_r z_r \quad (4.19)$$

Remarque

Le degré relatif (r_i) lié la sortie y_i représente le nombre de fois qu'il faut dériver cette sortie pour faire apparaître explicitement au moins une des entrées u_i ($1 \leq i \leq m$) [40].

Pour un système commandable, on a toujours $r \leq n$. Si l'entrée n'apparaît pas après n dérivations de la sortie, le système est non commandable.

Pour $r = n$, le système admet une linéarisation exacte.

Pour $r < n$, le système admet une linéarisation partielle. L'ordre du sous système linéarité est égal à r .

4.6.4 Forme normale

Nous introduisons ensuite la notion de forme normale d'un système non-linéaire. Celle-ci est basée sur la définition d'un nouveau vecteur d'état au moyen d'un changement de variables. Ce nouveau vecteur d'état permet d'exprimer les équations d'état du système sous une forme considérablement plus simple que celle de départ. Lorsque par la suite, nous devons appliquer une régulation d'état au système, il sera plus aisé d'utiliser les équations exprimées en forme normale pour illustrer les conséquences engendrées par celle-ci.

1. Changement de variable

Pour tout point x de l'espace d'état en lequel le degré relatif r est défini, nous pouvons définir un nouveau vecteur d'état z que nous relierons à x par un changement de variable : $z = \varphi(x)$. Les r premières composantes de $\varphi(x)$ sont définies comme étant les dérivées d'ordre 0 à $(r-1)$ de la sortie :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1(x) = y(x) \\ \varphi_2(x) = y^{(1)}(x) \\ \varphi_3(x) = y^{(2)}(x) \\ \vdots \\ \varphi_r(x) = y^{(r-1)}(x) \end{array} \right. \quad (4.20)$$

Il est démontré dans [40] que $r \leq n$ et que ces r fonctions qualifient un changement de variable partiel régulier. Il est également démontré que si $r < n$, il est possible de trouver des fonctions $\varphi_r, \varphi_{r-1}, \dots, \varphi_1$ telles que le changement de variable complet soit régulier. De plus, il est possible d'assurer que l'expression de leur dérivée temporelle ne fasse pas apparaître l'entrée explicitement.

2. Equations d'état

Pour chacune des $(r-1)$ premières composantes du vecteur d'état, sa dérivée est égale à la composante suivante du vecteur d'état. Autrement dit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{z}_1 = y^{(1)}(x) = z_2 \\ \dot{z}_2 = y^{(2)}(x) = z_3 \\ \vdots \\ \dot{z}_{r-1} = y^{(r-1)}(x) = z_r \end{array} \right. \quad (4.21)$$

Pour la composante d'ordre r , étant donné (4.21), nous obtenons :

$$\dot{z}_r = y^{(r)}(x) = a(x) + b(x)u \quad (4.22)$$

Vu que le changement de variable est régulier, nous en déduisons :

$$\dot{z}_r = a(\Phi^{-1}(z)) + b(\Phi^{-1}(z))u \quad (4.23)$$

$$a_z(z) + b_z(z)u \quad (4.24)$$

Avec $a_z(z) \neq 0$ par définition du degré relatif.

Si les $\varphi_{r+1}, \dots, \varphi_n$ ont été choisies telles que leur dérivée ne fasse pas apparaître u , nous obtenons pour $r + 1 < i < n$:

$$\dot{z}_i = q_i(z) \quad (4.25)$$

3. Forme normale

Les équations d'états prennent donc la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \vdots \\ \dot{z}_{r-1} = y^{(r)}(x) = z_r \\ \dot{z}_r = a_z(z) + b_z(z)u \\ \vdots \\ \dot{z}_n = q_n(z) \end{array} \right. \quad (4.26)$$

La sortie s'exprime simplement par $y=z_1$.

La structure de ces équations est illustrée dans la figure 4.2. Le système représenté sous cette forme est dit représenté en forme normale.

4.6.5 Crochets de Lie

Soient f et g deux champs de vecteurs dans R^n . Le crochet de Lie de f et g est un troisième champ de vecteurs défini par:

$$[f, g](x) = \text{ad}_f g(x) = \frac{\partial g}{\partial x} f(x) - \frac{\partial f}{\partial g} g(x) \quad (4.27)$$

Où $\frac{\partial g}{\partial x}$, $\frac{\partial f}{\partial g}$ sont des matrices Jacobéennes. L'application des crochets de Lie

successive donne:

$$\text{ad}_f^0 g(x) = g(x) \quad (4.28)$$

$$\text{ad}_f^1 g(x) = [f, g](x) \quad (4.29)$$

$$\text{ad}_f^k g(x) = [f, \text{ad}_f^{k-1} g](x) \quad (4.30)$$

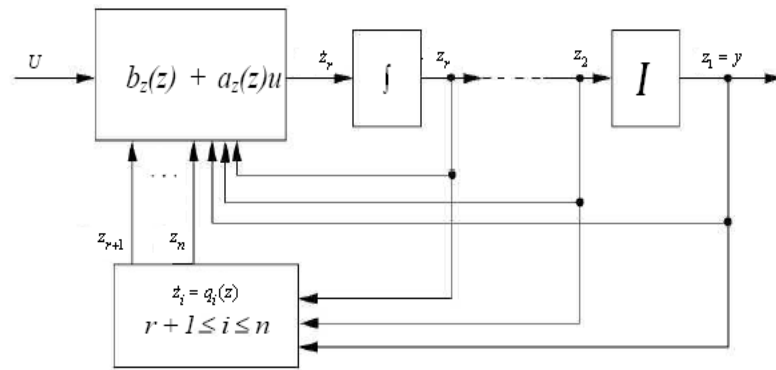


Figure 4. 2 Schéma d'un système SISO en forme normale

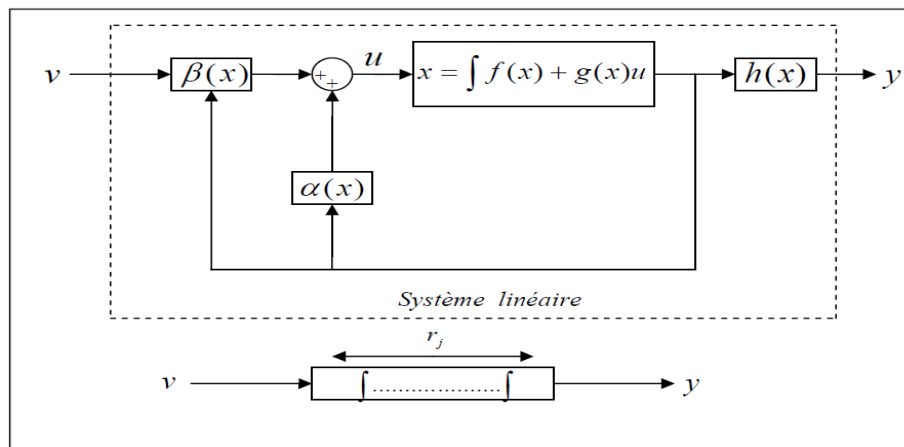


Figure 4. 3 Schéma du principe de linéarisation entrée – sorties

4.6.6 Difféomorphisme

Le difféomorphisme est utilisé pour transformer un système non-linéaire en un autre système non-linéaire en effectuant un changement de variables de la forme:

$$z = \phi(x) \tag{4.31}$$

où $\phi(x)$ représente n variables:

$$\phi(x) = \begin{bmatrix} \phi_1(x) \\ \phi_2(x) \\ \dots \\ \phi_n(x) \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} \tag{4.32}$$

Le Difféomorphisme suivant met le système sous la forme normale :

$$z_i^1 = \phi_i^1(x) = h_i(x) \tag{4.33}$$

$$z_i^2 = \phi_i^2(x) = L_f h_i(x) \tag{4.34}$$

.....

$$z_i^n = \phi_i^n(x) = L_f^{n-1} h_i(x) \rightarrow 1 \leq j \leq m \tag{4.35}$$

Dans ces coordonnées, le système (4.1) s'écrit comme:

$$\dot{z}_i^1 = z_i^2 \tag{4.36}$$

$$\dot{z}_i^2 = z_i^3 \quad (4.37)$$

.....

$$\dot{z}_i^{n-1} = z_i^n \quad (4.38)$$

$$\dot{z}_i^n = b_i(z) + \sum_{j=1}^m d_{ij}(z)u_j \rightarrow 1 \leq j \leq m \quad (4.39)$$

Avec :

$$b_i(z) = L_f^n h_i((\Phi^{-1}(z))) \quad (4.40)$$

$$d_{ij}(z) = L_{g_j} L_f^{n-1} h_i((\Phi^{-1}(z))) \rightarrow 1 \leq j \leq m \quad (4.41)$$

4.7 Système a plusieurs entrées et plusieurs sorties

Avant tout, on considère que le système non-linéaire de p entrées et p sorties a pour forme:

$$\dot{x} = f(x) + \sum_{i=1}^p g_i(x) \cdot u_i \quad (4.42)$$

$$y_i = h_i(x) \quad i = 1, 2 \dots p \quad (4.43)$$

Ou :

$x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur des états.

$u = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_p]^T \in \mathbb{R}^p$ est le vecteur des commandes.

$y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_p]^T \in \mathbb{R}^p$ représente le vecteur des sorties.

f, g_i sont des champs de vecteurs.

Le problème consiste à trouver une relation linéaire entre l'entrée et la sortie en dérivant la sortie jusqu'à ce qu'au moins une entrée apparaisse en utilisant l'expression:

$$y_j^{(r_j)} = L_f^{r_j} h_j(x) + \sum_{i=1}^p L_{g_i} \left(L_f^{r_j-1} h_j(x) \right) \cdot u_i, j=1, 2 \dots p \quad (4.44)$$

Où :

$L_f^j h_j$ et $L_{g_i}^j h_j$ sont les $i^{\text{ème}}$ dérivées de Lie de h_j respectivement dans la direction de f et g_i . r_j est le nombre de dérivées nécessaires pour qu'au moins, une des entrées apparaisse dans l'expression (4.44) et il est connu sous le nom du degré relatif correspondant à la sortie y_i .

Le degré relatif total (r) est défini comme étant la somme de tous les degrés relatifs obtenus à l'aide de (4.44) et doit être inférieur ou égal à l'ordre du système:

$$r = \sum_{j=1}^p r_j \leq n \quad (4.45)$$

On dit que le système (4.42) a pour degré relatif (r) s'il vérifie:

$$L_{g_i} L_f^k h_j = 0 \quad 0 < k < r_j - 1, 1 \leq j \leq p, 1 \leq i \leq p \quad (4.46)$$

Dans le cas où le degré relatif total est égal à l'ordre du système, on est en présence d'une linéarisation au sens des entrées-états. Si par contre le degré relatif total est strictement inférieur à l'ordre du système, la linéarisation est dite linéarisation au sens des entrées- sorties.

Pour trouver l'expression de la loi linéarisante u qui permet de rendre la relation linéaire entre l'entrée et la sortie, on récrit l' expression (4.44) sous forme matricielle:

$$[y_1^{r_1} \dots y_p^{r_p}]^T = \xi(x) + D(x) \cdot u \quad (4.47)$$

$$\xi(x) = \begin{bmatrix} L_f^{r_1} h_1(x) \\ \dots \\ L_f^{r_p} h_p(x) \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

$$D(x) = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{r_1-1} h_1(x) & L_{g_2} L_f^{r_1-1} h_1(x) \dots L_{g_p} L_f^{r_1-1} h_1(x) \\ L_{g_1} L_f^{r_2-1} h_2(x) & L_{g_2} L_f^{r_2-1} h_2(x) \dots L_{g_1} L_f^{r_2-1} h_2(x) \\ \dots \dots & \dots \dots \dots \dots \\ L_{g_p} L_f^{r_p-1} h_p(x) & L_{g_p} L_f^{r_p-1} h_p(x) L_{g_p} L_f^{r_p-1} h_p(x) \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

Où $D(x)$ est appelé matrice de découplage du système. Si on suppose que $D(x)$ n'est pas singulier, la loi de commande linéarisante a pour forme:

$$u = D(x)^{-1} \cdot (-\xi(x)+v) \quad (4.50)$$

4.8 Application au système hydraulique CE105

Les équations d'état du CE105 à réservoirs couplés :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{A} (S_n \cdot a_{12} \sqrt{2 \cdot g \cdot (x_2 - x_1)} - S_n \cdot a_0 \sqrt{2g \cdot x_1}) \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{A} (-S_n \cdot a_{12} \sqrt{2 \cdot g \cdot (x_2 - x_1)} + K_Q \cdot u) \\ y = K_h \cdot x_1 \end{cases} \quad (4.51)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (4.52)$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} \frac{1}{A} (S_n \cdot a_{12} \sqrt{2 \cdot g \cdot (x_2 - x_1)} - S_n \cdot a_0 \sqrt{2g \cdot x_1}) - \beta_1 \sqrt{(x_2 - x_1)} \\ \frac{1}{A} (-S_n \cdot a_{12} \sqrt{2 \cdot g \cdot (x_2 - x_1)}) \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

$$\beta_1 = \frac{s_n \cdot a_{12} \sqrt{2g}}{A} \quad , \quad \beta_2 = \frac{s_n \cdot a_0 \sqrt{2g}}{A} \quad , \quad K_u = \frac{K_Q}{A} \quad (4.54)$$

$$\beta_2 = 0.0223 \quad \beta_1 = 0.0372 \quad K_u = 0.0481$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} \beta_1 \sqrt{(x_2 - x_1)} - \beta_2 \sqrt{x_1} \\ -\beta_1 \sqrt{(x_2 - x_1)} \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad y = [K_h 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

Pour $K_h = 41$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1 \sqrt{(x_2 - x_1)} - \beta_2 \sqrt{x_1} \\ -\beta_1 \sqrt{(x_2 - x_1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_u \end{bmatrix} u \quad (4.57)$$

$$y = [K_h 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (4.58)$$

4.8.1 Calcul du degré relatif

La condition de linéarisation permettant de vérifier si un système non linéaire admet une linéarisation entrée-sortie est l'ordre du degré relatif du système. On calcul le degré relatif r_i associé à chaque grandeur de sortie y_i choisie, lequel correspond au nombre de fois qu'il faut dériver cette sortie pour faire apparaître explicitement une des grandeurs de commande. Dans notre cas, les commandes apparaissent pour la première fois dans les dérivées secondes.

$$y = K_h \cdot x_1 \quad (4.59)$$

$$y = h(x) = K_h x_1 \quad (4.60)$$

$$y^{(1)} = h_1(x) = L_f h(x) = K_h \dot{x}_1 = K_h (\beta_1 \sqrt{(x_2 - x_1)} - \beta_2 \sqrt{x_1}) \quad (4.61)$$

$$y^{(1)} = K_h (\beta_1 (x_2 - x_1)^{0.5} - \beta_2 (x_1)^{0.5}) \quad (4.62)$$

$$y^{(2)} = h_2(x) = L_f^2 h(x) = K_h (0.5\beta_1 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1)(x_2 - x_1)^{-0.5} - 0.5\beta_2 (\dot{x}_1)(x_1)^{-0.5}) \quad (4.63)$$

$$y^{(2)} = h_2(x) = L_f^2 h(x) = (0.5\beta_1 [(-\beta_1 (x_2 - x_1)^{0.5} + K_u \cdot u - \beta_1 (x_2 - x_1)^{0.5} - \beta_2 (x_1)^{0.5})(x_2 - x_1)^{-0.5}] - 0.5\beta_2 (\beta_1 (x_2 - x_1)^{0.5} - \beta_2 (x_1)^{0.5})(x_1)^{-0.5}) \quad (4.64)$$

Ainsi, l'entrée u apparaît dans l'expression (4.64). On note, pour cette sortie, un degré relatif.

$$r=2$$

4.8.2 Calcule la Difféomorphisme

$$z_1 = \phi_1(x) = h(x) = K_h x_1 \quad (4.65)$$

$$z_2 = \phi_2(x) = L_f h(x) = K_h \dot{x}_1 = K_h (\beta_1 (x_2 - x_1)^{0.5} - \beta_2 (x_1)^{0.5}) \quad (4.66)$$

$$z_3 = \phi_3(x) = L_f^2 h(x) = (K_h 0.5\beta_1 [(-\beta_1 (x_2 - x_1)^{0.5} + K_u \cdot u - \beta_1 (x_2 - x_1)^{0.5} + \beta_2 (x_1)^{0.5})(x_2 - x_1)^{-0.5}] - 0.5\beta_2 (\beta_1 (x_2 - x_1)^{0.5} + \beta_2 (x_1)^{0.5})(x_1)^{-0.5}) \quad (4.67)$$

4.8.3 Le système en Z

$$\dot{z}_1 = z_2 = K_h \dot{x}_1 \quad (4.68)$$

$$\dot{z}_2 = z_3 = v \quad (4.69)$$

$$\dot{z}_2 = K_h(0.5\beta_1 [(-\beta_1(x_2-x_1)^{0.5} + K_u \cdot u - \beta_1(x_2-x_1)^{0.5} + \beta_2(x_1)^{0.5})(x_2-x_1)^{-0.5}] - 0.5\beta_2(\beta_1(x_2-x_1)^{0.5} + \beta_2(x_1)^{0.5})(x_1)^{-0.5}) = v \quad (4.70)$$

4.8.4 Calcule la commande u

$$\dot{z}_2 = K_h(-0.5\beta_1^2 + 0.5\beta_1 K_u \cdot u(x_2-x_1)^{-0.5} - 0.5\beta_1^2 + 0.5\beta_1\beta_2(x_1)^{0.5}(x_2-x_1)^{-0.5} - 0.5\beta_2\beta_1(x_2-x_1)^{0.5}(x_1)^{-0.5} + 0.5\beta_2^2) = v \quad (4.71)$$

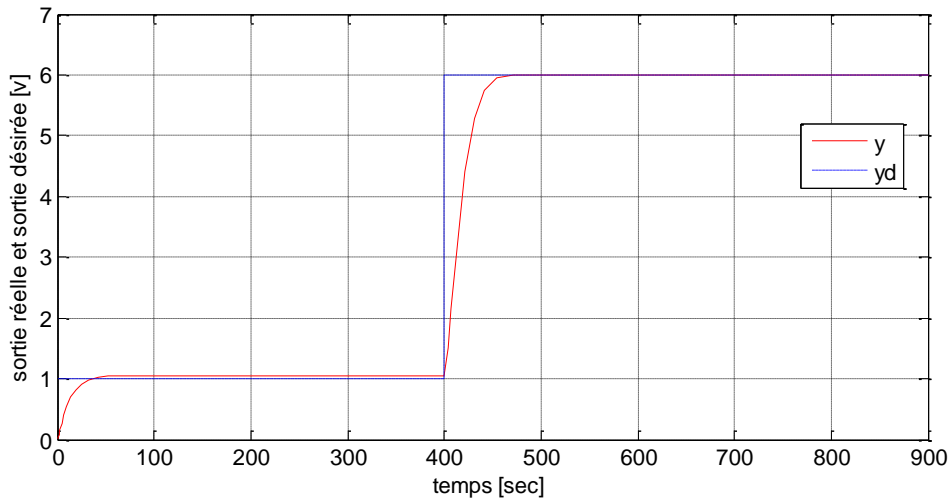
$$u = \frac{v + K_h(\beta_1^2 - 0.5\beta_1\beta_2(x_1)^{0.5}(x_2-x_1)^{-0.5} + 0.5\beta_2\beta_1(x_2-x_1)^{0.5}(x_1)^{-0.5} - 0.5\beta_2^2)}{K_h 0.5\beta_1 K_u \cdot (x_2-x_1)^{-0.5}} \quad (4.72)$$

$$= \frac{v + 0.0565 - 0.169(x_1)^{0.5}(x_2-x_1)^{-0.5} + 0.0169(x_2-x_1)^{0.5}(x_1)^{-0.5} - 0.01016}{0.0366(x_2-x_1)^{-0.5}} \quad (4.73)$$

$$v = -k_1 z_1 - k_2 z_2 \quad (4.74)$$

4.8.5 Résultats de simulation

Les résultats de la commande par linéarisation entrée-sortie appliquée au système hydraulique à réservoirs couplés sont illustrés par les figures 4.4. Ces résultats ont été pris avec les paramètres $k_1 = 0.05$ et $k_2 = 0.008$



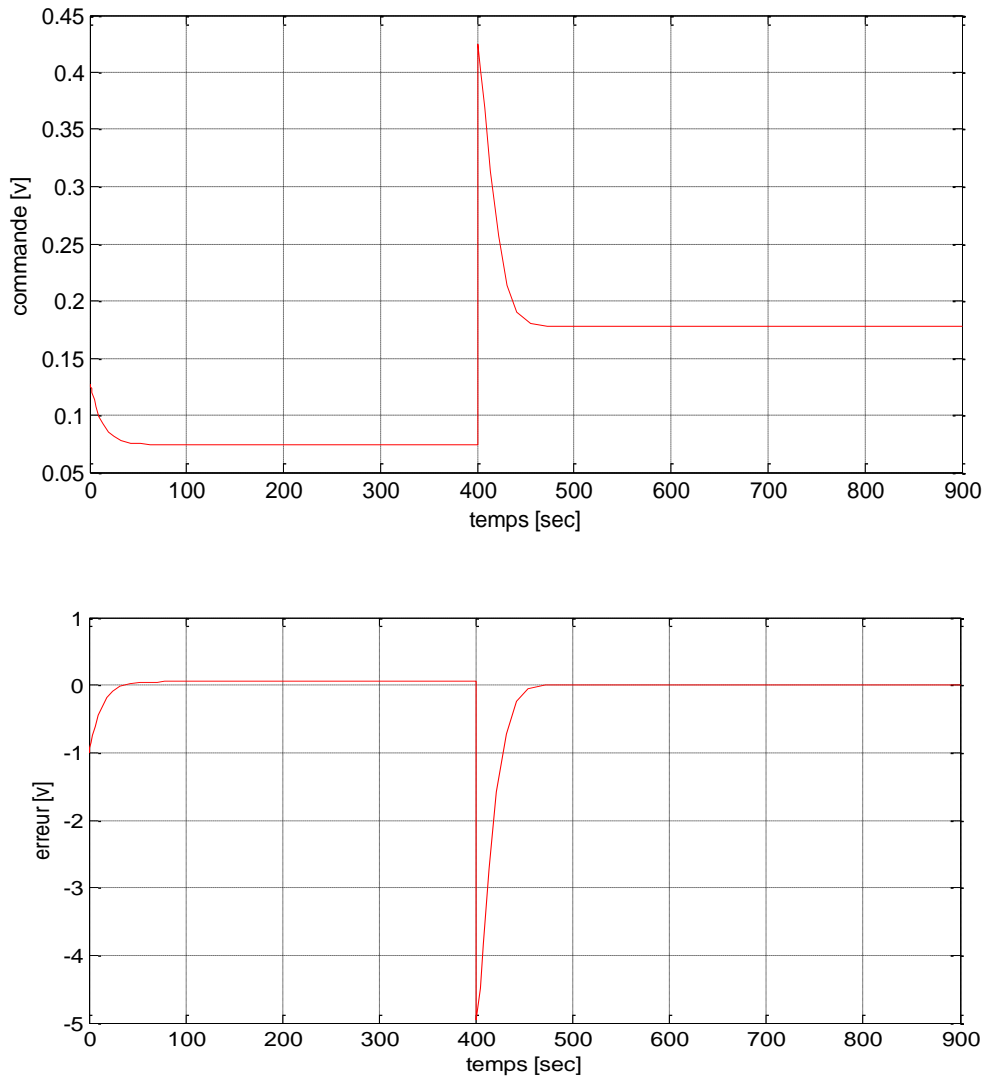


Figure 4. 4 Résultats de simulation de la commande linéarisation entrée-sortie

4.8.6 Commentaires sur les résultats

Les résultats de simulation de cette commande sont illustrés par la figure 4.4 la sortie (y) suivies bien pour la référence choisie. Le système stable pour temps de réponse est environ 50 sec.

On remarque que les erreurs de poursuite sont faibles et convergent exponentiellement vers zéro. De plus, les temps de réponses, qui caractérisent le régime transitoire, sont aussi faibles

4.9 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'un bref rappel sur les techniques de linéarisation entrée-sortie pour les systèmes non linéaires. Nous avons présenté une étude théorique sur les notions appropriées à la commande linéarisation entrée-sortie et l'application de cette technique sur le modèle de CE105 et quelques résultats de simulation présentés pour illustrer l'efficacité de la méthode de contrôle. Il est un fait bien connu que les contrôleurs par cette méthode sont peu robustes aux modifications des paramètres du système et à des perturbations agissant sur le système.

Chapitre 05 : Etude comparative

5.1 Introduction

Pour examiner les différentes lois de commande, développées pour 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.

5.2 Etude comparative

Dans le tableau 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	PID	Logique floue	linéarisation entrée-sortie	backstepping
$j_1 = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^p (u^t * u)$	3.8686e+025	7.8874e+004	1.3476	435.8471
$j_2 = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^p (e^t * e)$	544.9253	7.5669e+004	613.5000	134.1547

Tab 5. 1 Étude comparative entre les commandes développées pour le système CE105.

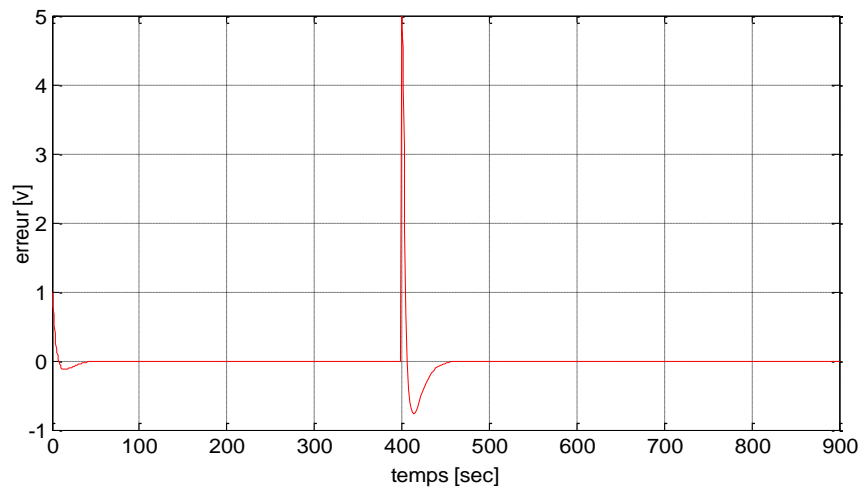
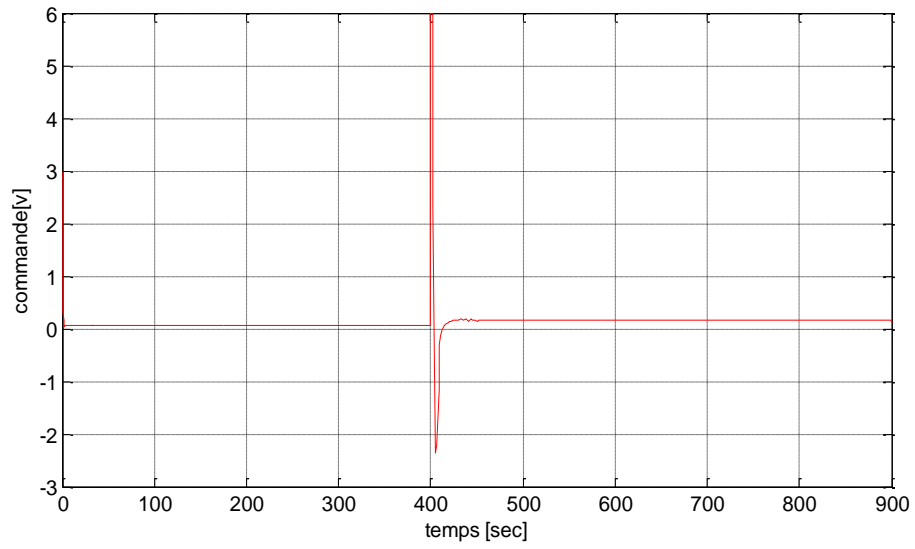


Figure 5. 1 Commande et l'erreur de la commande par régulateur PID appliqué de système CE105

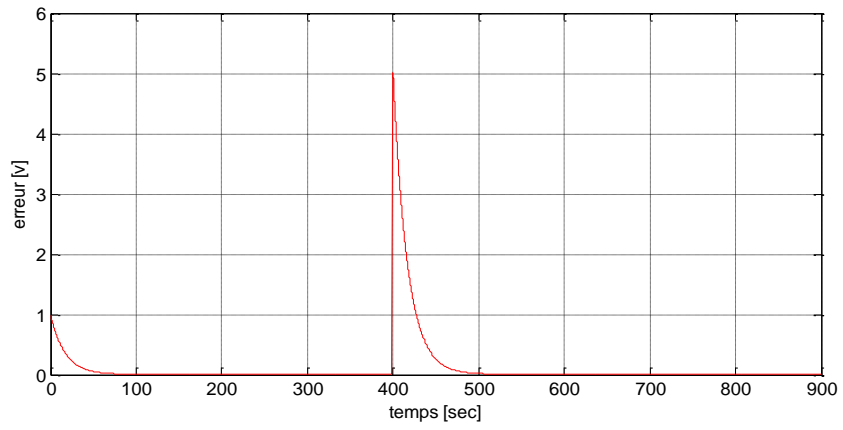
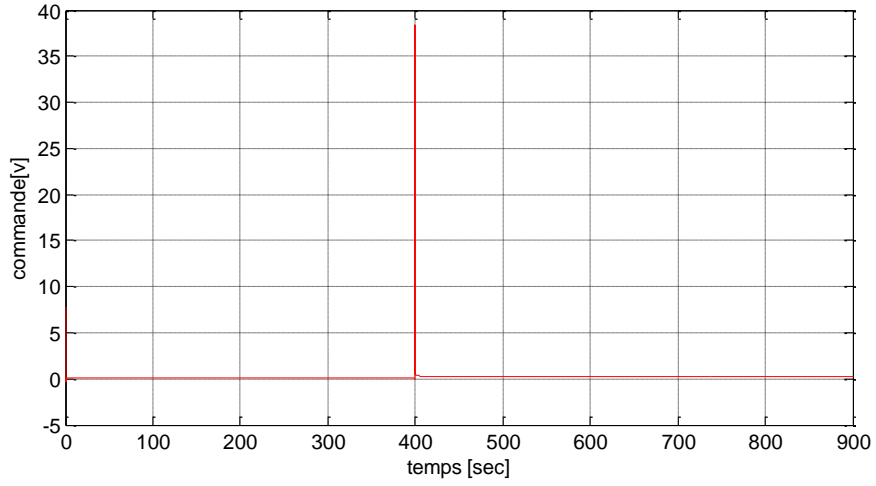
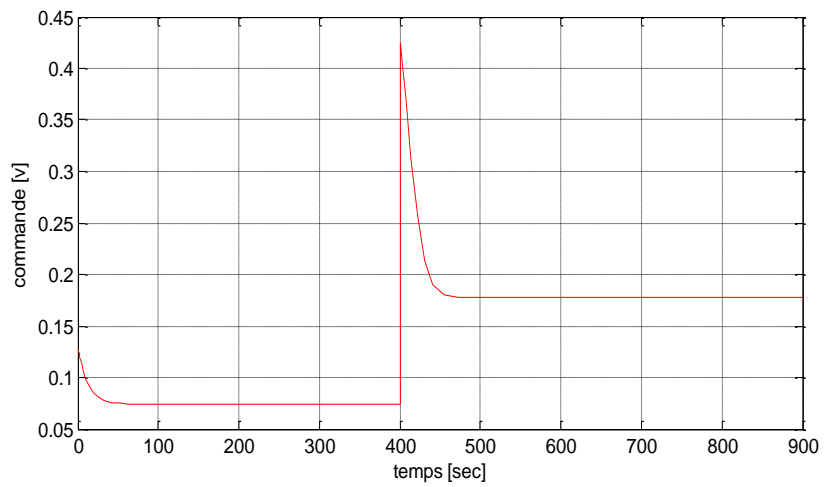


Figure 5. 2 Commande et l’erreur de la commande par Logique floue



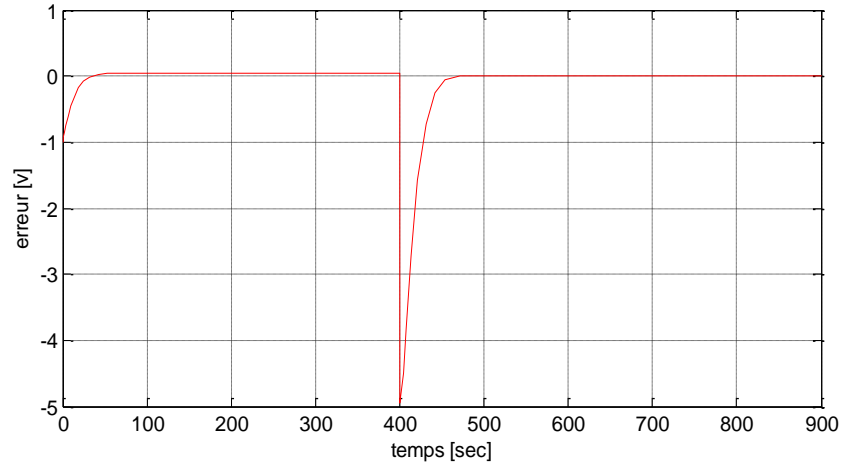


Figure 5.3 Commande et l'erreur de la commande linéarisante entrée-sortie

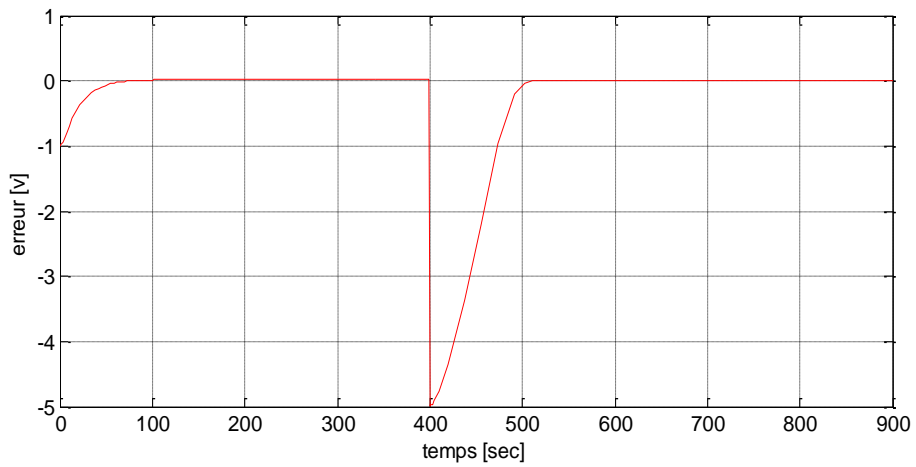
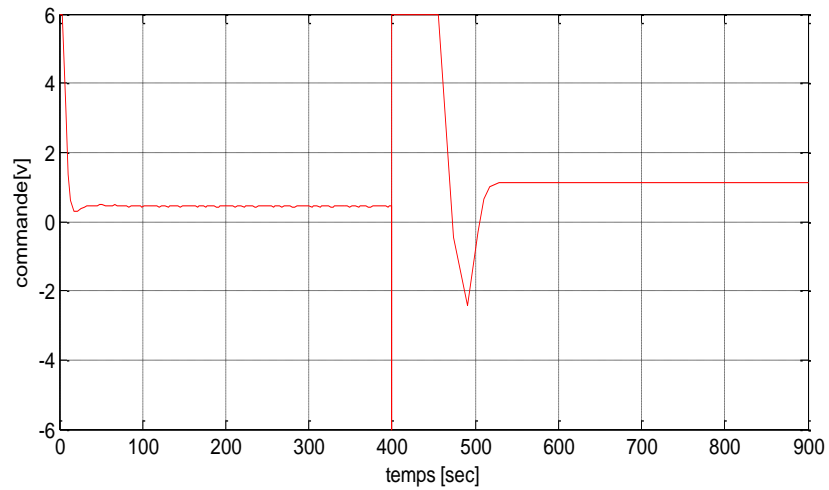


Figure 5.4 Commande et l'erreur de la commande par backstepping

5.3. Commentaires sur les résultats

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 5.1). 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 5.1, où nous pouvons déduire que pour la commande par linéarisation entrée-sortie, le critère j_1 prend la valeur la plus faible en simulation ($j_1 = 1.3476$), De même, le critère j_2 prend sa valeur minimale pour la commande par backstepping bien en simulation ($j_2 = 134.1547$).

5.4 Conclusion

A partir de ce qui est cité, nous pouvons dire que la commande par linéarisation entrée-sortie est la plus performante du point de vue minimisation de critère j_1 et j_2 .

La commande par feedback linéarisation entrée-sortie et la commande PID, sollicite une énergie importante, ceci se voit par le critère j_1 . La commande par backstepping nous offre une méthode pour la synthèse de régulation 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 l'application des commandes non linéaire sur le modèle d'un système hydraulique CE105. Une première partie présente les concepts de base de modélisation du système hydraulique CE105 et outils mathématiques de synthèse et d'analyse nécessaires pour la conception des structures de commande développées dans ce mémoire.

Le but de ce travail, nous avons synthétisé différentes lois de commande en utilisant quatre techniques de commande non linéaire dont le but est d'assurer la performance du système ainsi que la poursuite de trajectoires.

La première technique utilisée est la commande par régulateur PID. La deuxième technique utilisée est la commande par logique floue est une technique pour le traitement de connaissances imprécises basées, sur des termes linguistiques, elle donne les moyens de convertir une commande linguistique basée sur le raisonnement humain.

La troisième technique utilisée est la commande par Backstepping, on a présenté l'aspect théorique du Backstepping et exposer les étapes permettent d'établir la commande globale assurent la stabilité du système non linéaire avec application aux systèmes hydraulique CE105. La quatrième technique utilisée est la commande par linéarisation entrée-sortie.

Cette étude nous a permis de formuler les remarques suivantes :

- La commande à régulateur PID classique garde ses avantages, de simple calcul, ne permet pas de faire un calcul mathématique.
- Il est possible de remédier aux problèmes du système hydraulique CE105, via les outils de la commande intelligente. Telle que, la logique floue. 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 le contrôle de système. 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.
- Les performances de la commande par linéarisation entrées-sorties appliquée au système hydraulique CE105. L'étude théorique de la commande non linéaire a montré

la possibilité de résoudre le problème de poursuite des trajectoires prédéterminées pour Le CE105 à réservoirs couplés avec de bonnes performances.

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

1. Mise en oeuvre simulation des lois de commande développées sur ce système.
2. Utilisation des algorithmes d'optimisations pour la détermination des différents paramètres de la loi de commande.
3. Validation des commandes proposées sur d'autres systèmes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] 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.
- [2] CHERRAT Nidhal « Méthodes de Commande non Linéaires Appliquées au système hydraulique CE105 à réservoirs Couplés et au Bras Manipulateur » Diplôme de master, génie électrique M'sila, 2013.
- [3] Bali Noureddine, « Commandes prédictives appliquées au robot PUMA et au palier magnétique actif », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 15 Décembre 2007.
- [4] P. Wellstead, TecQuipment CE105 Coupled Tanks Apparatus, Control Systems Centre, Manchester, U.K, 1993.
- [5] 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.
- [6] Zambettakis, I. « LA REGULATION P.I.D », Lille, juillet 1996.
- [7] http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9gulateur_PID
- [8] LATTOUI SALAH EDDINE « commande non-linéaire robuste d'une machine synchrone à aimants permanents » Mémoire de master, univ.M'sila. 2012.
- [9] HIND .G: "Projet Bioréacteur de fermentation : "Applications d'une commande neuro floue et d'un PI calculé à base d'un contrôleur à modèle interne". . Mémoire d'ingénieur, Ecole nationale polytechnique 2010.
- [10] A.Dell.Aquila.M.Lisserre.V.G.Monopoli, M.Capurso "Aninty power Factor Front End Rectifier for DC Power Systems», in proceedings of the IEEE Transactions on power Tech Conference. Vol.2, PP6 Bologne, 23-26june2003.
- [11] S. Labiod, « Contribution à la commande adaptative floue des systèmes non linéaires », thèse de Doctorat, ENP, Algérie, 2004.
- [12] Rabah Belhadef « Commande vectorielle et par logique floue de la machine asynchrone sans capteur » Mémoire d'ingénieur, Génie électrique, école nationale polytechnique, 2008.
- [13] Himer hamza toufik « Commande par mode glissant floue d'une machine asynchrone » Diplôme de master, génie électrique M'sila, 2012.
- [14] A. Rahal- M. Fedjiri « Contrôle directe du couple de la machine asynchrone » PFE- Université M'sila, M'sila 2004.
- [15]; ELBIA.Y ; "Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double

Alimentation et à Flux Orienté" Université de Batna ; Mémoire « Ingénieur d'Etat en Electrotechnique » ; 2009.

[16] BOUBAYA.N ;"Commandes non Linéaires d'un Palier Magnétique Actif " Mémoire de Magister Ecole Nationale Polytechnique 2010.

[17] AOUICHE.A:" réjection des perturbations dans le système non-linéaire" Mémoire magistère Université de m'sila ; 2005-2006.

[18] Fouad Alouani « Commande par logique floue appliquée aux pendules inversés et au simulateur de vol d'hélicoptère simulation et expérimentation » Mémoire de magistère département électronique, 2006.

[19] CHIKHI A:" Commande Directe du Couple du Moteur Asynchrone-Apport de la Logique Floue" ; Université de Batna ; Magister en Electrotechnique ; 2008

[20] F. CHEVRIE, F. GUELY : « La logique floue ». Cahier Technique n° 191. Groupe Schneider. Mars, 1998.

[21] C. C. Lee. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller. 20(2):404-435, April 1990.

[22] H. BÜHLER : « Réglage par Logique Floue ». Collection Electricité. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Suisse. 1994.

[23] 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.

[24] A.R. Benaskeur, "Aspects de l'application du backstepping adaptatif à la commande décentralisée des systèmes non linéaires", Thèse doctorat, Université Laval, Quebec, Février 2000.

[25] H. MEKKI, « Commande tolérante aux défauts applications à la MAS ». Mémoire de magister, Spécialité Automatique, ENP, Alger, Féverie 2009.

[26] L.hamza, Z.hemza " methodes de commande par backstepping appliquees à la stabilisation d'attituded'un helicoptere a quatre rotors" ,Mémoire d'ingénieur del'Université de M'sila Département d'Electrotechnique, 2009.

[27] B.hamza,M.lamin, " commande hybride via le contrôle vectoriel et le backstepping d'une machine asynchrone " , Mémoire d'ingénieur de l'Université de M'sila Département d'Electrotechnique, 2008.

[28] DJAFAR Djamel Eddine, « Commande tolérante de la machine asynchrone en tenant compte des défauts » Mémoire d'ingénieur Université de M'sila 2011/2012.

- [29] : Khatir Abdelfattah, « Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés un diagnostic des défauts », Thèse de Magister, Université Ferhat Abbas-Sétif, 2009.
- [30] Khebbache Hicham, « Tolérance aux défauts via la méthode backstepping des systèmes non linéaires », Mémoire de magistère en automatique, Université Ferhat Abbas de Setif, 2011.
- [31] Choukchou-Braham Amal, « Contribution à la stabilisation des systèmes mécaniques sous actionnés », Thèse de Doctorat, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, 21 Mai 2011
- [32] 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.
- [33] Choukchou-Braham Amal, « Contribution à la stabilisation des systèmes mécaniques sous actionnés », Thèse de Doctorat, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, 21 Mai 2011.
- [34] P.k.Sinha “State feedback decoupling of nonlinear systems”, IEE Trans. Automat. Cont., vol. Ac-22, pp.487-489, 1977.
- [35] J. Chiasson, A. Chaudhari, and M. Bodson, “Nonlinear controllers for induction motor” In IFAC Nonlinear Control system Design Symposium, Bordeaux France, 1992, pp.150-155.
- [36] A. Isidori. “Nonlinear Control Systems: Communication and Control”. Engineering Serie, Berlin, Springer Verlag, second edition, 1989.
- [37] CHEMMOURI Boudjemaa ; GAFER Boubekeur "Commande non-linéaire d'une machine synchrone a aimants permanents, " Mémoire d'Ingénieur Université de M'SILA, 2005
- [38] R. Marino, S. Peresada, P. Valigi, “ Adaptive Input-Output Linearizing Control of Induction Motors”, IEEE Transactions on Automatic Control, vol.38, N°.2, pp. 208221, February 1993
- [39] C. Canudas, “Commande des moteurs asynchrones : Optimisation, Discrétisation et Observateurs”. Vol. 2, Hermès Science publications, Paris, 2000.
- [40] ALBERTO ISIDORI, 3RD EDITION, 2003, NONLINEAR CONTROL SYSTEMS (COMMUNICATIONS AND CONTROL ENGINEERING SERIES)

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

SPECIALITE :

COMMANDE DES SYSTEMES ELECTRIQUES

Proposé et dirigé par : - Mr. BOUGUERRA Abderrahmen

Présenté par : - KERMICHE Abdelhammid

Thème :

**Commande non linéaires d'un système hydraulique CE105 à
réservoirs couplés**

Résumé :

L'objectif de ce mémoire est l'application des techniques non linéaire sur le modèle du système hydraulique CE105 par conséquent, notre étude est porté sur quatre commande permet de contrôlé ce système. Le premier est le régulateur PID en raison de leur simplicité de la structure. La deuxième technique est la commande par la logique floue. Quant à la troisième, c'est une commande par backstepping, dont le souci est de trouver une méthode systématique pour analyser le système de synthèse mathématique. Le quatrième techniques de commande par linéarisation entrées-sorties. Les lois de commande développées, ont été validées par simulation sur le système hydraulique CE105 à réservoirs couplés.

Mots clés : logique floue, régulateur PID, backstepping, linéarisation entrées-sorties.

N° d'ordre : CSE-092

