

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

**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES**



**Faculté de Technologie**

**Département Ingénierie des Systèmes Electriques**

**Mémoire de Master**

Présenté par

**Attallah Teima Hadil**

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle

---

**Commande par mode glissant-flou d'un système  
hydraulique CE105 à réservoirs couplés**

---

**Soutenu le 01/07/2024 devant le jury :**

Mme. M'Ziou	Nassima	Professeur	Université de Boumerdes	Président
Mme. Meskine	Khadija	MAB	Université de Boumerdes	Examinatrice
Mr. Cherrat	Nidhal	MCB	Université de Boumerdes	Rapporteur

**ANNEE UNIVERSITAIRE : 2023/2024**

## **DEDICACE**

Ce mémoire est dédié à tous ceux qui m'ont soutenu et encouragé durant cette période  
d'études :

A mon père Temime

A ma mère Amel

A ma sœur Maria

A mes chers frères : Louai & Djad

A mes tantes Khalida & Safa

A mes oncles, paternel et maternel.

Toute ma grande famille

A ma meilleure amie : Feirouz

A tous mes amis et collègues. ....et à vous.

Je dédie ce modeste travail à moi-même

Teima.

## **REMERCIEMENT**

Je souhaite avant tout d'adresser toute ma reconnaissance à l'encadreur de ce mémoire, Monsieur CHERRAT Nidhal, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

J'adresse mes sincères remerciements au jury, les professeurs, et aussi chef département Monsieur MESSAOUDI Noureddine intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Je remercie mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, mes amis Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

Je désire aussi remercier les professeurs de l'université de l'UMBB spécialement ceux de la faculté de l'INGM, qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires.

## RESUME

Le but de ce travail est de commander un système hydraulique CE105 à réservoirs couplés en utilisant une approche non linéaire. Pour cela, dans un premier temps, une modélisation du système hydraulique a été présentée. Dans un deuxième temps, un régulateur classique de type PI a été appliqué sur le modèle linéarisé de ce système. Dans une troisième partie, une méthode de commande par mode glissant basée sur une surface non linéaire a été appliquée pour pallier les limitations des méthodes classiques. Enfin, la dernière partie fait appel aux outils de l'intelligence artificielle, notamment la logique floue, pour remédier aux problèmes de la commande par mode de glissement.

Mots clés : Système hydraulique CE105, régulateur classique PI, commande par mode glissant, logique floue.

Abstract:

The aim of this work is to control a CE105 hydraulic system with coupled tanks in using non-linear approach. For this, first, a modeling of the hydraulic system was presented. In a second step, a conventional regulator of type PI has been applied to the linearized model of this system. In a third part, a sliding mode control method based on a non-linear surface has been applied to overcome the limitations of conventional methods. Finally, the last part calls on the artificial intelligence tools, in particular fuzzy logic, to remedy problems of the control by sliding mode.

Key words: CE105 hydraulic system, classic PI regulator, sliding mode control, fuzzy logic.

ملخص :

الهدف من هذا العمل هو التحكم في النظام الهيدروليكي CE105 مع الخزانات المقترنة باستخدام نهج غير خطي. لهذا، أولاً، تم تقديم نموذج للنظام الهيدروليكي. ثانياً، تم تطبيق منظم كلاسيكي من نوع PI على النموذج الخطي لهذا النظام. وفي الجزء الثالث، تم تطبيق طريقة التحكم في الوضع المنزلق على أساس سطح غير خطي للتغلب على قيود الطرق التقليدية. وأخيراً، الجزء الأخير يستخدم أدوات الذكاء الاصطناعي، وأبرزها المنطق الضبابي، لمعالجة مشاكل التحكم في الوضع المنزلق.

الكلمات المفتاحية: النظام الهيدروليكي CE105 ، منظم PI ، الكلاسيكي ، التحكم في الوضع المنزلق، المنطق الضبابي

# TABLE DE MATIERE

LISTE DES FIGURES .....	i
LISTE DES TABLEAUX .....	ii
LISTE DES ABREVIATIONS .....	iv
INTRODUCTION GENERALE.....	1

## **CHAPITRE I : Généralités et modélisation d'un système hydraulique à deux réservoirs couplés CE105**

I.1. Introduction.....	5
I.2. Système hydraulique .....	5
I.2.1 Définition .....	5
I.2.2 Principaux éléments constitutifs d'un système hydraulique.....	5
I.2.3 Domaines et avantages.....	6
I.2.3.1. Domaines.....	6
I.2.3.2. Avantages.....	6
I.3. Modélisation du système hydraulique CE105 à réservoirs couplés.....	6
I.3.1 Description du matériel .....	7
I.3.2 Modélisation du CE105.....	8
I.3.3 Caractéristiques de la pompe et des capteurs de niveau .....	10
I.3.4 Résultat de simulation .....	12
I.3.5 Commentaires .....	14
I.4. Conclusion.....	14

## **CHAPITRE II : Linéarisation et commande PID du système CE105**

II.1. Introduction.....	16
II.2. Origines du régulateur PID .....	16
II.3. Commande PID.....	17
II.3.1 Définitions de la commande PID.....	17
II.3.1.1. PID à structure série.....	17
II.3.1.2. PID à structure parallèle .....	18
II.3.1.3. PID à structure mixte .....	19
II.3.2 Fonctionnement de régulateur .....	19
II.4. Avantage et désavantages De PID .....	20
II.5. Application de la commande PID sur le système CE105 .....	21
II.5.1 Modèle mathématique.....	21
II.5.2 Résultats de simulation .....	24
II.5.2.1. Simulation du système avec une entrée constante.....	24

II.5.2.2. Simulation du système avec une entrée variable .....	26
II.5.3 Commentaires sur les résultats .....	28
II.6. Conclusion .....	29

### **CHAPITRE III : Commande par mode glissant du système CE105**

III.1. Introduction .....	31
III.2. Historique .....	31
III.3. Mode glissant.....	32
III.3.1 Définition du mode glissant.....	32
III.3.2 Explication du phénomène du glissement .....	32
III.3.3 Principe de la commande par mode de glissement.....	32
III.4. Phénomène de Chattering.....	34
III.5. Commande VSC appliquée au système CE105 à réservoirs couplés.....	36
III.5.1 La synthèse de la loi de commande.....	37
III.5.2 Résultats de simulation.....	40
III.5.3 Commentaires sur les résultats .....	42
III.6. Conclusion.....	43

### **CHAPITRE IV : Commande par mode glissant floue du système CE105**

IV.1. Introduction .....	45
IV.2. Généralité sur le système flou .....	45
IV.3. Historique de la logique floue .....	47
IV.4. Logique floue .....	47
IV.4.1 Définitions de la logique floue .....	47
IV.4.2 Pourquoi utiliser la logique floue ? .....	48
IV.5. Théorie et principe de la logique floue : .....	49
IV.5.1 Structure d'un système flou.....	50
IV.5.2 Utilisation la logique floue dans la commande .....	51
IV.6. Domaines d'application.....	52
IV.7. Développement d'une commande Floue-glissante .....	52
IV.7.1 Commande logique floue appliquée au système CE105 à réservoirs couplés .....	55
IV.7.2 Résultats de simulation.....	55
IV.7.3 Commentaire sur le résultat.....	57
IV.8. Conclusion.....	57

<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	<b>58</b>
----------------------------------	-----------

<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>59</b>
----------------------------	-----------

## LISTE DES FIGURES

FIG.I.1 SCHEMA SYSTEME HYDRAULIQUE.	7
FIG.I.2 PRESENTATION DU SYSTEME HYDRAULIQUE CE105 A RESERVOIRS COUPLES.	8
FIG.I.3 SYSTEME HYDRAULIQUE CE105 A RESERVOIRS COUPLES.	9
FIG.I.4 CARACTERISTIQUES DE LA POMPE ET DES CAPTEURS DE NIVEAU.	10
FIG.I.5 SCHEMA BLOCK DU SYSTEME CE105 SUR MATLAB.	13
FIG.I.6 CARACTERISTIQUES DE LA POMPE ET DES CAPTEURS DE NIVEAU.	13
FIG.II.1 STRUCTURE SERIE D'UN REGULATEUR PID.	18
FIG.II.2 STRUCTURE PARALLELE D'UN REGULATEUR PID.	18
FIG.II.3 STRUCTURE MIXTE D'UN REGULATEUR PID.	19
FIG.II.4 SYSTEME HYDRAULIQUE A RESERVOIRS COUPLES.	22
FIG.II.5 SCHEMA DE SYSTEME EN BOUCLE OUVERTE, BOUCLE FERMEE, AVEC REGULATEUR PI.	24
FIG.II.6 SORTIE REELLE EN BOUCLE OUVERT.	25
FIG.II.7 SORTIE REELLE EN BOUCLE FERMEE.	25
FIG.II.8 SORTIE REELLE AVEC LE REGULATEUR PI.	26
FIG.II.9 ÉVOLUTION DE L'ERREUR STATIQUE AVEC LE REGULATEUR PI.	26
FIG.II.10.SIGNAL DE COMMANDE PI.	26
FIG.II.11 SCHEMA DE SIMULATION POUR LE SYSTEME CE105 AVEC ET SANS COMMANDE.	27
FIG.II.12 SORTIE REELLE ET SORTIE DESIREE EN BOUCLE OUVERT.	27
FIG.II.13 SORTIE REELLE ET SORTIE DESIREE EN BOUCLE FERMEE.	28
FIG.II.14 SORTIE REELLE ET SORTIE DESIREE AVEC LE REGULATEUR PI.	28
FIG.III.1 PHENOMENE DU GLISSEMENT.	32
FIG.III.2 PRINCIPE DE LA COMMANDE PAR MODE GLISSANT.	33
FIG.III.3 PHENOMENE DE CHATTERING.	34
FIG.III.4 FONCTION SATURATION.	35
FIG.III.5 FONCTION SIGMOÏDE.	35
FIG.III.6 FONCTION TANGENTE HYPERBOLIQUE.	36
FIG.III.7 SCHEMA BLOC DE LA COMMANDE VSC AVEC DES SURFACES NON LINEAIRES APPLIQUEE AU SYSTEME HYDRAULIQUE CE105.	40
FIG.III.8 SCHEMA DE SIMULINK DE SYSTEME CE105 AVEC LA COMMANDE PAR MODE GLISSANT.	41
FIG.III.9 RESULTAT DE SIMULATION EN MODE GLISSANT SANS PERTURBATION APPLIQUEE AU SYSTEME CE105.	41

FIG.III.10 SCHEMA SIMULINK DU MODE GLISSANT AVEC PERTURBATION.	42
FIG.III.11 RESULTAT DE SIMULATION EN MODE GLISSANT AVEC PERTURBATION APPLIQUEE AU SYSTEME CE105.	42
FIG.IV.1 INTRODUCTION AU LOGIQUE FLOUE.	46
FIG.IV.2 LOGIQUE CLASSIQUE ET LOGIQUE FLOU.	46
FIG.IV.3 LOGIQUE FLOUE.	48
FIG.IV.4 SCHEMA SYNOPTIQUE GENERAL D'UN SYSTEME FLOU.	51
FIG.IV.5 PARTITION FLOUE DE L'ESPACE AUTOUR DE LA SURFACE DE GLISSEMENT.	54
FIG.IV.6 FONCTIONS D'APPARTENANCE DE L'ENTREE S ET DE SORTIE UF.	54
FIG.IV.7 SCHEMA BLOC DE LA COMMANDE FLOUE-GLISSANTE APPLIQUEE AU SYSTEME CE105.	55
FIG.IV.8 SCHEMA SIMULINK DE LOGIQUE FLOUE.	56
FIG.IV.9 RESULTATS DE SIMULATION DE LA COMMANDE LOGIQUE FLOUE APPLIQUEE AU SYSTEME CE105.	57

# LISTE DES TABLEAUX

TAB.I.1 PARAMETRES DE SYSTEME HYDRAULIQUE.

13

## LISTE DES ABREVIATIONS

$\dot{x} = \frac{dx}{dt}$  La dérivée de la variable x par rapport au temps

$[x_1, \dots, x_n]^T \in x$  Vecteur état instantané

t Variable temps

u Variable manipulée (Commande)

x Variable d'état

y Variable de sortie

$h_i$  Niveau du liquide dans le réservoir i

$Q_e$  Le débit d'entrée

$Q_{12}$  Le débit entre le premier et le deuxième réservoir

$Q_0$  Le débit sortant par la valve B

$S_n$  La section des valves A et

A La section de chaque réservoir

$K_Q$  Le gain de la pompe

$a_{12}, a_0$  Les coefficients de décharge de la valve A et B

g La constante de la gravité

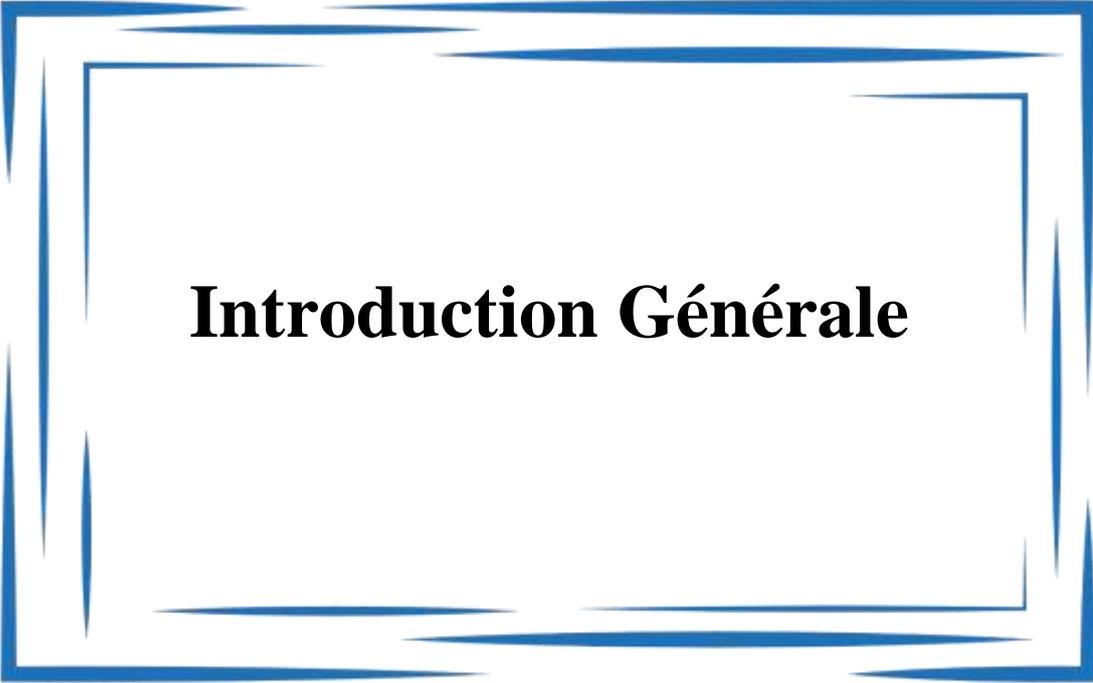
s Surface de glissement

t Variable temps

u Variable manipulée (Commande)

x Variable d'état

y Variable de sortie



# **Introduction Générale**

*« Avant donc que d'écrire, apprenez à penser »*

*Nicolas Boileau*

# INTRODUCTION GENERALE

Dans le domaine de l'automatique, l'ingénieur automaticien est principalement chargé de concevoir des systèmes de contrôle pour atteindre les objectifs souhaités. De nombreux systèmes industriels sont hydrauliques, nécessitant une régulation précise des réservoirs de liquides utilisés pour obtenir les résultats escomptés.

En raison de leur structure complexe et non linéaire, la commande de ces systèmes, tels que les réservoirs couplés CE105, est particulièrement difficile et exige des techniques de régulation spécifiques.

En général, lorsque le modèle du procédé est bien connu, un contrôleur bien conçu offre de bons résultats. Cependant, 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. Les systèmes réels présentent souvent un comportement différent des modèles mathématiques en raison de variations de paramètres, de phénomènes physiques négligés et de perturbations extérieures. Même lorsqu'un modèle précis est disponible, il peut souvent être trop complexe et nécessiter une simplification pour permettre la synthèse d'une commande efficace.

Dans cette mémoire, deux méthodes de commande ont été exposées pour réguler les réservoirs. La première approche, appelée "Commande par Mode Glissant", se distingue comme une stratégie efficace pour gérer les systèmes non linéaires. La seconde option consiste à utiliser la méthode de "Commande par logique floue" sur les systèmes hydrauliques CE105.

## **Motivation de la recherche**

Plus précisément, les différentes raisons qui motivent notre étude sont principalement les suivantes :

- Étendre l'utilisation des outils de l'intelligence artificielle, en particulier la logique floue.
- Synthèse d'une loi de commande Floue-glissante avec une simulation au système hydraulique CE105.

## **Organisation du mémoire**

Le mémoire offre l'opportunité de vérifier différentes méthodes de commande sur la régulation du système hydraulique à deux réservoirs couplés CE105. Il est structuré en quatre chapitres selon le plan suivant :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter une description du système hydraulique en général, et du système de réservoirs couplés CE105 en particulier. Ensuite, une modélisation de ce système en utilisant certaines lois physiques sera effectuée, suivie d'une simulation sur MATLAB pour valider le comportement du modèle obtenu.

Le deuxième chapitre est consacré à la commande PID. Dans un premier temps, nous présentons la théorie de cette commande, en détaillant ses trois structures les plus connues et en abordant ses avantages. Ensuite, après l'étape de linéarisation, nous appliquons la commande PI à notre modèle CE105. Les résultats de la simulation numérique sont présentés à la fin de ce chapitre.

Le troisième chapitre est consacré à la commande par modes glissants. Il présente les concepts fondamentaux des modes glissants, un bref historique, le principe des dynamiques en régime de glissement, ainsi que leurs propriétés de robustesse et leur principal inconvénient : la réticence.

Après avoir posé ces bases théoriques, cette commande avec une surface de glissement non linéaires du premier ordre est appliqué à notre modèle non linéaire de CE105 directement, sans linéarisation.

Dans le quatrième chapitre, nous proposons d'utiliser un système flou pour améliorer les performances de la commande de type mode glissant. Après avoir présenté les fondements théoriques de la logique floue, nous introduisons une commande floue glissante comme une méthodologie hybride de conception des lois de commande.



**CHAPITRE I**  
**Généralités et modélisation d'un**  
**système hydraulique à deux**  
**réservoirs couplés CE105**

*« Savoir ce que tout le monde sait, c'est ne rien savoir »*

*Remy de Gourmont*

# CHAPITRE I : Généralités et modélisation d'un système hydraulique à deux réservoirs couplés CE105

## I.1. Introduction

Les systèmes hydrauliques sont omniprésents dans de nombreux de secteurs industriels, notamment dans l'industrie énergétique, où ils sont utilisés dans les centrales, ainsi que dans le domaine mécanique, où ils alimentent les vérins. De même, dans le secteur du stockage avec les réservoirs, Ces domaines sont les plus utilisés et les plus demandés car ils continuent à augmenter et à s'améliorer. [1]

La modélisation d'un système hydraulique, tout comme pour d'autres systèmes, implique l'utilisation de lois de la physique et de règles de calcul empiriques. L'objectif est de construire un modèle dynamique à la fois simple et efficace, adapté aux objectifs visés et aux ressources disponibles. Cette étape de modélisation est fondamentale pour le développement de systèmes de commande adéquats.

Dans ce chapitre, nous présentons l'étape de modélisation du système hydraulique à deux réservoirs couplés CE105 en utilisant les lois de la physique. Nous présenterons également les résultats de simulation en boucle ouverte du modèle non linéaire obtenu pour ce système.

## I.2. Système hydraulique

### I.2.1 Définition

Les systèmes hydrauliques sont des combinaisons de composants hydrauliques qui utilisent un fluide sous pression pour effectuer un travail mécanique. Ils sont généralement composés d'une centrale hydraulique et de récepteurs, tels que des vérins hydrauliques. La centrale hydraulique, qui comprend une pompe hydraulique, permet de faire circuler le fluide et de fournir le débit et la pression nécessaires pour générer de la puissance. [2]

### I.2.2 Principaux éléments constitutifs d'un système hydraulique

**La centrale hydraulique :** Elle comprend une pompe hydraulique, généralement motorisée par des moteurs électriques ou thermiques, qui permet de faire circuler le fluide et de fournir le débit et la pression nécessaires pour générer de la puissance.

**Le réseau hydraulique** : Il comprend des éléments tels que des réservoirs, des filtres, des pompes, des limiteurs de pression, des clapets anti-retours, des régulateurs de débit et de pression, des distributeurs et des appareils de régulation, des valves d'équilibrages, des clapets parachute, des limiteurs de capacités, des flexibles et des conduites.

**Les récepteurs** : Ils sont utilisés pour transformer l'énergie hydraulique en énergie mécanique. Les vérins hydrauliques sont des exemples de récepteurs qui permettent de soulever, de déplacer ou de compresser des éléments. [3]

### **I.2.3 Domaines et avantages**

#### **I.2.3.1. Domaines**

Les systèmes hydrauliques sont utilisés dans de nombreux domaines, notamment :

L'industrie : Ils sont utilisés pour actionner des équipements lourds et pour réaliser des travaux nécessitant une puissance importante.

La mécanique : Ils sont utilisés pour transmettre des forces et des mouvements à des pièces mécaniques.

La biologie : Les principes de l'hydraulique sont utilisés dans le corps humain, par exemple dans le système cardiovasculaire.

#### **I.2.3.2. Avantages**

Les systèmes hydrauliques ont plusieurs avantages, tels que :

Puissance élevée : Ils permettent de générer des forces importantes et de réaliser des travaux qui ne pourraient pas être effectués à la main.

Faible poids : Ils ont un rapport poids/puissance supérieur à celui des systèmes électriques.

Facilité de contrôle : La pression et le débit du fluide peuvent être ajustés en fonction de la puissance nécessaire [4]

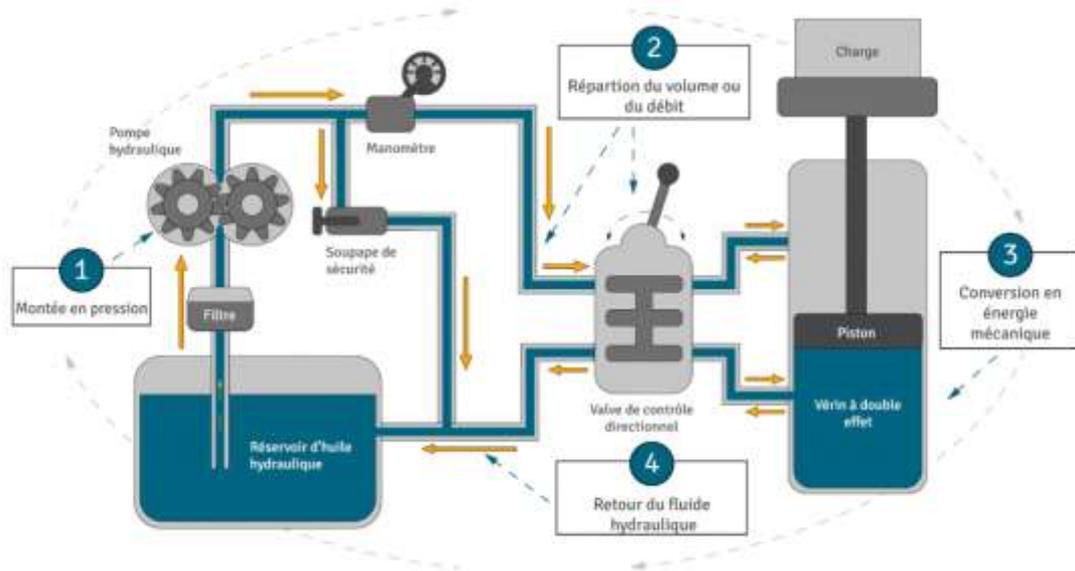


FIG.I.1 schéma système hydraulique.

### I.3. Modélisation du système hydraulique CE105 à réservoirs couplés

#### I.3.1 Description du matériel

Le CE105 à réservoirs couplés est reconnu comme une référence pour l'étude et l'analyse des problèmes de commande des systèmes hydrauliques. Conçu par « TQ Education And Training », ce dispositif nous permet d'examiner la régulation du niveau de 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. [5]

Il est équipé d'une valve rotative utilisée pour modifier la section du canal et, par conséquent, les caractéristiques d'écoulement entre les réservoirs. De plus des capteurs de niveau sont installés dans chaque réservoir, donnant une tension proportionnelle au niveau du liquide sur chaque réservoir comme illustré dans la Figure (I.2).

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) 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. [6]

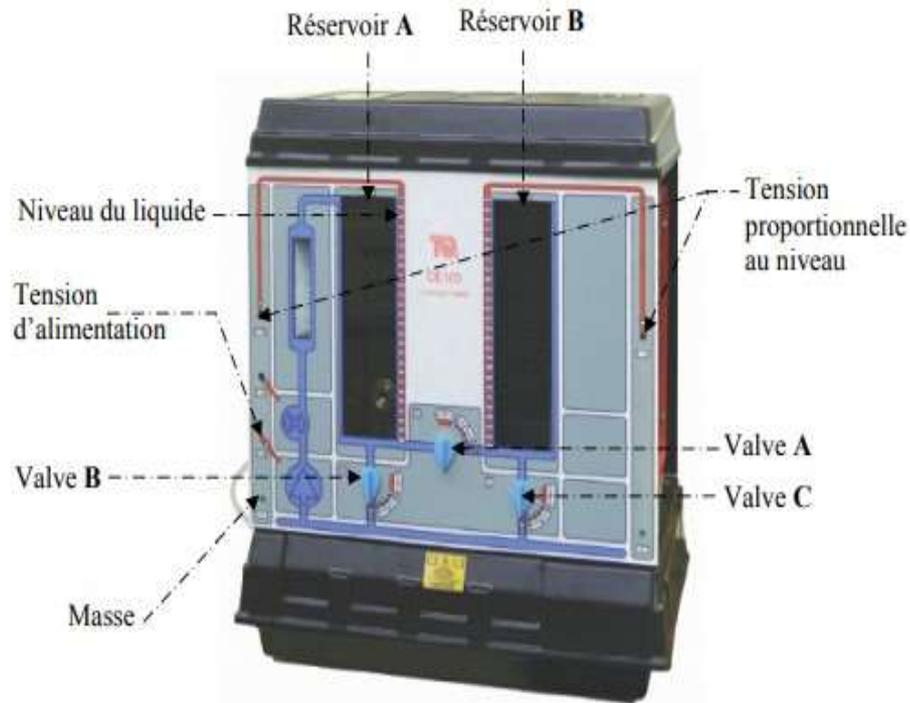


FIG.I.2 Présentation du système hydraulique CE105 à réservoirs couplés.

### I.3.2 Modélisation du CE105

Dans cette section, nous allons appliquer certaines lois physiques pour modéliser le comportement de CE105, afin de trouver la relation mathématique qui décrit précisément son fonctionnement. Cette étape de modélisation revêt une grande importance pour un automatisé, car elle joue un rôle crucial dans la synthèse de la loi de commande.

Comme illustré sur la Figure (I.3), le CE105 comporte deux réservoirs et est caractérisé par deux niveaux :  $h_1$  (niveau dans le premier réservoir) et  $h_2$  (niveau dans le deuxième réservoir), ainsi que par trois débits :  $Q_e$  c'est le débit d'entrée et  $Q_{12}$  est le débit entre le premier et le deuxième réservoir ;  $Q_0$  est le débit sortant par la valve B.

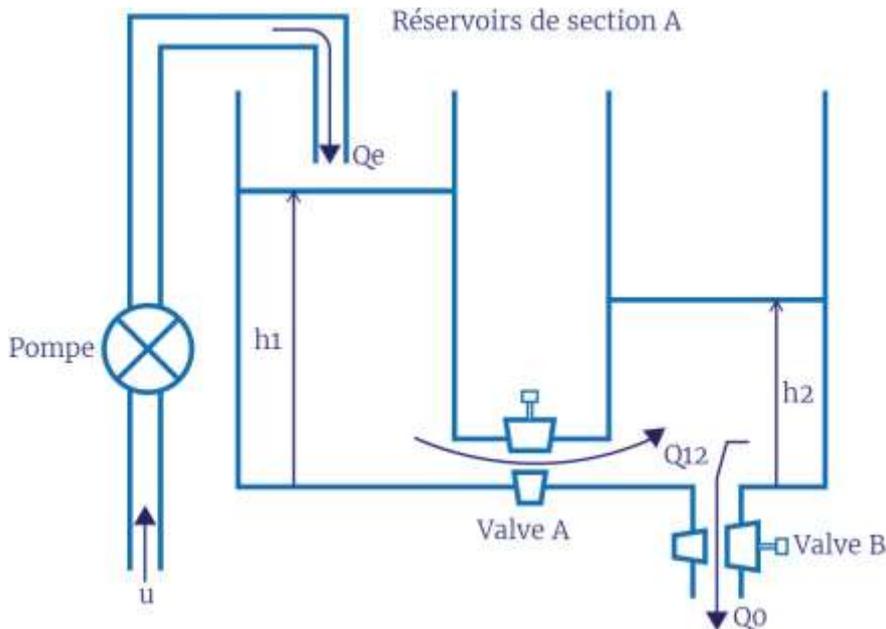


FIG.I.3 Système hydraulique CE105 à réservoirs couplés.

En appliquant l'équation d'équilibre d'écoulement au premier réservoir, nous obtenons :

$$Q_e - Q_{12} = A \cdot \frac{dh_1}{dt} \quad (I.1)$$

De la même façon pour le deuxième réservoir :

$$Q_{12} - Q_0 = A \cdot \frac{dh_2}{dt} \quad (I.2)$$

Avec  $A$  représentant la section du réservoir,  $h_1$  le niveau du liquide dans le réservoir,  $Q_e$  le débit d'entrée généré par la pompe, et  $Q_{12}$  le débit entre les deux réservoirs, nous avons :

$$Q_{12} = S_n \cdot a_{12} \cdot \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (I.3)$$

Et :

$$Q_0 = S_n \cdot a_0 \cdot \sqrt{2g \cdot h_2}$$

Avec :

- $S_n$  : la section des valves A et B. En la pratique, cette section en fonction des dimensions de la valve et du canal d'écoulement.
- $(a_{12}, a_0)$  : représentent les coefficients de décharge de la valve A et B.
- $g$  : la constante de la gravité, avec  $g = 980 \text{ cm/sec}^2$ .

Alors, l'équation différentielle non linéaire qui régit le système hydraulique est sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{A} (Q_e - S_n \cdot a_{12} \cdot \sqrt{2g(h_1 - h_2)}) \\ \frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A} (S_n \cdot a_{12} \cdot \sqrt{2g(h_1 - h_2)} - S_n \cdot a_0 \cdot \sqrt{2g \cdot h_2}) \end{cases} \quad (I.4)$$

### I.3.3 Caractéristiques de la pompe et des capteurs de niveau

Pour l'équation différentielle (I.4), il est évident que  $h_1$  et  $h_2$  sont considérés comme des variables états, et  $Q_e$  est le signal de la commande. En pratique, on peut ajuster la tension d'alimentation  $u$  de la pompe pour réguler le débit d'entrée  $Q_e$ , le capteur de niveau fournit une tension  $y_i$  proportionnelle au niveau  $h_i$  comme illustré dans le schéma suivant :



FIG.I.4 Caractéristiques de la pompe et des capteurs de niveau.

Quand la relation entre le débit d'entrée  $Q_e$  et la tension d'alimentation de la pompe  $u$ , est supposée linéaire, tout comme la relation entre le niveau  $h_i$  et la tension  $y_i$  mesurée par le capteur de niveau, nous pouvons écrire :

$$Q_e = K_Q \cdot u \quad (I.5)$$

Et :

$$y_i = K_h \cdot h_i, \quad i = 1,2$$

Avec  $K_Q$  et  $K_h$  sont des gains constants, on peut les déterminer en utilisant certains équipements qui constituent un système hydraulique (CE105) et des instruments de mesure.

Comme mentionné précédemment, le modèle décrivant le comportement du système CE105 est donné par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{h}_1 = \frac{1}{A} (-S_n \cdot a_{12} \cdot \sqrt{2g(h_1 - h_2)} + K_Q \cdot u) \\ \dot{h}_2 = \frac{1}{A} (S_n \cdot a_{12} \cdot \sqrt{2g(h_1 - h_2)} - S_n \cdot a_0 \cdot \sqrt{2g \cdot h_2}) \end{cases} \quad (I.6)$$

Avec :

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

On peut écrire le modèle d'état de ce système avec :  $[x_1, x_2]^T = [h_2, h_1]^T$  et  $y = k_h \cdot x_1$  comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{A} (S_n \cdot a_{12} \cdot \sqrt{2g(x_2 - x_1)} - S_n \cdot a_0 \cdot \sqrt{2g \cdot x_1}) \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{A} (-S_n \cdot a_{12} \cdot \sqrt{2g(x_2 - x_1)} + k_Q \cdot u) \end{cases} \quad (I.7)$$

Et:  
 $y = k_h \cdot x_1$

En choisissant :  $\beta_1 = \frac{S_n \cdot a_{12} \cdot \sqrt{2g}}{A}$  ;  $\beta_2 = \frac{S_n \cdot a_0 \cdot \sqrt{2g}}{A}$  ;  $k_u = \frac{k_Q}{A}$

Le modèle simplifié devient :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \beta_1 \cdot \sqrt{x_2 - x_1} - \beta_2 \cdot \sqrt{x_1} \\ \dot{x}_2 = -\beta_1 \cdot \sqrt{x_2 - x_1} + k_Q \cdot u \end{cases} \quad (I.8)$$

ET:  
 $y = k_h \cdot x_1$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2) \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + k_Q \cdot u \end{cases} \quad (I.9)$$

Et :  
 $y = k_h \cdot x_1$

Avec les notations suivantes :

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

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2) = \beta_1 \cdot \sqrt{x_2 - x_1} - \beta_2 \cdot \sqrt{x_1} \\ f_2(x_1, x_2) = -\beta_1 \cdot \sqrt{x_2 - x_1} \end{cases} \quad (I.10)$$

**Remarque I.1 :**

Le système CE105 peut être considéré comme un système linéaire (autour d'un point de fonctionnement) ou non linéaire (dans de large domaine de fonctionnement), et avec ou sans couplage

**I.3.4 Résultat de simulation**

Les résultats de simulation sur l'application de la loi de commande par mode de glissement synthétisée précédemment sont présentés dans cette partie. On a obtenu ces résultats en se basant sur le modèle mathématique du système hydraulique CE105 avec des réservoirs combinés aux paramètres de simulation ci-dessous :

Secteur de section de réservoir	$9350 \cdot 10^{-6}$
Section de la vanne A	$78.50 \cdot 10^{-6}$
Section de la vanne B	$78.50 \cdot 10^{-6}$
Coefficient de décharge de vanne A	0.5
Coefficient de décharge de vannes B	0.1
Max. niveau de liquide	0.25
Max. tension d'entrée	10
Gain de pompe	$6.66 \cdot 10^{-6}$
Gain du capteur de niveau	40
La constante de gravité	9.81
Coefficient de décharge	0.6
Coefficient de décharge	1

CHAPITRE I : Généralités et modélisation d'un système hydraulique à deux réservoirs couplés CE105

La période d'échantillonnage	T = 0.2 sec
Le temps de simulation	2000 sec

TAB.I.1 Paramètres de système hydraulique.

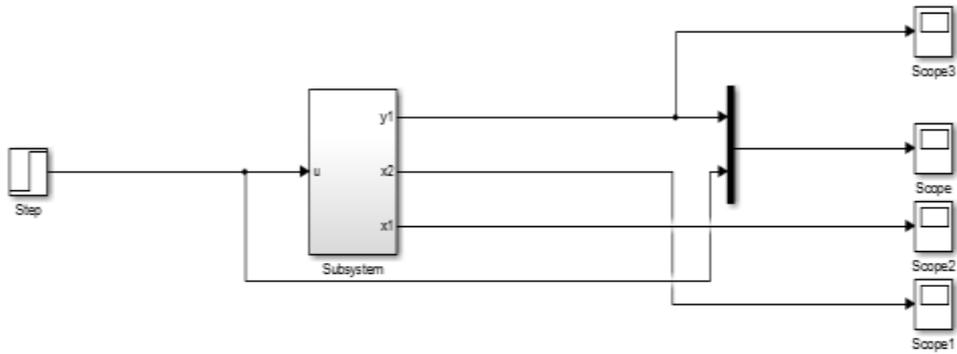


FIG.I.5 Schéma block du système CE105 sur MATLAB.

Les résultats de simulation sont présentés par la figure suivante Figure (I.6) :

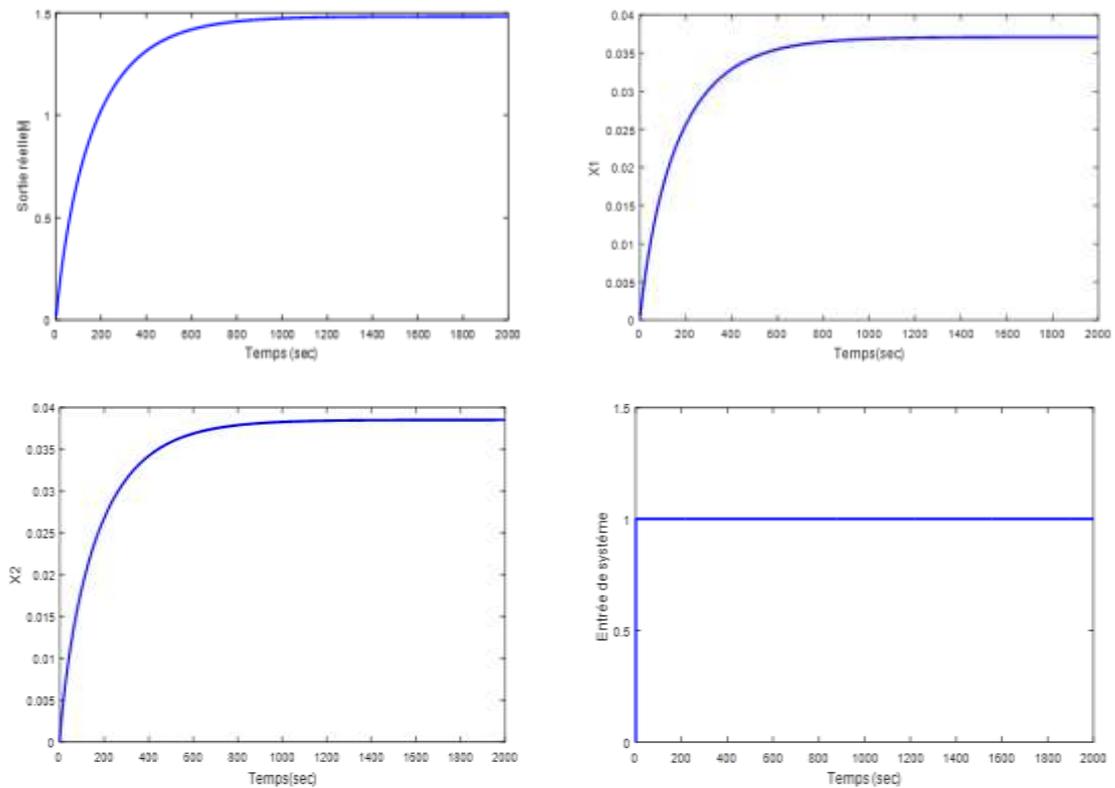


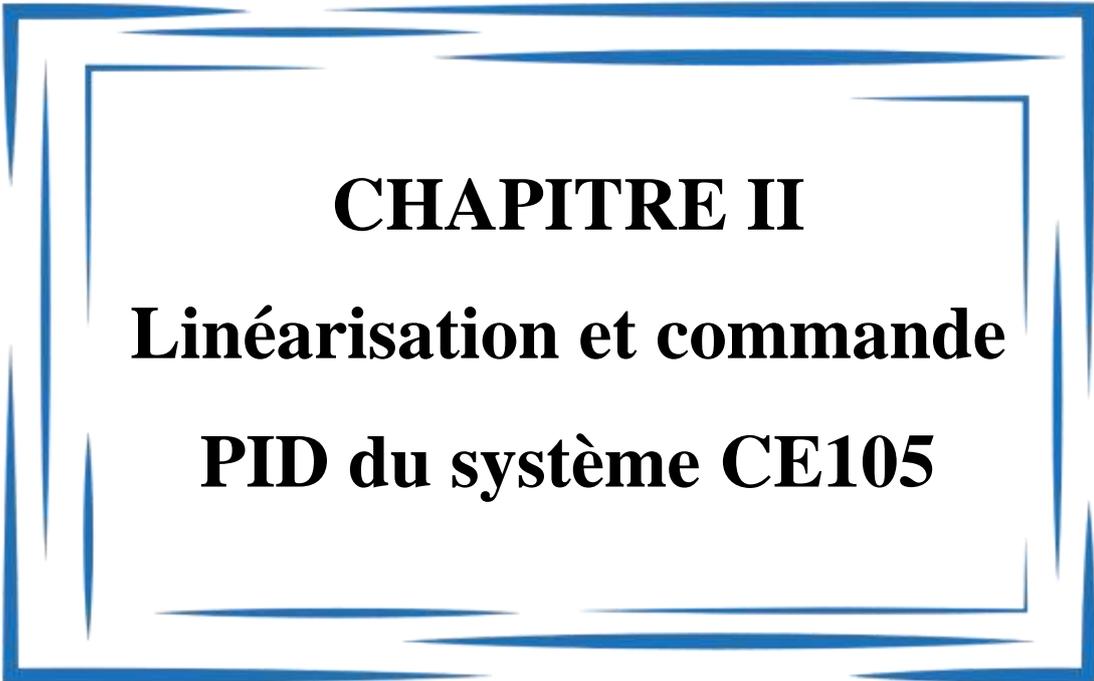
FIG.I.6 Caractéristiques de la pompe et des capteurs de niveau.

### **I.3.5 Commentaires**

Les résultats de simulation du système hydraulique CE105 avec sa dynamique non linéaire sont présentés sur la Figure (I.6), on remarque qu'on a obtenu des résultats satisfaisant avec un temps de réponse environ de 50sec, ce qui est acceptable en fonction de la nature des systèmes hydrauliques.

### **I.4. Conclusion**

Dans cette partie, nous avons décrit et modélisé un système hydraulique à deux réservoirs couplés CE105, caractérisé par deux réservoirs reliés par un canal d'écoulement. Le CE105 est connu pour sa complexité et sa capacité à représenter avec précision les systèmes hydrauliques réels. Pour valider le comportement de ce système, une simulation sur MATLAB a été réalisée en boucle ouverte et en boucle fermée. Cette approche permet non seulement de comprendre le fonctionnement dynamique du CE105, mais aussi d'explorer différentes stratégies de commande pour optimiser son efficacité et sa fiabilité dans des applications pratiques, comme illustré dans les chapitres suivants.



**CHAPITRE II**  
**Linéarisation et commande**  
**PID du système CE105**

*« Et l'espoir, malgré moi, s'est glissé dans mon cœur »*

*Jean Racine*

## CHAPITRE II: Linéarisation et commande PID du système CE105

### II.1. Introduction

Au cours des vingt dernières années, le développement de commande des systèmes ont été considérables sur le plan théorique, de nouvelles approches de commande avancée ont été développées pour pallier les limitations de la commande classique. Parmi ces approches, on peut citer : la commande par backstepping, la commande linéarisante, la commande par mode de glissement, la commande prédictive, la commande adaptative à modèle de référence et la commande par logique floue.

Cependant, sur le plan pratique, la commande PID classique reste la méthode de commande la plus couramment employée dans l'industrie.

Cette préférence pour la commande PID plutôt que pour des techniques avancées s'explique principalement par des raisons économiques. De plus, la commande classique offre souvent des performances satisfaisantes pour une large variété de systèmes. Elle a aussi plusieurs avantages : une structure simple et universelle, une bonne familiarité aux opérateurs, une mise en œuvre aisée, et un coût faible.

Dans le premier chapitre, nous commençons par un résumé de l'histoire du régulateur PID, puis nous décrivons ses différentes structures. Ensuite, nous présentons les avantages et les inconvénients de la commande PID. Nous appliquons ensuite ce correcteur au système CE105 et présentons les résultats de simulation. Enfin, nous concluons avec une conclusion.

### II.2. Origines du régulateur PID

Pour commencer par un peu d'histoire, tout débute lorsqu'Elmer Ambrose Sperry (1860 – 1930) inventeur et industriel américain, cherche dès 1911 à mettre au point un système permettant aux navires de naviguer de façon plus autonome. Pour concevoir ses gyrocompas (stabilisateurs gyroscopiques), il observe le travail qu'un barreur fait intuitivement pour compenser et anticiper les écarts et les erreurs afin de garder son cap. Ces travaux précurseurs ont jeté les bases des principes de la régulation automatique, qui évolueront plus tard vers le développement du régulateur PID.

Plus tard vers 1922 un mathématicien et ingénieur Nicolas Minorsky (1885-1970) propose une formule mathématique qui constituera la base des applications des contrôleurs PID. La logique PID sera utilisée dans les systèmes de pilotage automatique pour les navires de la marine des USA dès le début des années 1930. [7]

## II.3. Commande PID

### II.3.1 Définitions de la commande PID

Le régulateur PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) est un mécanisme de régulation utilisé dans le domaine de l'automatique pour maintenir une variable à une valeur de consigne en ajustant une sortie de manière appropriée. Chacune des composantes du PID a un rôle spécifique dans le processus de contrôle. Le régulateur PID classique est constitué d'une action proportionnelle  $P$ , d'une action intégrale  $I$  et d'une action dérivée  $D$ .

**Proportionnel (P) :** La sortie est proportionnelle à l'erreur actuelle.

**Intégral (I) :** La sortie est proportionnelle à la somme cumulée des erreurs au fil du temps.

**Dérivé (D) :** La sortie est proportionnelle à la pente instantanée de l'erreur. [8]

Les combinaisons possibles entre ces actions permettent de donner trois structures de la commande PID à savoir : la structure série, la structure parallèle et la structure mixte. Chacune des structures présente des avantages par rapport aux autres. Dans la suite, on présente ces trois structures et clarifier les principales différences entre elles. [9]

#### II.3.1.1. PID à structure série

Dans la structure série, les trois actions  $P$ ,  $I$  et  $D$  sont associées en série, c'est-à-dire le signal de l'erreur subit à trois transformations successives comme illustré par la Figure (II.1).

Dans cette structure le signal de commande  $u(t)$  est défini par : [10]

$$u(t) = \alpha K_p e(t) + \frac{K_p}{t_i} \int_0^t e(\tau) dt + t_d K_p \frac{d_e(t)}{dt} \quad (II.1)$$

Où :  $\alpha = \frac{t_i + t_d}{t_i}$  et  $e(t) = y_d(t) - y(t)$  avec :

$y_d$  : Le signal de référence et  $y$  la sortie du système.

---

En appliquant la transformée de Laplace à (II.7), on obtient la fonction de transfert  $C_p$  du régulateur PID série :

$$C(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i p} \right) (1 + T_d p) \quad (II.2)$$

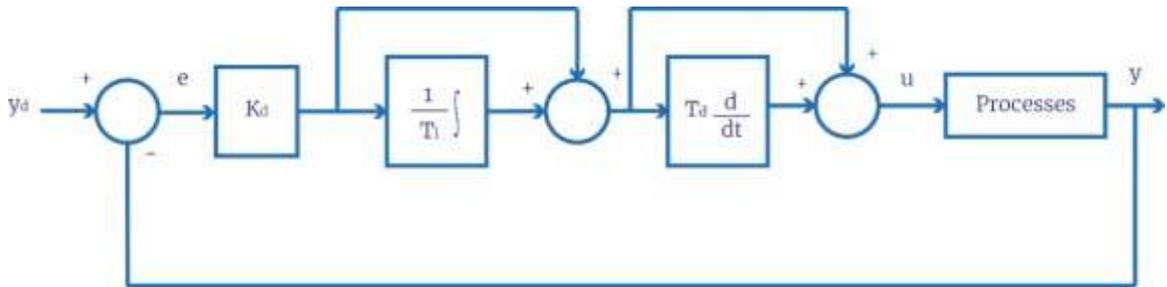


FIG.II.1 Structure série d'un régulateur PID.

### II.3.1.2. PID à structure parallèle

Dans la structure parallèle, les trois actions  $P$ ,  $I$  et  $D$  sont associées en parallèle, comme illustré par la Figure (II.2).

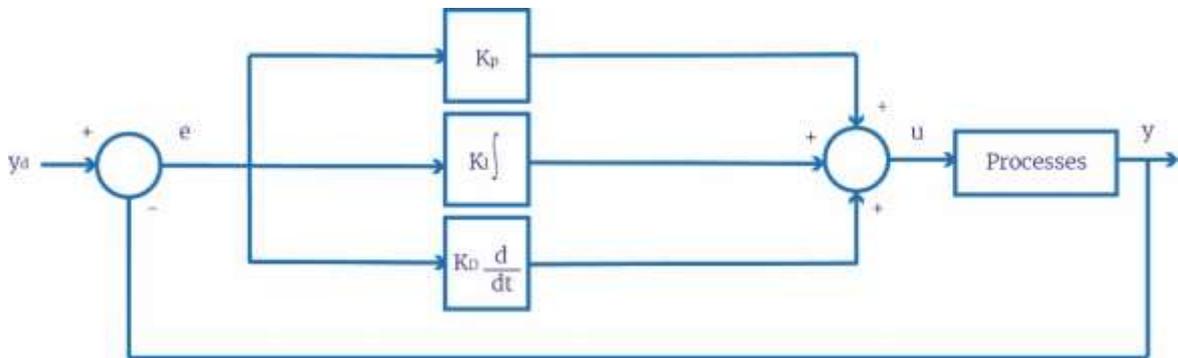


FIG.II.2 Structure parallèle d'un régulateur PID.

Dans cette structure, le signal de commande  $u(t)$  est défini par :

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{d_e(t)}{dt} \quad (II.3)$$

En appliquant la transformée de Laplace à (II.9), on obtient la fonction de transfert  $C_p$  du régulateur PID parallèle :

$$C(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K_p + \frac{K_I}{p} + K_D p \quad (II.4)$$

### II.3.1.3. PID à structure mixte

Dans la structure mixte, les deux actions  $I$  et  $D$  sont associées en parallèle, et leur somme est multipliée par l'action  $P$ , comme illustré par la Figure (III.3).

Dans cette structure le signal de commande  $u$  est donné par [10] :

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{t_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + t_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (II.5)$$

En appliquant la transformée de Laplace à (11), on obtient la fonction de transfert  $C p$  du régulateur PID mixte :

$$C(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right) \quad (II.6)$$

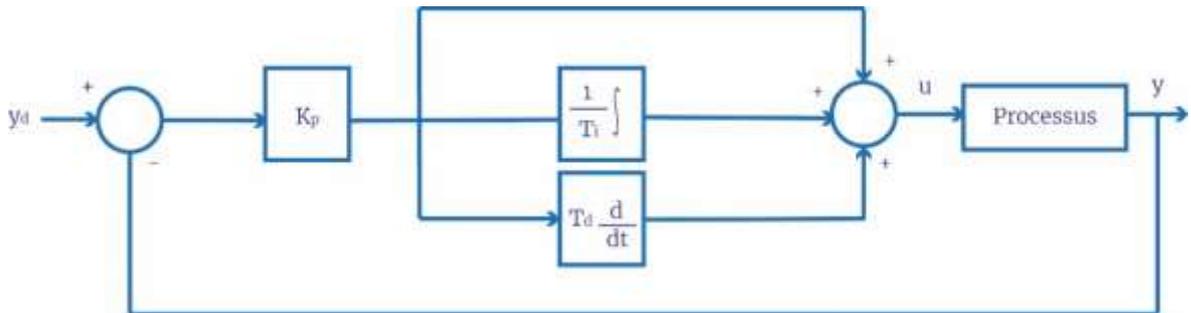


FIG.II.3 Structure mixte d'un régulateur PID.

La principale différence entre ces trois structures concerne l'effet des gains de réglage ( $K_P$ ,  $K_I$  et  $K_D$ ) sur le comportement du régulateur.

La principale différence entre ces trois structures concerne l'effet des gains de réglage ( $K_P$ ,  $K_I$  et  $K_D$ ) sur le comportement du régulateur. Dans les structures série et mixte, les trois actions (proportionnelle, intégrale et dérivée) sont couplées, ce qui signifie que la modification du gain proportionnel  $K_P$  influence simultanément les trois actions. Contrairement, dans la structure parallèle, les actions sont entièrement découplées, ce qui permet de modifier le gain proportionnel  $K_P$  sans affecter les actions intégrale et dérivée. [9]

## II.3.2 Fonctionnement de régulateur

---

Le principe d'un régulateur PID est relativement simple à expliquer. Qu'il s'agisse par exemple d'un régulateur de température PID ou d'un régulateur d'humidité PID, le régulateur tente toujours d'ajuster une certaine grandeur de régulation à la valeur de consigne à l'aide de la valeur réelle. Le régulateur PID ajuste la sortie du système de contrôle en combinant ces trois composantes :

$$u(t) = K_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (II.7)$$

**L'action P** : permet d'améliorer la rapidité de système et la précision de système

**L'action I** : permet de supprimer l'erreur statique.

**L'action D** : permet de réduire les oscillations.

## II.4. Avantage et désavantages De PID

Les régulateurs PID offrent plusieurs avantages :

- **Précision accrue** : Ils permettent de maintenir une valeur de consigne constante, ce qui est particulièrement important pour les processus industriels où la précision est essentielle.
- **Réaction rapide** : La composante proportionnelle permet une réaction rapide à l'écart de régulation, ce qui est utile pour les processus qui nécessitent une réponse rapide.
- **Stabilité** : La composante intégrale permet d'éliminer les écarts de régulation en intégrant la différence entre la valeur de consigne et la valeur réelle, ce qui contribue à la stabilité du système.
- **Efficacité** : Les régulateurs PID sont plus efficaces que les régulateurs tout ou rien, car ils ne nécessitent pas de fréquents cycles d'allumage et d'extinction, ce qui réduit les pertes d'énergie et les fluctuations.

Cependant, les régulateurs PID peuvent également présenter quelques désavantages :

- **Complexité** : Le réglage des paramètres PID peut nécessiter une expertise et une connaissance théorique préalable.
- **Instabilité** : Si les paramètres PID ne sont pas ajustés correctement, le régulateur peut

devenir instable, ce qui peut entraîner des fluctuations dans la valeur de consigne.

- **Dépendance aux paramètres :** La performance du régulateur PID dépend fortement des paramètres de réglage, ce qui peut rendre le réglage plus difficile. [11]

## II.5. Application de la commande PID sur le système CE105

### II.5.1 Modèle mathématique

Dans cette partie, nous proposons d'appliquer la commande PID à un système de réservoirs couplés CE105, dont le modèle mathématique a été présenté dans le chapitre I. En raison de la non-linéarité du système CE105, on propose d'utiliser la technique de linéarisation entrée-sortie, qui consiste à rendre linéaire la relation dynamique entre l'entrée de commande d'un système non linéaire et sa sortie.

La modélisation du réservoir CE105, non linéaire, est définie dans le chapitre II (voir les équation II.8 et II.9) de la manière suivante :

$$Q_e - Q_{12} = \frac{dv_1}{dt} = A \cdot \frac{dh_1}{dt} \quad (II.8)$$

$$Q_{12} - Q_0 = \frac{dv_2}{dt} = A \frac{dh_2}{dt} \quad (II.9)$$

« Les vannes sont supposées se comporter comme des pointues standard orifice de bord » [12].

Les équations suivantes relient l'écoulement à travers les vannes au niveau de fluide dans le réservoir.

$$Q_{12} = S_n \cdot a_{12} \sqrt{2g|h_1 - h_2|} \quad (II.10)$$

$$Q_0 = S_n \cdot a_0 \sqrt{2gh_2} \quad (II.11)$$

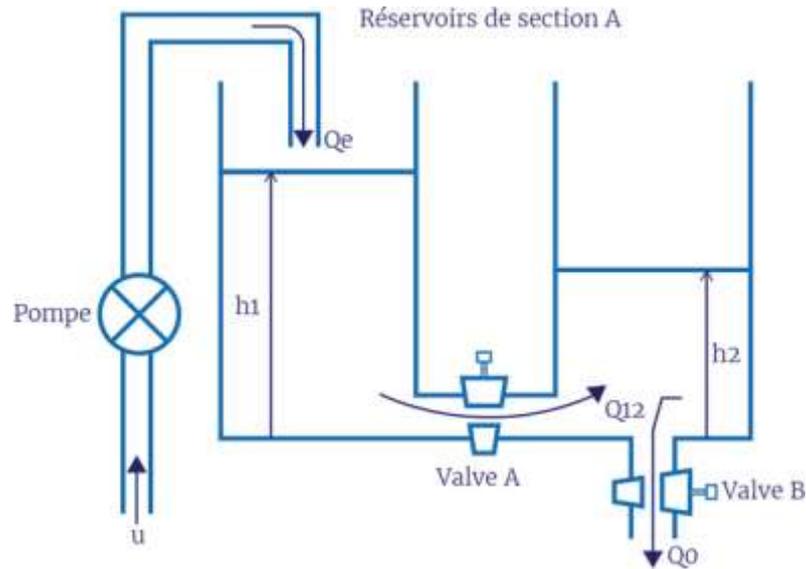


FIG.II.4 Système hydraulique à réservoirs couplés.

Où :

$A$  : est la section du réservoir

$a_{12}$  : est la section transversale de l'orifice de la vanne

$a_0$  : est le coefficient de décharge de la vanne.

$$A \frac{dh_1}{dt} + S_n \cdot a_{12} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} = Q_e \quad (II.12)$$

$$A \frac{dh_2}{dt} + S_n \cdot a_0 \sqrt{2gh_2} = S_n \cdot a_{12} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (II.13)$$

Les équations (II.12) et (II.13) sont des équations différentielles du premier ordre qui ne sont pas linéaires. Pour les utiliser dans le système de commande, il est nécessaire de les linéariser en considérant de petites variations autour du niveau de fluide de fonctionnement désiré dans les réservoirs, soit :

$$h_1 = h'_1 + G_1 \quad (II.14)$$

$$h_2 = h'_2 + G_2 \quad (II.15)$$

Avec  $h'$  est Le niveau de fonctionnement normal, qui est constante, tandis que  $G$  représente un petit changement à ce niveau. Ensuite, pour un petit changement du  $G$  autour de  $h_1$ , on peut approcher les équations non linéaires (II.12) et (II.13) par calculer la tangente linéaire à  $h'$  dans (II.10) et (II.11). De la même manière, le débit entrant  $Q_e$  est constitué d'un composant constant

$Q'_e$  ainsi qu'un petit changement  $q_e$ . Puis, on peut réécrire les équations (II.12) et (II.13) comme suit :

$$A \frac{dh_1}{dt} + Q'_{12} + q_{12} = Q'_e + q_e \quad (\text{II.16})$$

$$A \frac{dh_2}{dt} + Q'_0 + q_0 = Q'_{12} + q_{12} \quad (\text{II.17})$$

La pente des caractéristiques de la vanne au niveau  $h'$  est donnée par l'équation (II.18)

$$\frac{dQ}{dh} = \frac{q}{h} \quad (\text{II.18})$$

Réécrites les équations (II.16) et (II.17) en utilisant (II.18)

$$A \frac{dh_1}{dt} + Q'_{12} + G_1 \frac{dQ_{12}}{dh_1} - G_2 \frac{dQ_{12}}{dh_2} = Q'_e + q_e \quad (\text{II.19})$$

$$A \frac{dh_2}{dt} + Q'_0 + G_2 \frac{dQ'_0}{dh_2} = Q'_{12} + G_1 \frac{dQ_{12}}{dh_1} - G_2 \frac{dQ_{12}}{dh_2} \quad (\text{II.20})$$

Lorsque le niveau est constant, avec  $q_e = 0$ ,  $G_1 = 0$  et  $G_2 = 0$ , les équations (II.19) et (II.20) donnent la représentation d'état de système, où :

$$Q_{12} = Q_e \quad (\text{II.21})$$

$$Q'_0 = Q'_{12} \quad (\text{II.22})$$

En soustrayant l'équation (II.21) de (II.19) et (II.22) de (II.20) et en utilisant la notation suivante :

$$D_1 = \frac{dQ_{12}}{dh_1}, D_2 = \frac{dQ_{12}}{dh_2}, D_3 = \frac{dQ_0}{dh_2}$$

En résolvant  $h_1$  à partir de (II.20), en obtenant la dérivée temporelle et en remplaçant dans (II.19). Ensuite, puis en réarrangeant, on obtient l'équation différentielle linéaire du deuxième ordre pour le système de réservoirs couplés.

En utilisant le transformé de Laplace, on obtient la fonction de transfert du système de réservoirs couplés.

$$\frac{L(S)}{V(S)} = \frac{U^{-1}D_1K_PK_h}{A^2U^{-1}s^2 + A((D_1 + D_2 + D_3 + D_4)U^{-1}s + 1)} \quad (\text{II.23})$$

Où :

$$U = [(D_1)(D_3 + D_2) - D_1D_2] \quad (II.24)$$

$K_p$  est le gain de la pompe et  $K_h$  est le gain du capteur de niveau sur le réservoir 2 .

Les paramètres du système sont présentés dans le tableau.I.1.

Enfin la fonction de transfert donnée par l'équation (II.23) est :

$$\frac{L(S)}{V(S)} = \frac{4.739}{2827s^2 + 349s + 1} \quad (II.25)$$

## II.5.2 Résultats de simulation

### II.5.2.1. Simulation du système avec une entrée constante

Les résultats de simulation modèle du système hydraulique CE105 linéarisant on boucle ouvert et on boucle fermée sont présentés par les Figures (II.6) et (II.7).

Les résultats de simulation de l'application de la commande PI au système hydraulique CE105 en utilisant la linéarisation autour d'un point de fonctionnement (fluide de fonctionnement désiré) sont présentés par les Figures (II.8-10).

Dans cette simulation, nous utilisons le modèle mathématique du système hydraulique CE105 avec les paramètres de simulation suivants (voir la Figure II.5) :

- La période d'échantillonnage  $T = 0.2$  sec.
- Le temps de simulation = 2000sec.

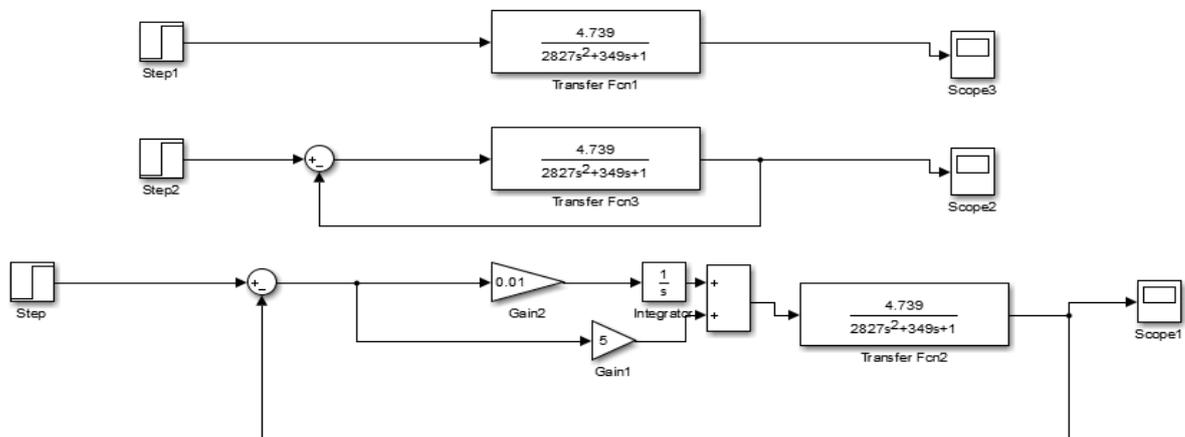


FIG.II.5 Schéma de système en boucle ouverte, boucle fermée, avec régulateur PI.

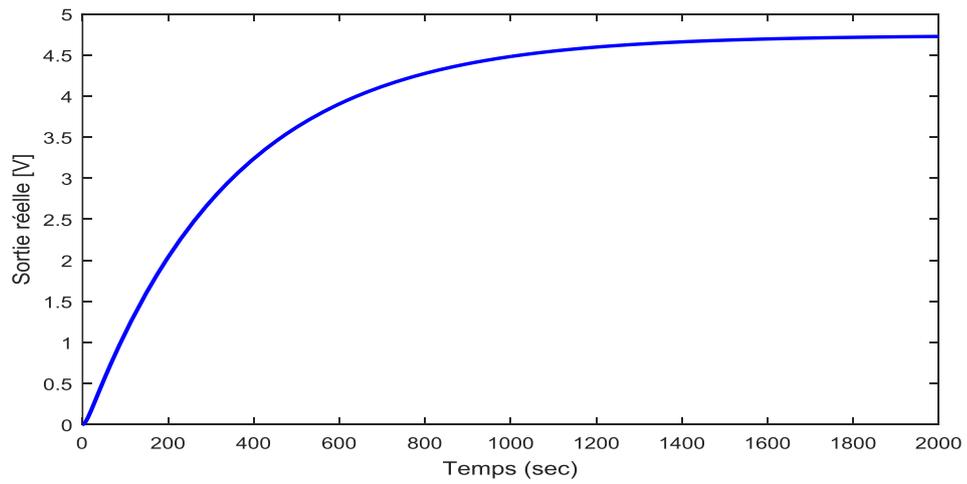


FIG.II.6 Sortie réelle en boucle ouvert.

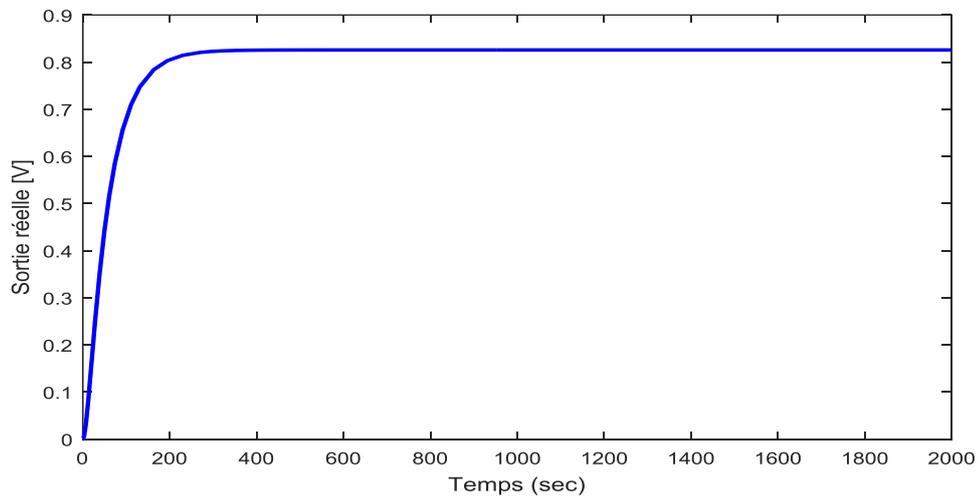


FIG.II.7 Sortie réelle en boucle fermée.

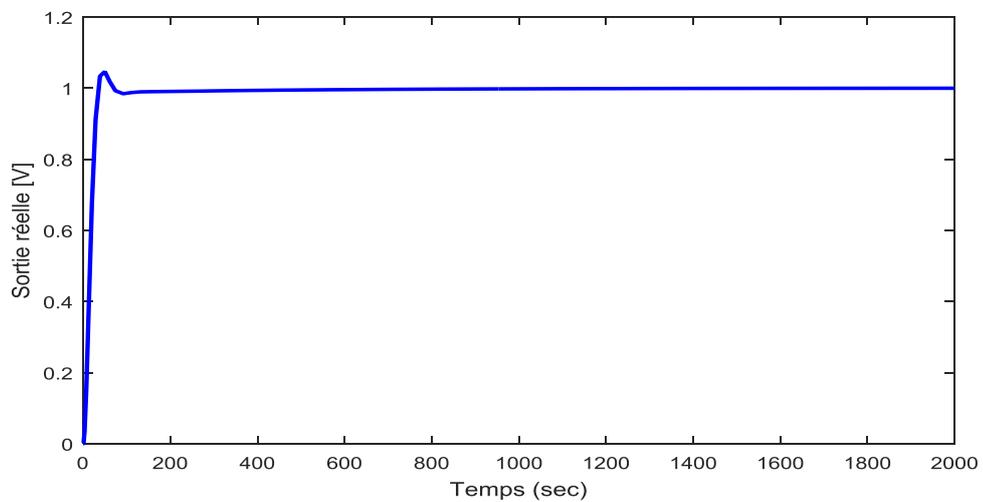


FIG.II.8 Sortie réelle avec le régulateur PI.

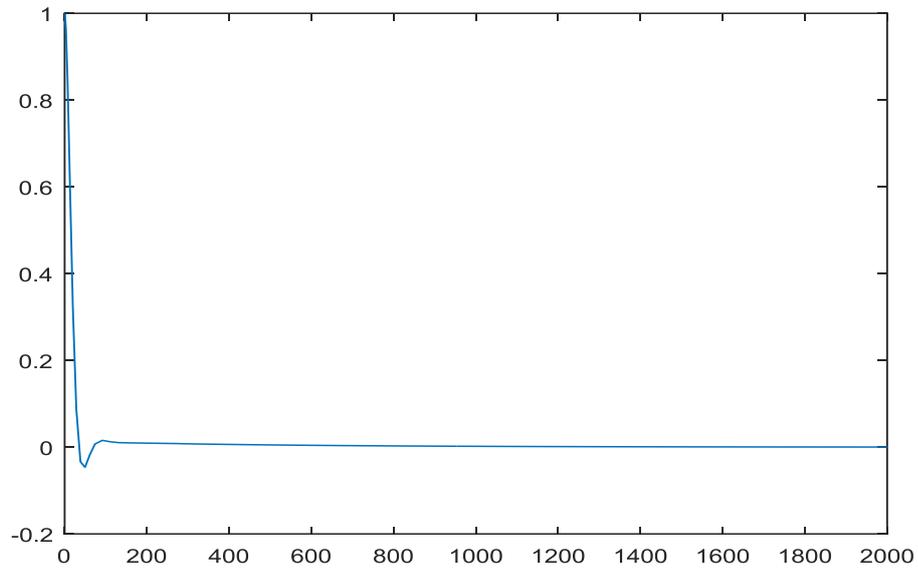


FIG.II.9 Évolution de l'erreur statique avec le régulateur PI.

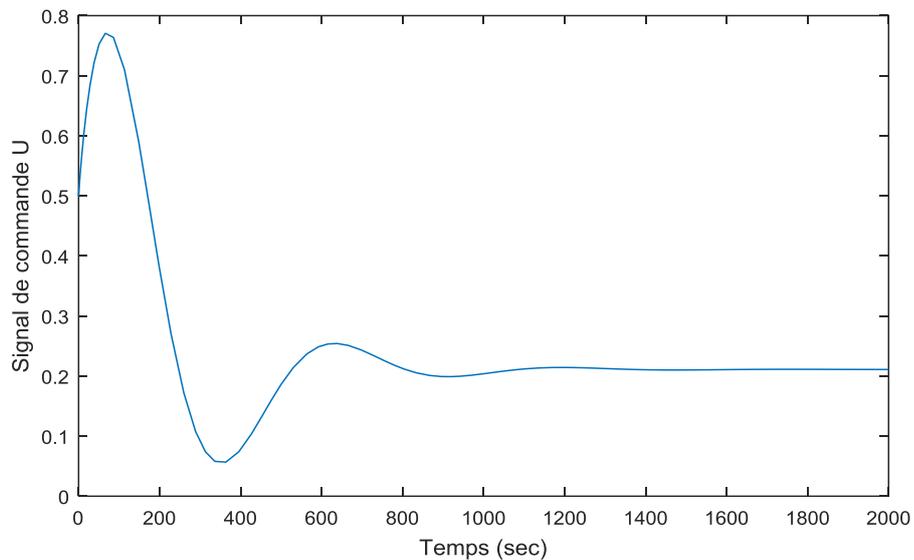


FIG.II.10. Signal de commande PI.

### II.5.2.2. Simulation du système avec une entrée variable

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation de la réponse du système hydraulique en boucle ouverte et en boucle fermée, ainsi que de l'application de la loi de commande classique avec un signal de référence variable  $y_d$  défini comme suit :

Les résultats de simulation on boucle ouvert et on boucle fermée sont présentés par les

Figures (II.12), (II.13).

Les résultats de simulation de l'application de la commande PI sont présentés par la Figure (II.14).

La Figure (II.11) représente le schéma de simulation du système CE105 en boucle ouverte et en boucle fermée, avec le régulateur PI

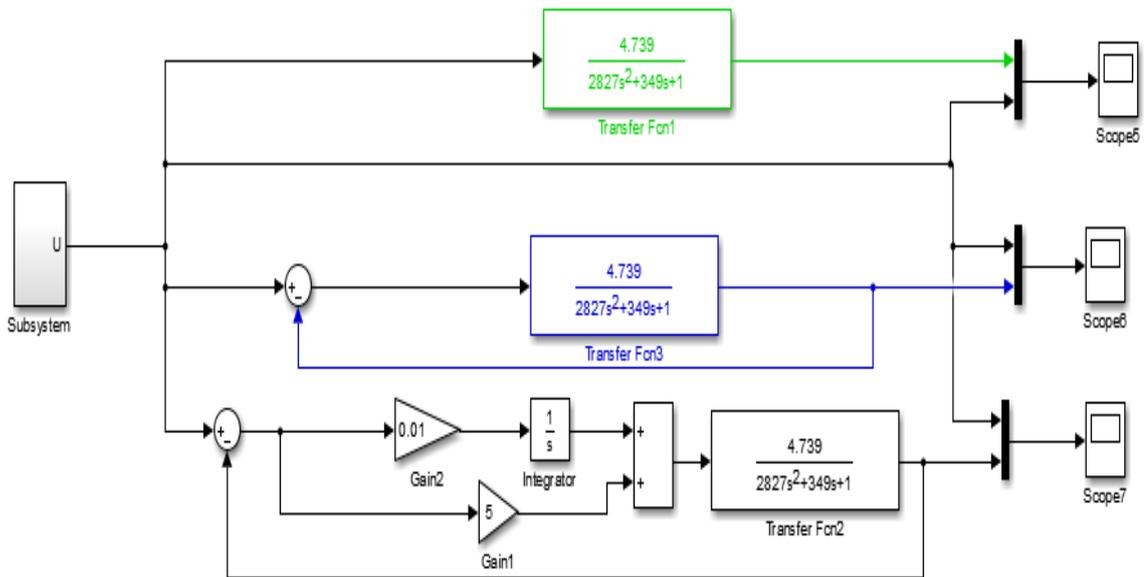


FIG.II.11 Schéma de simulation pour le système CE105 avec et sans commande.

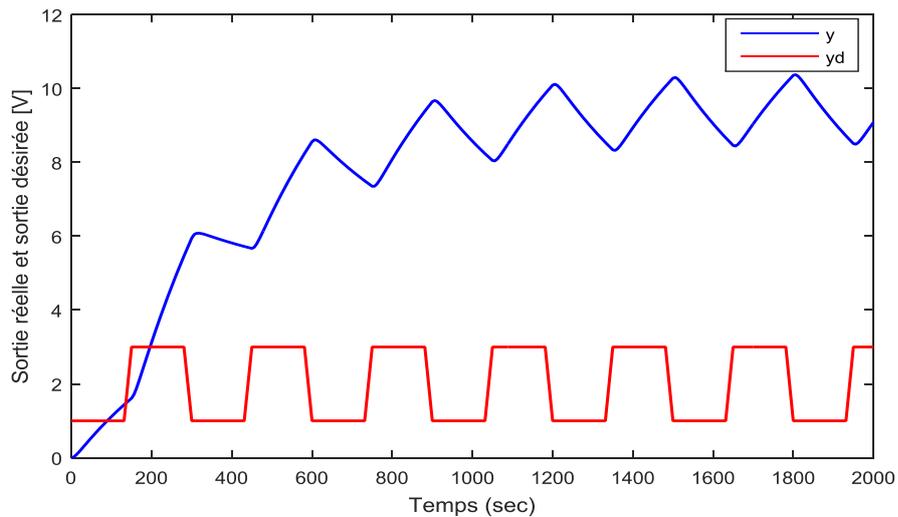


FIG.II.12 Sortie réelle et sortie désirée en boucle ouvert.

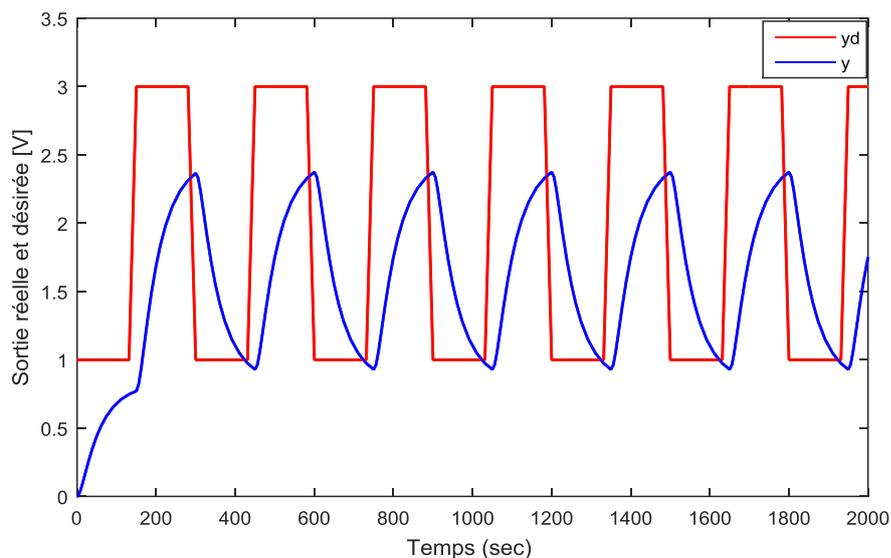


FIG.II.13 Sortie réelle et sortie désirée en boucle fermée.

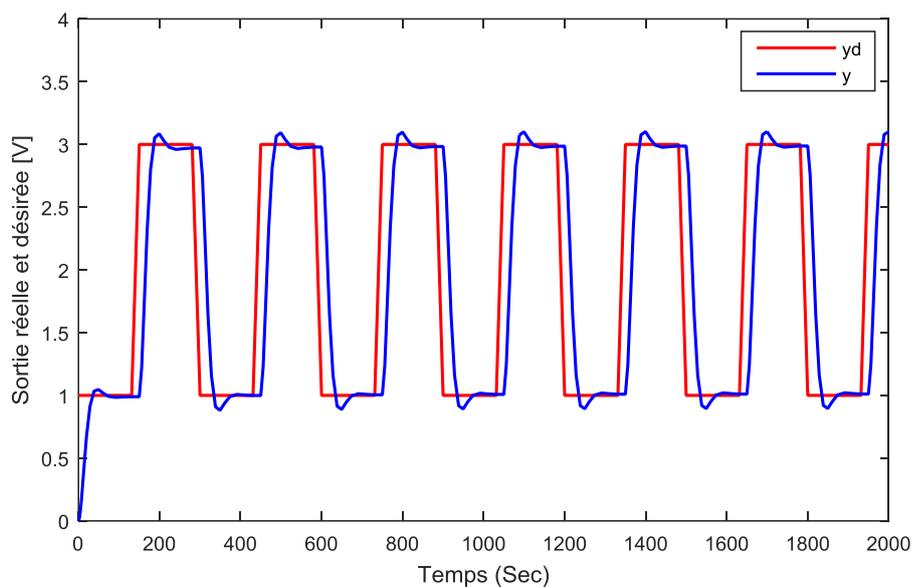


FIG.II.14 Sortie réelle et sortie désirée avec le régulateur PI.

### II.5.3 Commentaires sur les résultats

Des Figures (II.6) et (II.7), il est clair que la réponse du système simulé est cohérente avec le comportement dynamique attendu du système en temps réel, et la rapidité de la réponse du système en boucle fermée est augmentée par rapport à celle en boucle ouverte.

Des Figures (II.6-II.10), on constate que la poursuite a été satisfaisante, avec un léger dépassement et un temps de réponse d'environ 40 secondes, ce qui est acceptable en fonction

de la nature des systèmes hydrauliques. Des Figures (II.12-14), il est clair que la commande PI permet de maintenir la poursuite du système mais avec de mauvaises performances.

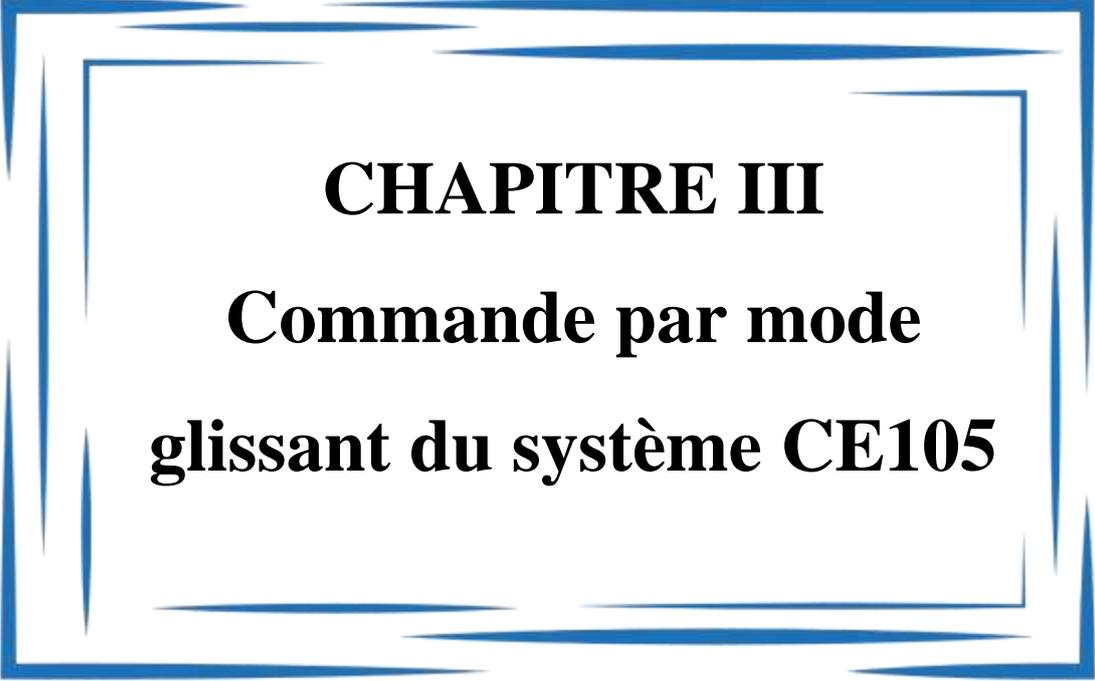
L'objectif principal du contrôle du système de réservoirs couplés est de maintenir le niveau de liquide dans le réservoir constant lorsqu'il y a une entrée ou une sortie de liquide. Une fois plusieurs ajustements réalisés, notre système gagne en performance (plus rapide et plus précis).

## **II.6. Conclusion**

L'objectif principal du contrôle du système de réservoirs couplés est de maintenir le niveau de liquide dans le réservoir constant lorsqu'il y a une entrée ou une sortie de liquide.

Dans ce chapitre, nous abordons le cas où le système est non linéaire et procédons ensuite à sa linéarisation. Après cette étape, nous proposons d'utiliser un régulateur simple de type PI pour contrôler le système et maintenir le niveau de liquide à la consigne souhaitée.

Les résultats de simulation de cette commande ont permis de déterminer que cette approche offre une performance satisfaisante en termes de stabilité. Cependant, en ce qui concerne le problème de poursuite, les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants



**CHAPITRE III**  
**Commande par mode**  
**glissant du système CE105**

*« Après le pain, l'éducation est le premier besoin d'un peuple »*

*Danton*

## **CHAPITRE III : Commande par mode glissant du système CE105**

### **III.1. Introduction**

Les méthodes de commande traditionnelles sont extrêmement performantes pour gérer les systèmes linéaires à paramètres constants.

Cependant, ces méthodes ne suffisent pas pour les systèmes non linéaires ou les systèmes linéaires à paramètres variables. Par conséquent, il est nécessaire de recourir aux méthodes de commande non linéaire. Parmi celles-ci, la plus connue est la commande à structure variable.

Le mode glissant de commande est une méthode spécifique de commande à structure variable. Son comportement est donc insensible aux fluctuations des paramètres du système et aux perturbations extérieures.

Ce chapitre présente les concepts fondamentaux et le principe de la commande par mode glissant, qui se résume en trois étapes : sélectionner la surface de glissement, établir les conditions de convergence et finalement déterminer la loi de commande.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous allons appliquer cette commande de type mode glissant pour stabiliser le système de quadrirotor présenté dans le chapitre 1 avec sa dynamique non linéaire. Un résultat de simulation est présenté pour confirmer l'étude théorique.

### **III.2. Historique**

Des recherches sur la commande à structure variable ont été données par l'auteur soviétique Decarlo et autres (1998) et par Hung et autres (1993). La procédure de contrôle de la trajectoire du système force la zone d'état appelée surface de glissement. Les trajectoires du système et la surface de glissement sont alors confondues lors de l'utilisation de commandes à haute fréquence de commutation. Le principal avantage de la commande à structure variable avec le mode glissant est la durabilité contre les changements de paramètres ou les perturbations. Le phénomène de chattering associé à la commande par mode glissant, présent un inconvénient majeur par ce qu'il peut exciter la dynamique de la commutation à haute fréquence qui le rend indésirable. Une méthode utilise une couche limite autour de la commutation. Une autre méthode, remplace la commande du type maximum / minimum par une fonction de vecteur

d'unité avec une constante positive. Cependant ces approches ne fournissent aucune garantie quant à la convergence exacte au mode glissant et présente un problème de chattering-robustesse. [13]

### III.3. Mode glissant

#### III.3.1 Définition du mode glissant

Les modes glissants sont une technologie qui permet d'orienter la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation adéquate autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre, ce qui explique le phénomène de glissement. [14]

#### III.3.2 Explication du phénomène du glissement

Le mode de glissement existe lorsque les commutations ont lieu continûment entre " $U_{max}$ " et " $U_{min}$ ". Ce phénomène est démontré à l'aide de la Figure (III.1) pour un système à régler du deuxième ordre avec les deux grandeurs d'état  $x_{s1}$  et  $x_{s2}$ . [14]

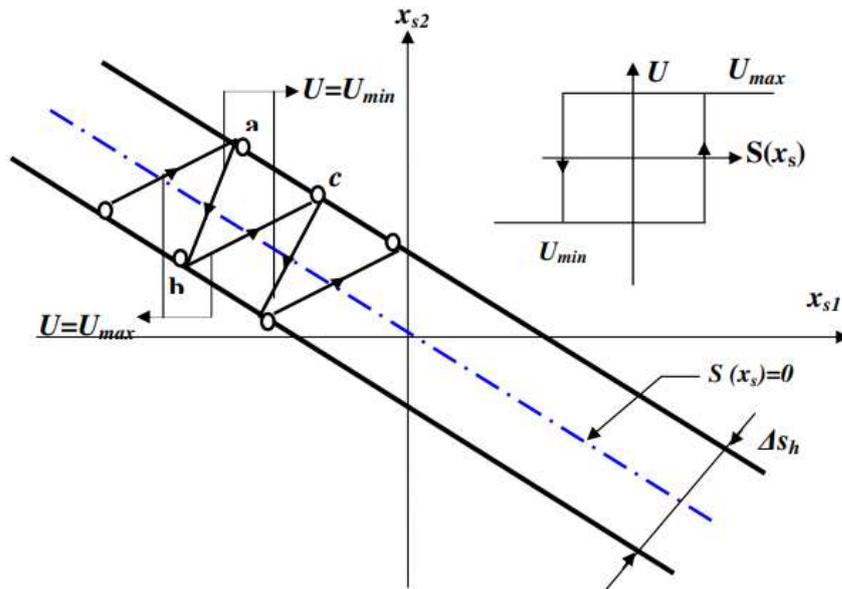


FIG.III.1 Phénomène du glissement.

#### III.3.3 Principe de la commande par mode de glissement

Le principe de base de la commande par mode glissant consiste premièrement à attirer l'état du système dans une région convenablement sélectionnée (cette région s'appelle la surface de

glissement), puis amener le système vers un état désiré. Donc, le comportement du système peut être décrit par deux phases : \* La phase de convergence : pendant laquelle la trajectoire d'état du système partant d'une condition initiale quelconque et converge vers la surface de glissement. Durant cette phase, le système reste sensible aux incertitudes. \* La phase de glissement : durant laquelle la trajectoire d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'état désiré. Le comportement du système ne dépend plus du système ni des perturbations, mais est entièrement déterminé par la surface de glissement. La Figure ci-dessous montre le principe de base de la technique de commande par mode glissant.

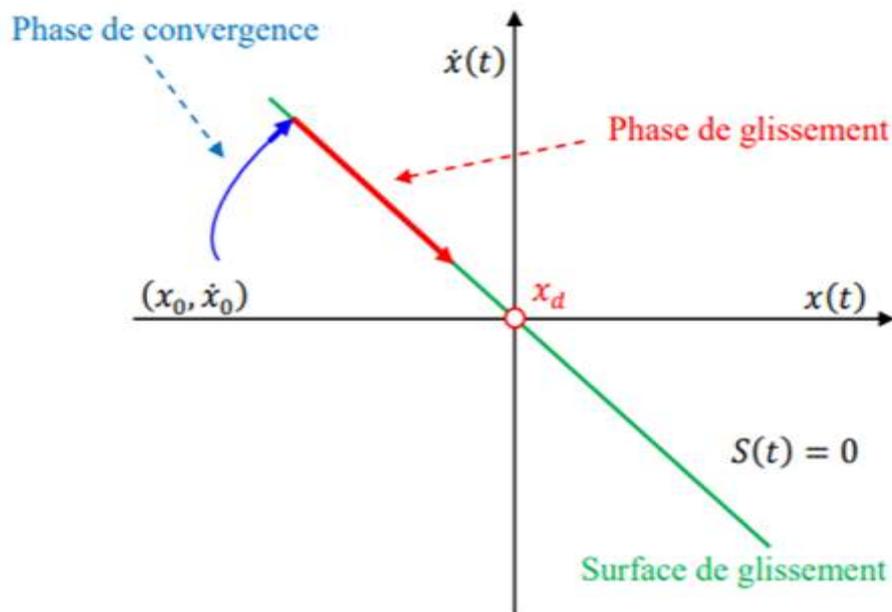


FIG.III.2 Principe de la commande par mode glissant.

En résumé, une commande par mode glissant est divisée en trois parties :

- 1- Le choix de la surface de glissement.
- 2- L'établissement des conditions de la convergence.
- 3- La détermination de la loi de commande. [13]

#### Remarque III.1 :

Le gain choisi a une grande influence car, s'il est sélectionné avec un gain très faible, le temps de réponse sera prolongé, tandis que s'il est sélectionné avec un gain très élevé, il y aura des oscillations importantes (phénomène de chattering) au niveau de l'organe de commande.

### III.4. Phénomène de Chattering

La partie discontinue dans la commande par mode glissant engendre des oscillations hautes fréquences (commutation d'une valeur à une autre à une fréquence infinie.) de la trajectoire du système autour de la surface de glissement. Ce phénomène est connu sous le nom de réticence ou chattering. Cependant, dans la pratique, ce phénomène est indésirable, car la fréquence de commutation élevée peut endommager les actionneurs et des organes mécaniques et peut provoquer une élévation de température dans les systèmes électriques. Le phénomène de Chattering peut être réduit ou éliminé en remplaçant la fonction signe par une fonction de saturation adéquate qui filtre les hautes fréquences. [13], [15]

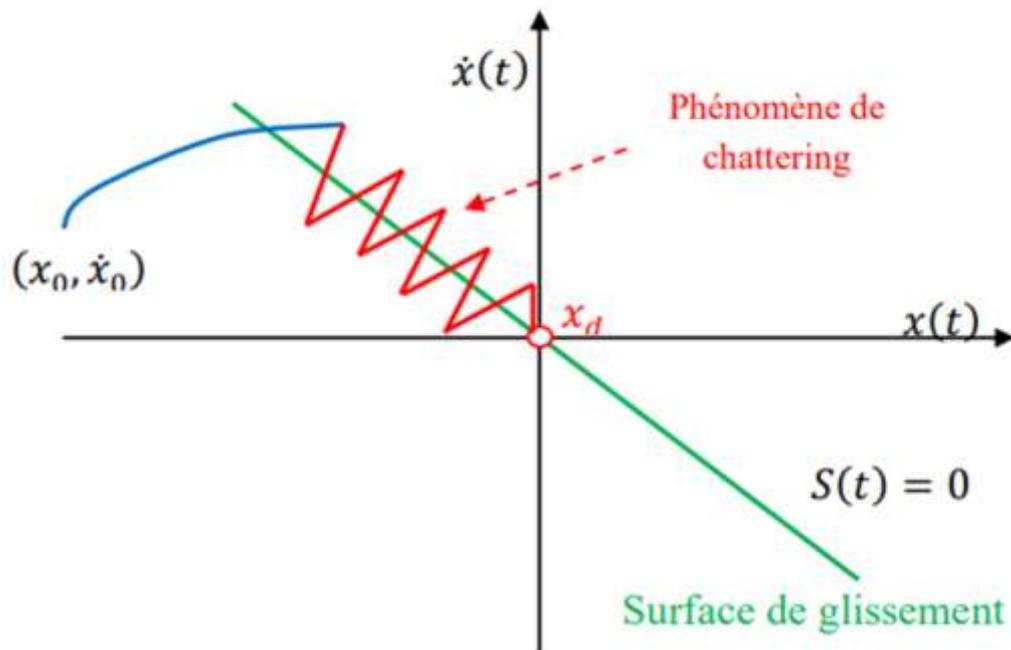


FIG.III.3 Phénomène de chattering.

La fonction de saturation « sat » est définie par l'équation suivante

$$Sat(x) = \begin{cases} 1, & x > a \\ \frac{1}{a}x, & -a \leq x \leq a \\ -1, & x < -a \end{cases} \quad (III.1)$$

qui peut être illustrée par la figure (III.4).

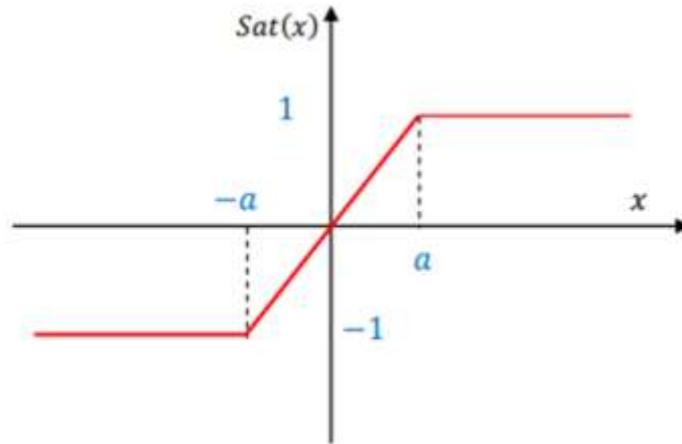


FIG.III.4 Fonction saturation.

D'autres fonctions plus lisses existent telles que la fonction sigmoïde et tangente hyperbolique. Ces fonctions réduisent le phénomène de chattering.

La fonction de sigmoïde est définie par l'équation suivante

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

qui peut être illustrée par la figure (III.5).

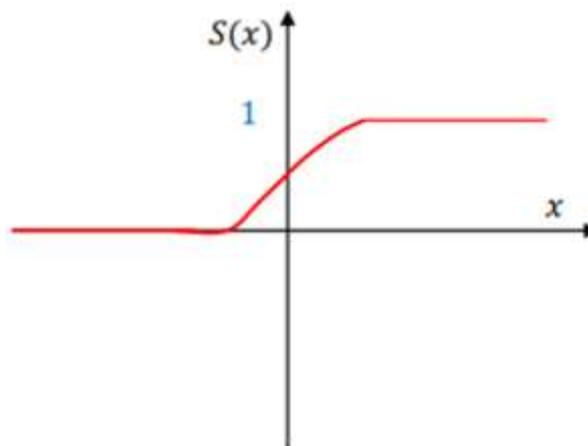


FIG.III.5 Fonction sigmoïde.

La fonction de tangente hyperbolique est définie par l'équation suivante

$$S(x) = \text{tanh}(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (\text{III.3})$$

qui peut être illustrée par la figure (III.6).

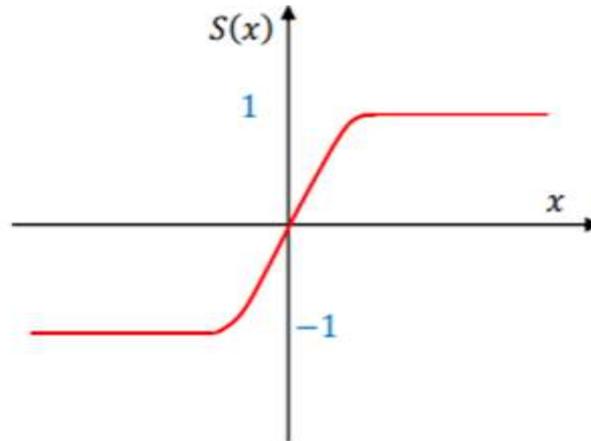


FIG.III.6 Fonction tangente hyperbolique.

### III.5. Commande VSC appliquée au système CE105 à réservoirs couplés

Comme nous l'avons exposé précédemment, le modèle qui explique le fonctionnement du système CE105 est suit :

$$\begin{cases} \dot{h}_1 = \frac{1}{A}(-S_n \cdot a_{12} \cdot \sqrt{2g(h_1 - h_2)} + K_Q \cdot u) \\ \dot{h}_2 = \frac{1}{A}(S_n \cdot a_{12} \cdot \sqrt{2g(h_1 - h_2)} - S_n \cdot a_0 \cdot \sqrt{2g \cdot h_2}) \end{cases} \quad (III.4)$$

Avec :

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

Le modèle d'état est défini pour ce système :  $[x_1, x_2]^T = [h_2, h_1]^T$  et  $y = k_h \cdot x_1$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{A}(S_n \cdot a_{12} \cdot \sqrt{2g(x_2 - x_1)} - S_n \cdot a_0 \cdot \sqrt{2g \cdot x_1}) \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{A}(-S_n \cdot a_{12} \cdot \sqrt{2g(x_2 - x_1)} + k_Q \cdot u) \end{cases} \quad (III.5)$$

Et:  
 $y = k_h \cdot x_1$

En choisissant :  $\beta_1 = \frac{S_n \cdot a_{12} \cdot \sqrt{2g}}{A}$  ;  $\beta_2 = \frac{S_n \cdot a_0 \cdot \sqrt{2g}}{A}$  ;  $k_u = \frac{k_Q}{A}$

Le modèle simplifié devient :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \beta_1 \cdot \sqrt{x_2 - x_1} - \beta_2 \cdot \sqrt{x_1} \\ \dot{x}_2 = -\beta_1 \cdot \sqrt{x_2 - x_1} + k_u \cdot u \\ \text{Et:} \\ y = k_h \cdot x_1 \end{cases} \quad (III.6)$$

Et :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2) \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + k_u \cdot u \\ \text{Et:} \\ y = k_h \cdot x_1 \end{cases} \quad (III.7)$$

Avec les notations suivantes :

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2) = \beta_1 \cdot \sqrt{x_2 - x_1} - \beta_2 \cdot \sqrt{x_1} \\ f_2(x_1, x_2) = -\beta_1 \cdot \sqrt{x_2 - x_1} \end{cases} \quad (III.8)$$

### Remarque 2 :

Le système CE105 est soit linéaire (orienté vers un point de fonctionnement) soit non linéaire (dans un large domaine de fonctionnement), et peut être utilisé avec ou sans couplage. Cela, selon les positions des valves (A, B)

Pendant notre recherche, 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".

### III.5.1 Synthèse de la loi de commande

L'objectif de cette étape est de synthétiser une loi de commande en utilisant la surface non linéaire recommandée dans la section précédente, et la sortie :  $y = k_h \cdot x_1$

Il est essentiel de respecter au mieux un signal de référence donné  $y_r(t)$  tout en veillant à ce que l'état  $x_2(t)$  soit limité (le niveau  $h_1$  ne doit pas dépasser l'intervalle admissible,  $h_1 < h_{max}$ ).

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

est définie pour ce système.

$$s = \dot{e} + \Lambda(e) \quad (III.9)$$

Avec  $e = k_h \cdot x_1 - y_r$  ou  $e = k_h \cdot h_2 - y_r$  c'est une tension (elle est proportionnelle au niveau désiré  $h_{r2} = \frac{y_r}{k_h}$ )

$\Lambda(\cdot)$ : est choisi comme une fonction du type sigmoïde, telle que :

$$\begin{cases} \Lambda(x) = \frac{2}{1 + e^{-ux}} - 1 \\ \frac{d\Lambda(x)}{dx} = \frac{u}{2} \cdot [1 - \Lambda(x)^2] \end{cases} \quad (III.10)$$

La dérivée temporelle de :  $s = \dot{e} + \Lambda(e)$  est :  $\dot{s}$  telle que

$$\dot{s} = \ddot{e} + \dot{e} \left. \frac{d\Lambda(x)}{dx} \right|_{x=e} \quad (III.11)$$

Avec :

$$\dot{e} = k_h \cdot f_1(x_1, x_2) - \dot{y}_r \quad (III.12)$$

$$\left. \frac{d\Lambda(x)}{dx} \right|_{x=e} = \frac{u}{2} \cdot [1 - \Lambda(e)^2]; \quad (III.13)$$

$$\ddot{e} = k_h \cdot \left[ \frac{\partial f_1(x_1, x_2)}{\partial x_1} \cdot \dot{x}_1 + \frac{\partial f_2(x_1, x_2)}{\partial x_2} \cdot \dot{x}_2 \right] - \ddot{y}_r \quad (III.14)$$

Ainsi, (III.11) devient :

$$\begin{aligned} & k_h \cdot \left[ \beta_1 \cdot \frac{(f_2(x_1, x_2) - f_1(x_1, x_2))}{2 \cdot \sqrt{x_2 - x_1}} - \beta_2 \cdot \frac{f_1(x_1, x_2)}{2 \cdot \sqrt{x_1}} \right] + \frac{k_h \cdot \beta_1 \cdot k_u}{2 \cdot \sqrt{x_2 - x_1}} \cdot u + \\ & (k_h \cdot f_1(x_1, x_2) - \dot{y}_r) \cdot \frac{u}{2} \cdot [1 - \Lambda(e)^2] - \ddot{y}_r \end{aligned} \quad (III.15)$$

Finalement, on peut mettre :

$$\dot{s} = B(X) + A(X) \cdot u + C(X) \quad (III.16)$$

On définit la fonction de Lyapunov comme :

$$\dot{V} = \frac{1}{2}S^2 \quad (III.17)$$

Sa dérivée est,  $\dot{V}$  telle que :

$$\dot{V} = s \cdot \dot{s} \quad (III.18)$$

De toute évidence, par un choix de :  $\dot{s} = -m_1 \cdot \text{sign}(s)$  avec,  $m_1 > 0$  on trouve :

$$\dot{V} = -m_1|s| < 0 \quad (III.19)$$

En prenant en considération les événements passés, il vous suffit de calculer  $u$  pour que :

$$B(X) + A(X) \cdot u + C(X) = -m_1 \cdot \text{sign}(s) \quad (III.20)$$

Ainsi :

$$u = -A^{-1}(X) \cdot [B(X) + C(X)] - A^{-1}(X) \cdot m_1 \cdot \text{sign}(s) \quad (III.21)$$

Un gain  $K$  positif est défini comme suit :

$$K = \max \left| \frac{m_1}{A(X)} \right| \quad (III.22)$$

Enfin, la commande est établie selon la formule suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} u = u_{eq} + u_{gliss} \\ avec \quad u_{eq} = -\frac{B(X) + C(X)}{A(X)} \quad Et: \quad u_{gliss} = -K \cdot \text{sign}(s) \end{array} \right. \quad (III.23)$$

$$B(X) = k_h \cdot \left[ \beta_1 \cdot \frac{(f_2(x_1, x_2) - f_1(x_1, x_2))}{2 \cdot \sqrt{x_2 - x_1}} - \beta_2 \cdot \frac{f_1(x_1, x_2)}{2 \cdot \sqrt{x_1}} \right]$$

$$A(X) = \frac{k_h \cdot \beta_1 \cdot k_u}{2 \cdot \sqrt{x_2 - x_1}}$$

$$C(X) = (k_h \cdot f_1(x_1, x_2) - \ddot{y}_r) \frac{u}{2} \cdot [1 - \Lambda(e)^2] - \ddot{y}_r \quad (III.24)$$

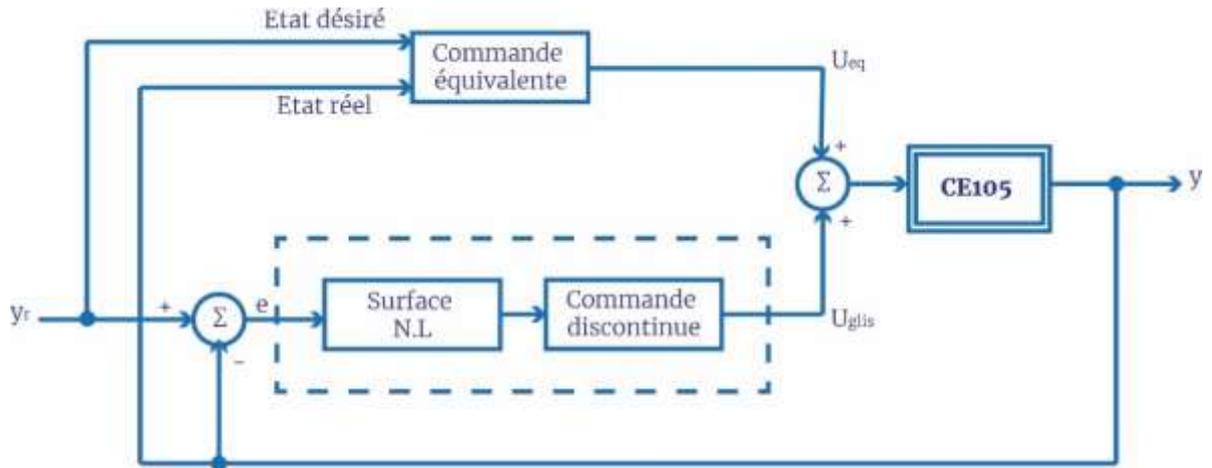


FIG.III.7 Schéma bloc de la commande VSC avec des surfaces non linéaires appliquée au système hydraulique CE105.

### III.5.2 Résultats de simulation

Les résultats de simulation sur l'application de la loi de commande par mode de glissement synthétisée précédemment sont présentés dans cette partie. Le modèle mathématique du système hydraulique CE105 à réservoirs couplés a été utilisé pour obtenir ces résultats (voir figure

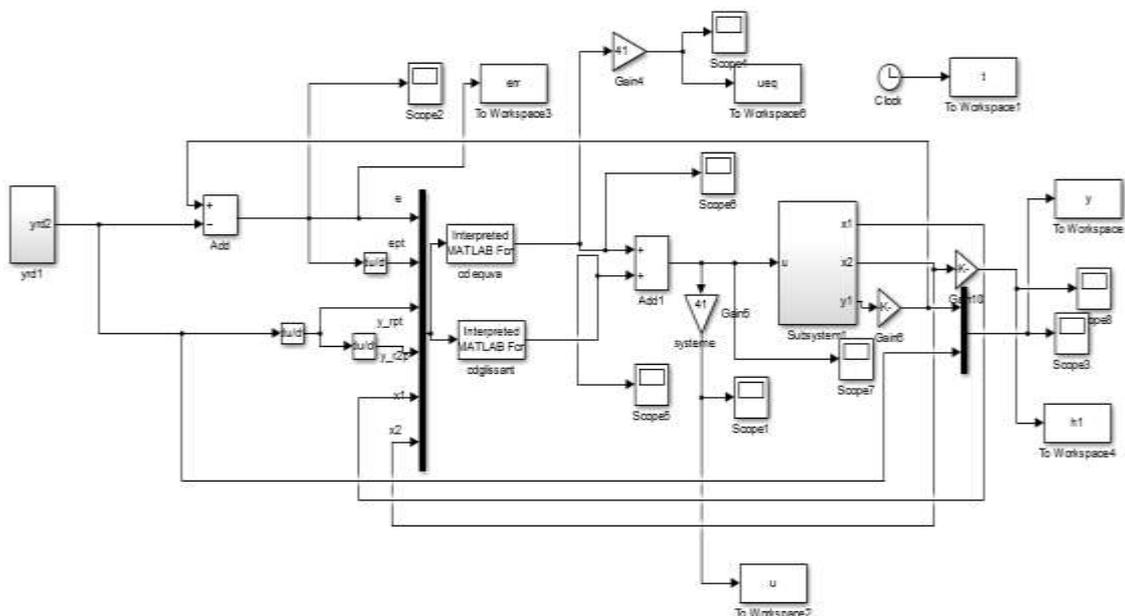


FIG.III.8 Schéma de Simulink de système CE105 avec la commande par mode glissant

les paramètres de simulation suivants : la section de chaque réservoir  $A = 9350.10^{-6}m^2$ ; la section de chaque valve  $S_n = 78.5.10^{-6}$  ; coefficient de décharge  $a_0 = 0.6$  ; coefficient de

décharge  $a_{12} = 1$  ; le gain de la pompe  $K_Q = 450 \text{ cm}^3/\text{min}/V$  ; le gain  $K_h = 41V/m$  ; la période d'échantillonnage  $T = 0.2 \text{ sec}$  et le temps de simulation  $T_{\text{max}} = 2000 \text{ sec}$  ; la constante de gravité  $g = 9.81 \text{ m/sec}$ , un gain de commutation  $K = 8$ , et le paramètre de la surface de glissement 0.5.

➤ **Résultats sans perturbation :**

Les résultats de simulation de mode glissant sont représentés par la Figure (III.9).

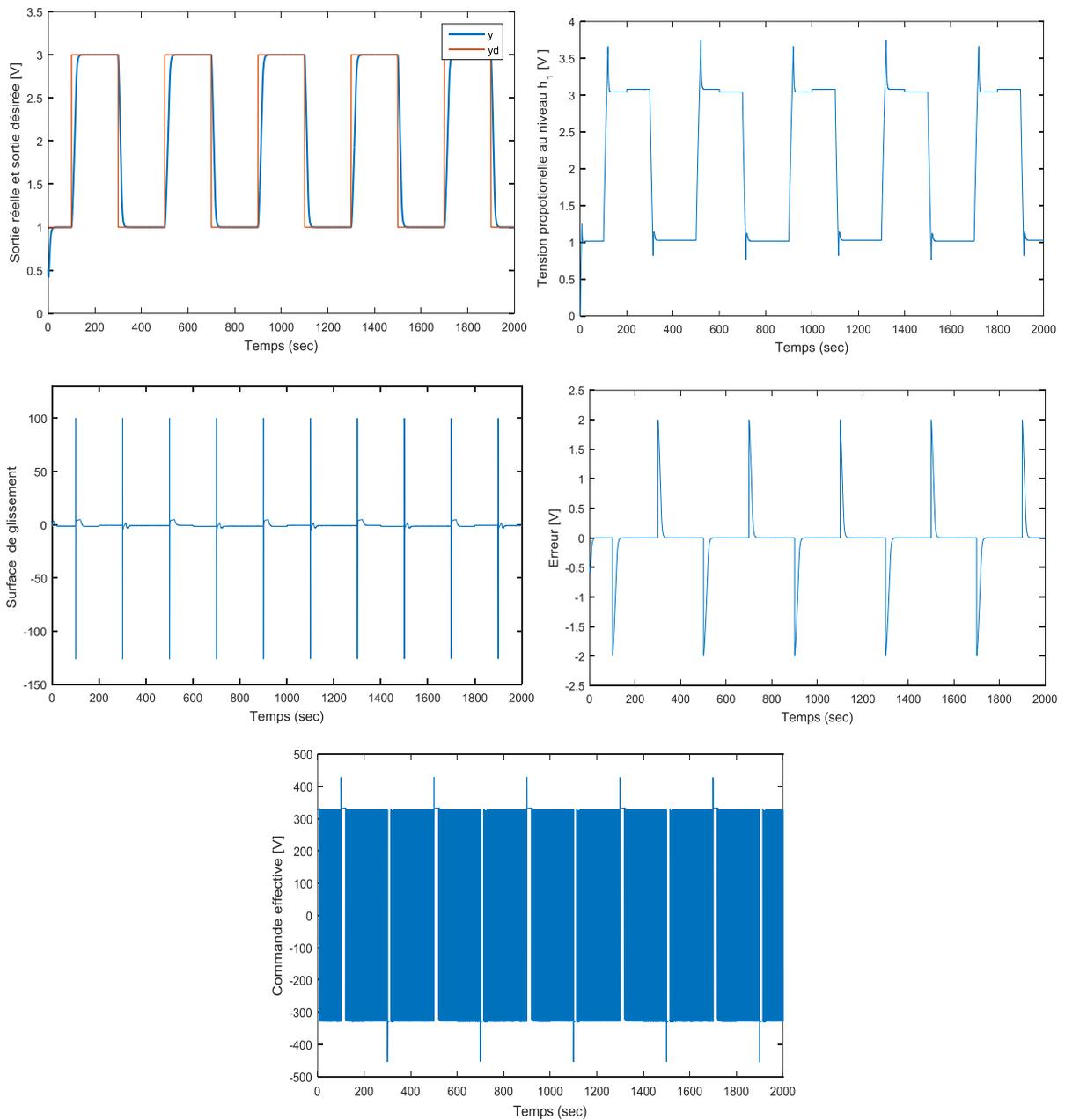


FIG.III.9 Résultat de simulation en mode glissant sans perturbation appliquée au système CE105.

➤ **Résultats avec perturbation :**

Dans cette partie, une perturbation sur la valeur de  $a_0$  est appliquée sur le système. Les résultats de simulation pour ce cas sont représentés par la Figures (III.11).

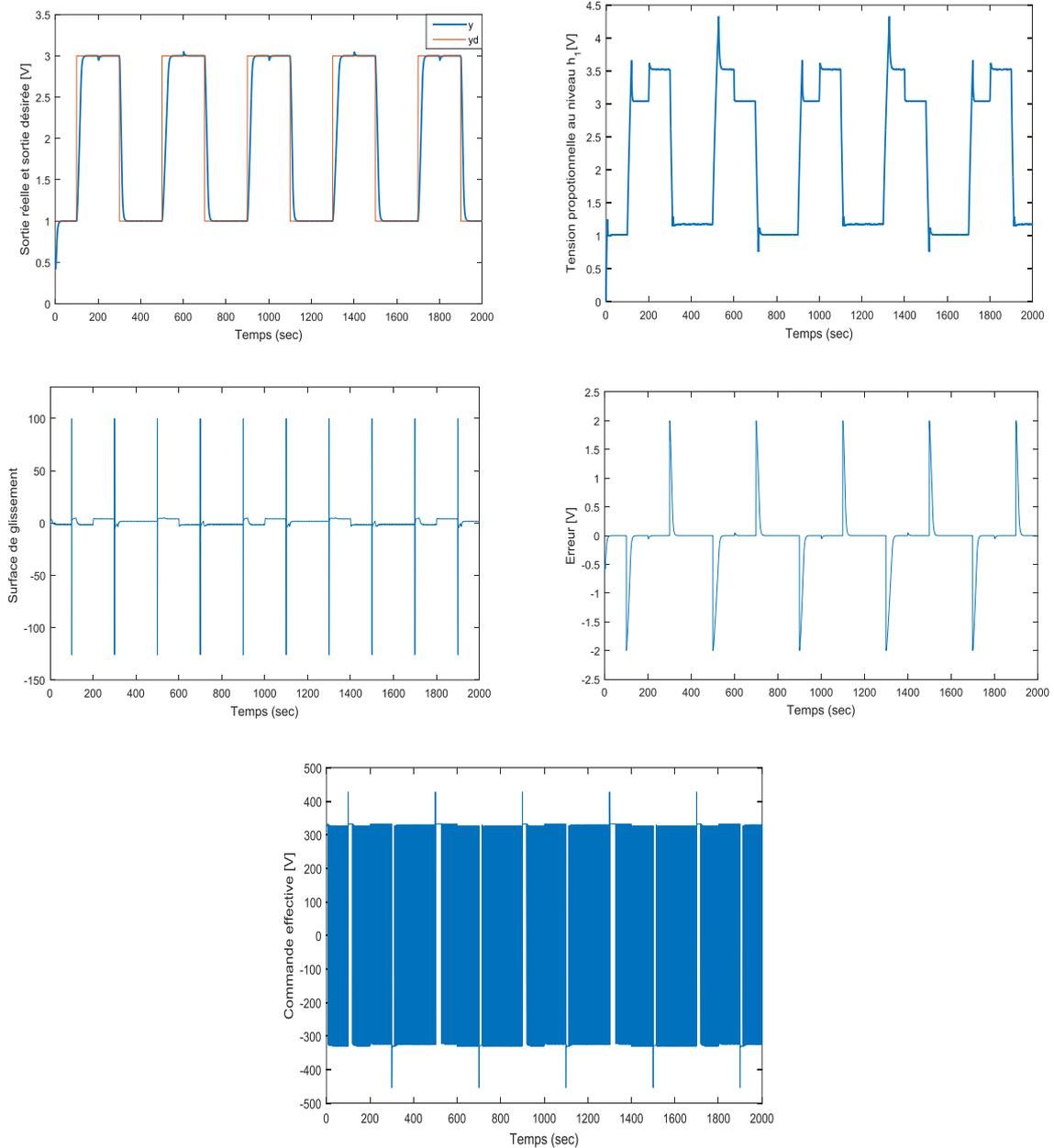


FIG.III.10 Résultat de simulation en mode glissant avec perturbation appliquée au système CE105.

**III.5.3 Commentaires sur les résultats**

Les simulations et les résultats de l'application de la commande en mode glissant sans la

présence de perturbations sont illustrés dans les Figures (III.8) et (III.9). Il est évident que nous avons obtenu des résultats satisfaisants en ce qui concerne la poursuite, avec un dépassement maximal autorisé et un temps de réponse adapté à la nature des systèmes hydrauliques.

On a observé des pics au niveau de la surface de glissement et de l'erreur de poursuite, ce qui est dû à une modification soudaine de la consigne.

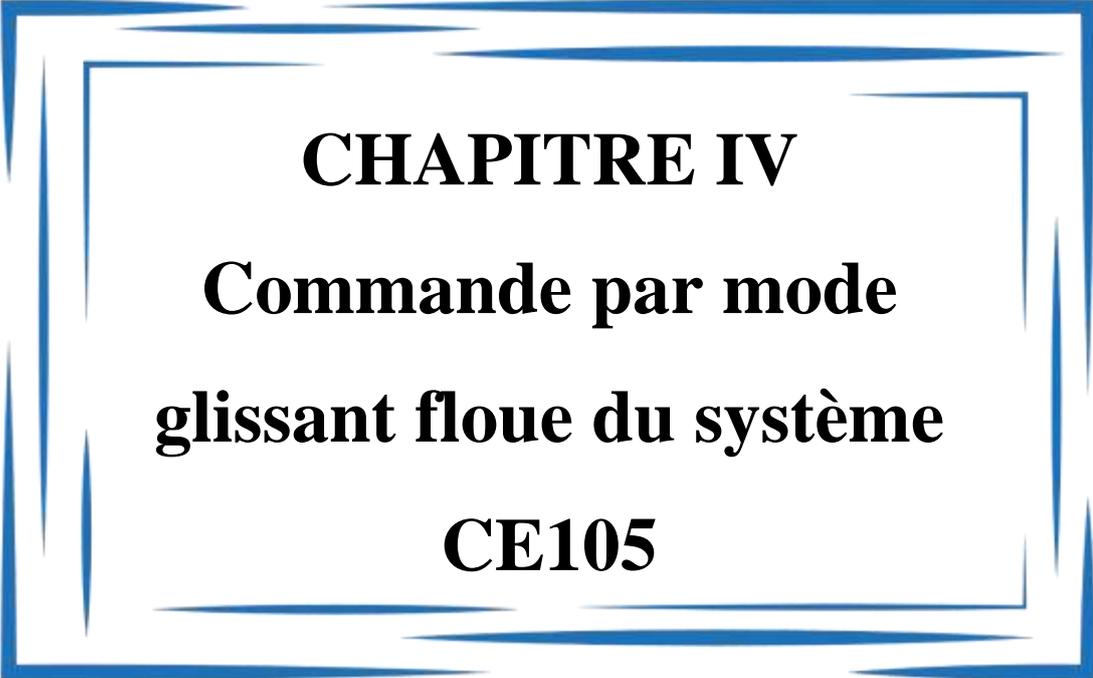
Les résultats de l'application de la commande en mode glissant en présence de perturbations sont illustrés dans les Figures (III.10) et (III.11). En effet, cette loi de commande en mode glissant avec une surface de glissement non linéaire permet de réduire relativement l'effet des perturbations, notamment les pics induits par les changements de paramètres du système, cette commande est déterminée en utilisant un modèle simplifié du système hydraulique, en ignorant les dynamiques (telles que celle de la pompe) et les variables.

### **III.6. Conclusion**

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

La principale caractéristique de la commande par mode glissant réside dans le fait que sa loi de commande est composée de deux éléments : la commande équivalente, qui dirige la trajectoire du système vers la surface de glissement, et la commande discontinue, qui dirige la trajectoire vers l'état souhaité lorsque la trajectoire du système atteint cette surface

Dans le mode glissant, la discontinuité provoque des oscillations à haute fréquence (phénomène de chattering). Les organes mécaniques et les systèmes électriques peuvent être endommagés par ce phénomène. Il est possible de diminuer ou d'éliminer ce phénomène de Chattering en ajustant la partie discontinue de la commande en utilisant une fonction plus appropriée qui filtre les fréquences élevées.



**CHAPITRE IV**  
**Commande par mode**  
**glissant floue du système**  
**CE105**

*« Généralement, les gens qui savent peu parlent beaucoup, et les gens qui savent beaucoup parlent peu »*

*Jean-Jacques Rousseau*

## **CHAPITRE IV : Commande par mode glissant floue du système CE105**

### **IV.1. Introduction**

L'intelligence artificielle a eu un impact limité, jusqu'à une date récente, sur les applications industrielles, parce qu'elle a mis l'accent, de façon exclusive, sur le traitement symbolique de la connaissance, par opposition à la modélisation numérique utilisée traditionnellement dans les sciences de l'ingénieur. Néanmoins, la logique floue permet de faire le lien entre modélisation numérique et modélisation symbolique, ce qui a permis des développements industriels à partir d'algorithmes très simples de traduction de connaissances symboliques en entité numérique et inversement. Plus récemment, on a assisté à un retour du numérique dans ces problèmes d'intelligence artificielle, avec la logique floue. Cette dernière est plus conforme à l'intelligence artificielle symbolique, qui met en avant la notion de raisonnement, et où les connaissances sont codées explicitement. [16] [17]

Dans ce chapitre, nous mettons l'accent sur l'application de la logique floue dans le domaine de la commande des systèmes non linéaires, spécialement pour un système quadrirotor. Dans ce contexte, un système flou joue le rôle de commande discontinue, dont le but est de réduire le broutement (chattering).

### **IV.2. Généralité sur le système flou**

La logique floue constitue une variante de la logique traditionnelle qui offre des valeurs de vérité intermédiaires entre vrai et faux, ce qui facilite le traitement des données incertaines.

La logique floue diffère de la logique classique parce qu'elle permet des définitions partielles ou "floues" des règles de contrôle.

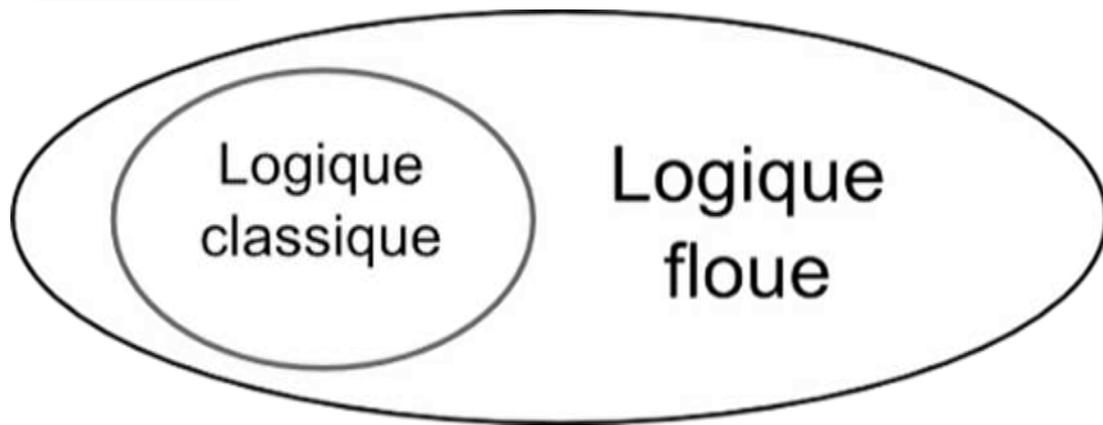


FIG.IV.1 Introduction au logique floue.

La logique floue est une description mathématique d'un processus basée sur la théorie des ensembles flous. Cette théorie introduite en 1965 par le professeur Lotfi Zadeh. A cette époque la théorie de la logique floue n'a pas été prise au sérieux. En effet, les ordinateurs, avec leur fonctionnement exact par tout ou rien (1 ou 0) (voir Figure IV.1), on commence à se répandre sur une grande échèle. Par contre, la logique floue permettait de traiter des variables non exactes dont la valeur peut varier entre 1 et 0. Initialement. Son but est, comme en automatique classique, de traiter des problèmes de commande de processus c'est-à-dire de gérer un processus en fonction d'une consigne donnée, par action sur les variables qui décrivent le processus, mais son approche est différente de celle de l'automatique classique. Elle se sert le plus souvent des connaissances des experts ou d'opérateurs qualifiés travaillant sur le processus. [18]

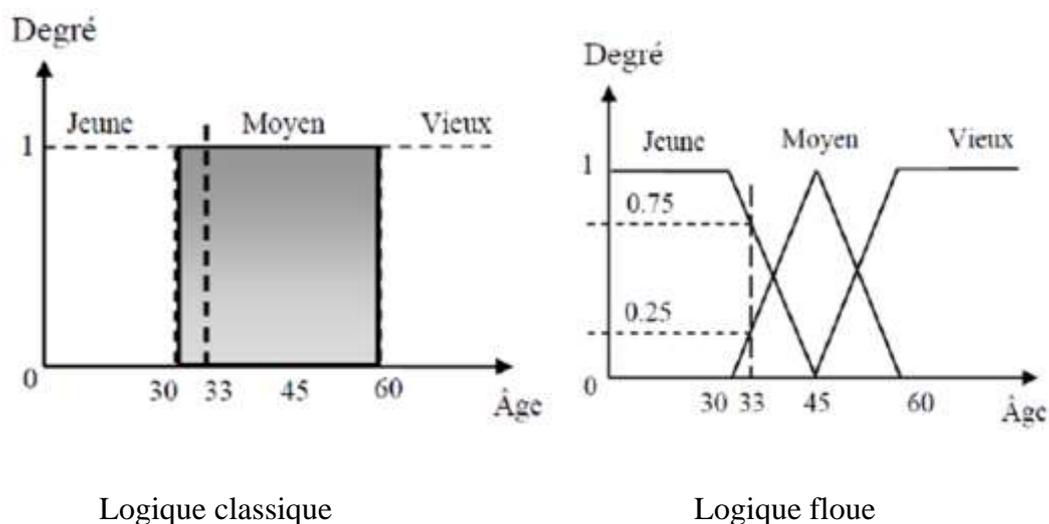


FIG.IV.2 Logique classique et logique flou.

### IV.3. Historique de la logique floue

#### Apparition de la logique floue :

Le terme d'ensemble flou apparaît pour la première fois en 1965 lorsque le professeur Lotfi Zadeh, de l'université de Berkeley aux USA, publie un article intitulé « Ensembles flous » (Fuzzy sets). Il a réalisé depuis de nombreuses avancées théoriques majeures dans le domaine et a été rapidement accompagné par de nombreux chercheurs développant des travaux théoriques.

#### Premières applications :

Parallèlement, certains chercheurs se sont penchés sur la résolution par logique floue de problèmes réputés difficiles. Ainsi en 1975, le professeur Mamdani à Londres développe une stratégie pour le contrôle des procédés et présente les résultats très encourageants qu'il a obtenus sur la conduite d'un moteur à vapeur. En 1978, la société danoise F.L.Smidth réalise le contrôle d'un four à ciment. C'est là la première véritable application industrielle de la logique floue

#### Développement :

C'est au Japon où la recherche n'est pas seulement théorique mais également très applicative, que la logique floue connaît son véritable essor. Dans l'industrie, le traitement des eaux, les grues portuaires, les métros, les systèmes de ventilation et de climatisation sont touchés. Enfin, des applications existent dans des domaines très différents tels que la finance ou le diagnostic médical. A partir de 1990, c'est en Allemagne que des applications apparaissent en grand nombre ainsi qu'à une moindre échelle aux USA. Aujourd'hui, une vaste gamme de nouveaux produits ont une étiquette « produit floue (Fuzzy) ». [19]

### IV.4. Logique floue

#### IV.4.1 Définitions de la logique floue

La logique floue (*fuzzy logic*, en anglais) est une logique polyvalente où les valeurs de vérité des variables — au lieu d'être *vrai* ou *faux* — sont des réels entre 0 et 1. En ce sens, elle étend la logique booléenne classique avec des valeurs de vérité partielles, c'est-à-dire situées entre les valeurs booléennes vrai et faux. Elle consiste à tenir compte de divers facteurs numériques pour

aboutir à une conclusion qu'on souhaite raisonnable. [20]

- La logique floue est une extension de la logique classique qui permet la modélisation des imperfections des données et se rapproche dans une certaine mesure de la flexibilité du raisonnement humain.

- La logique floue est une branche des mathématiques qui permet à un ordinateur de modéliser le monde réel de la même façon que les personnes. Elle est préoccupée par la quantification et le raisonnement en utilisant un langage qui permet des définitions ambiguës comme, beaucoup, peu, petit, haut, dangereux, etc. Elle s'occupe de situations où la question qui est posée et la réponse obtenue contiennent des concepts vagues. [17]

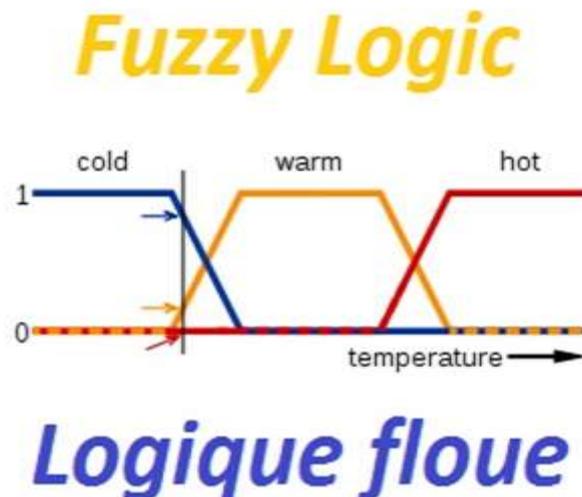


FIG.IV.3 Logique floue.

#### IV.4.2 Pourquoi utiliser la logique floue ?

Il convient d'utiliser la logique floue lorsque des imperfections entachent la connaissance dont nous disposons sur le système, lorsqu'une modélisation rigoureuse de celui-ci est difficile, lorsqu'il est très complexe, lorsque notre façon naturelle de l'aborder passe par une vue globale de certains de ses aspects.

Si elle impose une standardisation de la signification des descriptions du système exprimées linguistiquement, ce qui peut sembler rédacteur par rapport à une utilisation purement symbolique des descriptions linguistiques, la logique floue présente l'avantage de permettre le

passage d'une telle description d'un expert ou d'un observateur à l'autre. [19]

### **IV.5. Théorie et principe de 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. [21]

#### **Variables floues :**

À la différence des variables classiques (booléennes) qui ne peuvent prendre que des valeurs concrètes (0 ou 1, vrai ou faux), les variables floues peuvent prendre une plage de valeurs allant de 0 à 1, ce qui correspond au degré de vérité ou d'appartenance.

#### **Ensembles flous :**

Une fonction d'appartenance d'un ensemble flou donne à chaque élément un degré d'appartenance allant de 0 à 1. Un ensemble flou, par exemple, pourrait être le symbole du « grand », où chaque individu a un degré d'appartenance à cet ensemble en fonction de sa taille.

#### **Opérations floues :**

Les opérations logiques classiques (ET, OU, NON) sont étendues aux ensembles flous. Par exemple, l'opération ET (intersection) entre deux ensembles flous peut être définie comme le minimum des degrés d'appartenance, et l'opération OU (union) comme le maximum des degrés d'appartenance.

#### **Règles floues :**

Pour représenter des relations complexes, les systèmes de logique floue utilisent des règles

floues telles que "si... alors...". Par exemple, il est possible d'avoir une règle ambiguë selon laquelle "si la température est élevée et l'humidité est faible, alors la probabilité de feu est grande".

#### **IV.5.1 Structure d'un système flou**

Les quatre composants de base d'un système flou sont : la fuzzification, le mécanisme d'inférence floue, la base de règles et la défuzzification (Figure IV.4).

**Fuzzification** : la fuzzification consiste une opération de transformation de la grandeur physique réelle d'entrée en une grandeur floue à l'aide des ensembles flous. La fuzzification permet de donner le degré avec lequel une grandeur physique appartient à un ensemble flou en utilisant des fonctions d'appartenance.

**Mécanisme d'inférence floue** : L'inférence floue permet de transformer, à l'aide des techniques de raisonnement flou (base de règles) la partie floue issue de la fuzzification en une nouvelle partie floue.

**Base de règles** : la base de règles floues considère l'architecture générale du système. C'est-à-dire, elle contient les règles floues décrivant le comportement du système, où ces règles prennent la forme suivante : Si permisse Alors conclusion.

**Défuzzification** : le rôle de la défuzzification est de transformer la grandeur floue issue de la partie d'inférence en grandeur physique.

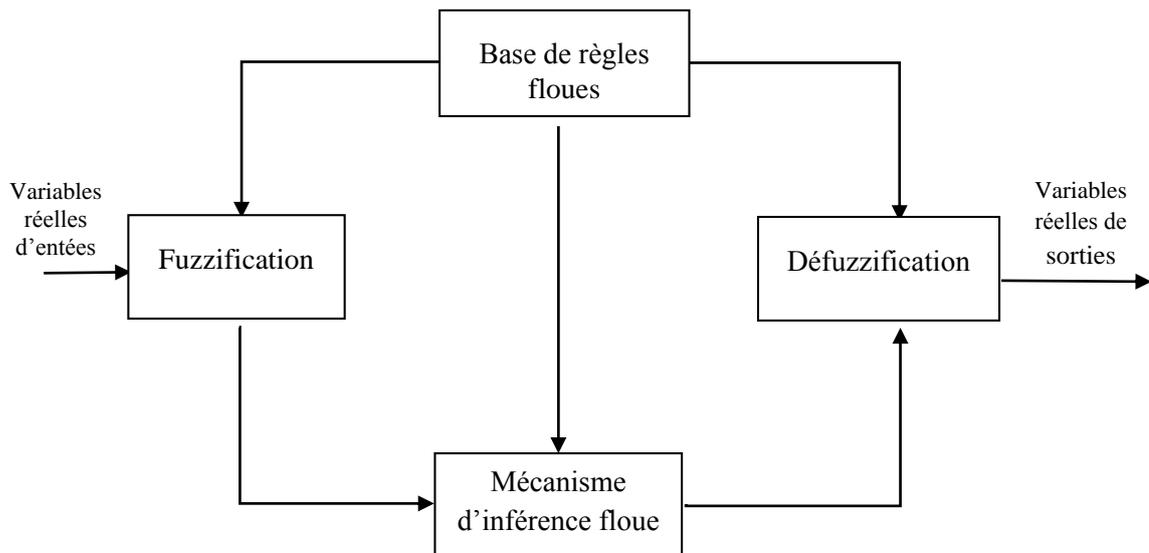


FIG.IV.4 Schéma synoptique général d'un système flou.

### IV.5.2 Utilisation la logique floue dans la commande

L'approche des problèmes par la logique floue est différente de celle adoptée, a priori, dans une démarche scientifique, elle est beaucoup plus pragmatique que déterministe. La décision en logique floue est basée sur la notion d'expertise, qui permet de quantifier le flou à partir de connaissances acquises antérieurement. Il n'est pas nécessaire d'avoir un modèle entrées/sorties d'une voiture pour pouvoir la conduire de manière satisfaisante. La commande floue a pour but de traiter des problèmes de commande de processus à partir uniquement de connaissances de comportement que les spécialistes du procédé doivent formuler sous forme linguistique (floue). En commande floue, la connaissance des diverses fonctions de transferts n'est pas nécessaire. [22]

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. [21]

## **IV.6. Domaines d'application**

La logique floue est intéressante dans tous les domaines d'applications :

### **Automatisme :**

Les automatismes ont constitué le domaine d'application par excellence de la logique floue car c'est là où existe le grand nombre d'applications. On peut classer ses applications par domaines d'utilisation.

- Automatismes industriels
- Automatismes d'entreprise et de transport
- Automatismes dans les appareils grand public

### **Informatique :**

De nombreuses disciplines informatiques utilisent également la logique floue.

- Intelligence artificielle et systèmes experts
- Programmation et développement

### **Mathématiques appliquées :**

- Statistiques
- Recherche opérationnelle
- Reconnaissance des formes [22]

## **IV.7. Développement d'une commande Floue-glissante**

Pour remédier aux problèmes de la commande par modes glissants, notamment le phénomène de réticence, nous utilisons dans cette section un système flou pour remplacer la fonction « sign ». Ce remplacement s'appuie sur des règles logiques de contrôle flou définies ci-après.

Comme nous l'avons montré déjà dans le chapitre précédent, le terme de correction dans une commande à structure variable est donné par :

$$u = -K \cdot \text{sign}(s) \quad (IV.1)$$

Théoriquement, il faut noter que le mode glissant est idéal. Dû au retard de commutation, il est rare, dans le cas d'un système réel, que ce modèle idéal se produit, en particulier à cause de broutement autour de la surface de glissement. Cette situation est corrigée par un lissage de la commande discontinue à l'intérieur d'une bande limite (autour de la surface de glissement). Donc en introduisant une bande limite,  $\Phi$  la loi de contrôle VSC est modifiée comme : [23]

$$u = \begin{cases} K \\ -K \cdot \frac{s}{\Phi} \\ -K \end{cases} \begin{cases} s > \Phi \\ -\Phi \leq s \leq \Phi \\ s < -\Phi \end{cases} \quad (IV.2)$$

Dans cette section, nous présentons un contrôleur flou (système d'inférence floue) qui est équivalent au contrôleur VSC modifié.

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

$$\check{s} \text{ est zero} \quad (IV.3)$$

Avec  $\check{s}$  la variable linguistique de  $s$ , et "zéro" est l'un de ses ensembles flous. Dans le but de fuzzifier l'espace autour de la surface de glissements, on définit cinq sous-ensembles flous (Figure IV.5), tels que :

$$T(\check{s}) = \{NG, NM, EZ, PM, PG\} = \{f_s^1, \dots, f_s^5\} \quad (IV.4)$$

Avec les prédicats suivants : NG : négatif grand ; NM : négatif moyen ; EZ : environ zéro ; PM : positif moyen ; PG : positif grand. quant à la commande  $u$ , nous définissons aussi cinq sous-ensembles flous tels que :

$$T(\check{v}) = \{PG, PM, EZ, NM, NG\} = \{f_v^1, \dots, f_v^5\} \quad (IV.5)$$

Les fonctions d'appartenance des deux variables  $s$  et  $u$ , sont illustrées par la Figure (IV.6). On définit des fonctions d'appartenance de forme triangulaires pour la surface de glissement  $s$  et des singletons pour la commande  $u$ .

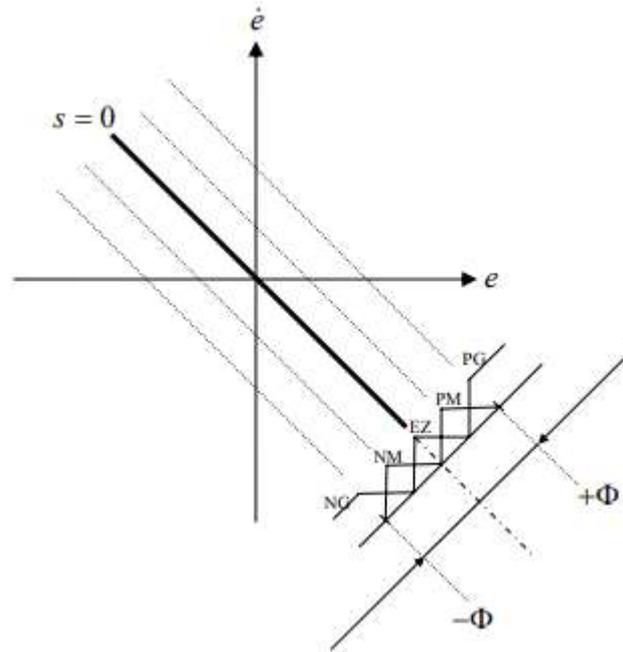


FIG.IV.5 Partition floue de l'espace autour de la surface de glissement.

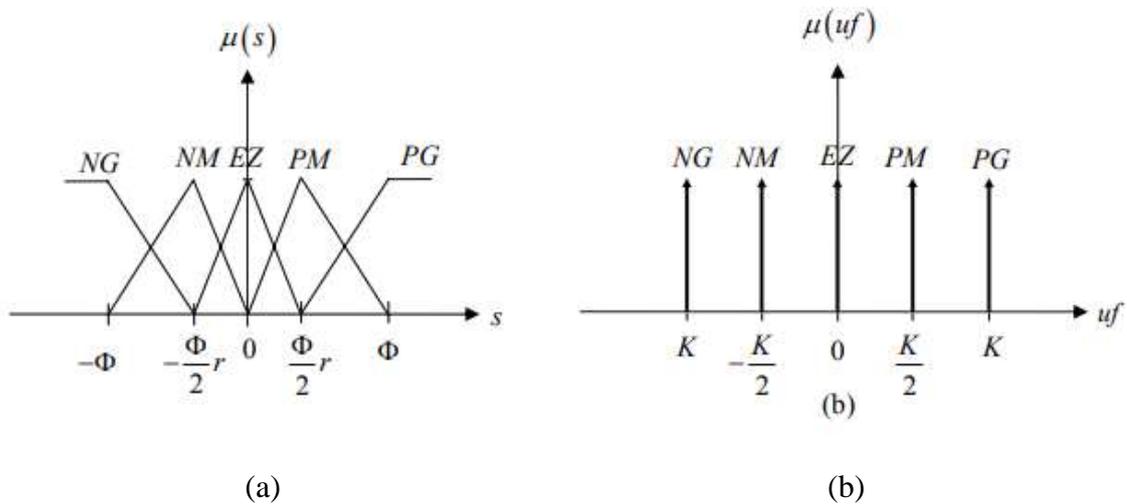


FIG.IV.6 Fonctions d'appartenance de l'entrée  $s$  et de sortie  $uf$ .

Dans la Figure (IV.6.a), le paramètre,  $r \in [0,1]$  est utilisé pour ajuster les points modaux du sous ensemble EZ (la précision de la commande réside dans l'expression,  $\xi$  est zéro).

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

$R^1$  :SI  $s$  est  $NG$  Alors  $uf$  est  $PG$

$R^2$  :SI  $s$  est  $NM$  Alors  $uf$  est  $PM$

$R^3$  :SI  $s$  est  $EZ$  Alors  $uf$  est  $EZ$

$R^4$  :SI s est PM Alors uf est NM

$R^5$  :SI s est PG Alors uf est NG

### IV.7.1 Commande floue glissant appliquée au système CE105

Dans cette partie, l'objectif est d'appliquer la commande floue sur le système hydraulique CE105 à réservoirs couplés. Dans le but de résoudre le problème du broutement, une version de la commande floue glissante est présentée (FIG.IV.7).

Dans cette partie, la commande appliquée au système CE105 est donnée par :

$$u = u_{eq} + u_{gliss-Floue}$$

Avec la commande  $u_{gliss-Floue}$  est calculée par un système d'inférence flou, sa description est déjà donnée et,  $u_{eq}$  la commande équivalente (III.23)

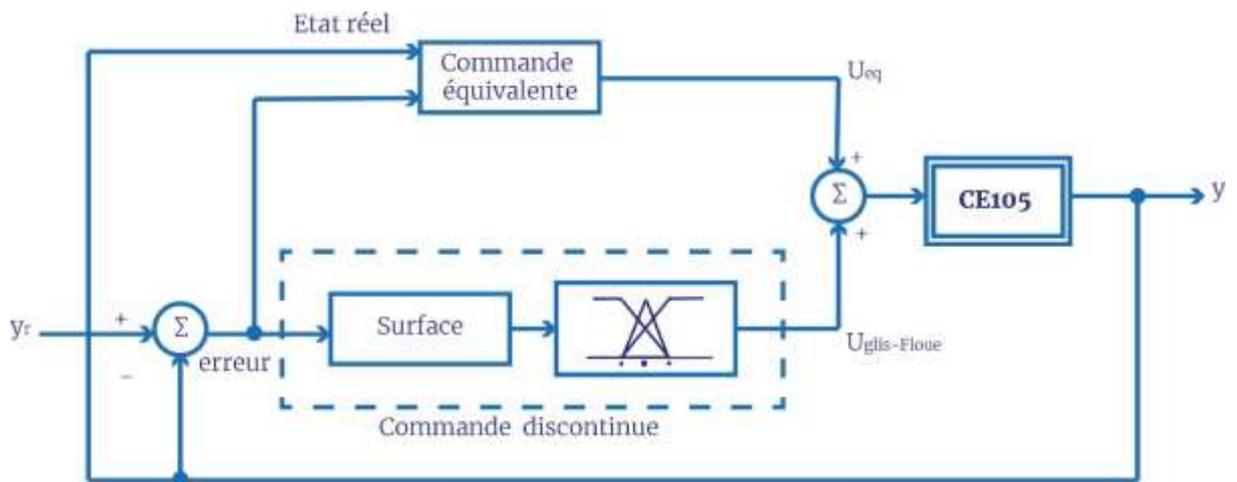


FIG.IV.7 Schéma bloc de la commande Floue-glissante appliquée au système CE105.

Ces résultats sont relevés pour un gain de commutation  $K=10$  et un paramètre d'ajustement,  $r=0.7$  avec la largeur de la bande  $\Phi = 0.01$ , le paramètre de la surface de glissement  $\mu 0.5$

### IV.7.2 Résultats de simulation

Cette section présente les résultats de la simulation sur l'application de la loi de commande par mode de glissement synthétisée précédemment. Ces résultats ont été obtenues en utilisant le modèle mathématique du système hydraulique CE105 avec des réservoirs couplés en utilisant les paramètres de simulation ci-dessous :

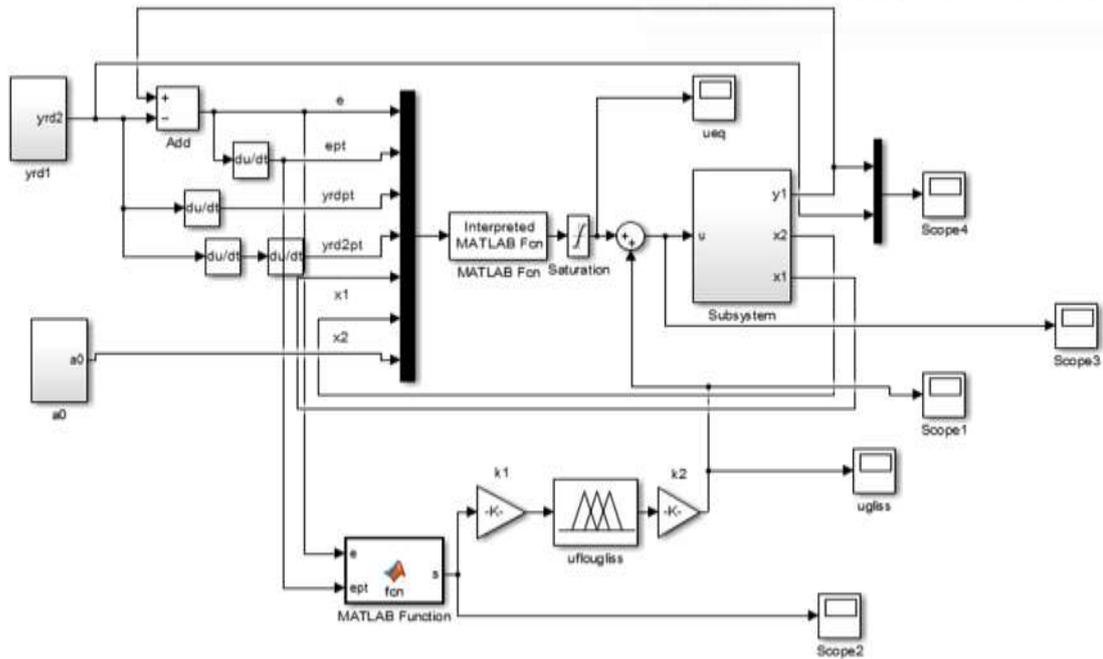
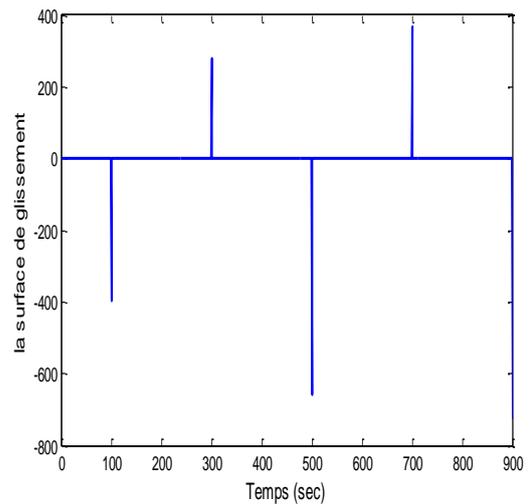
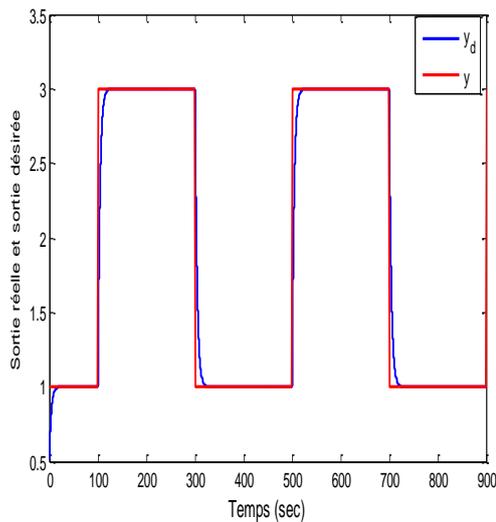


FIG.IV.8 Schéma Simulink de logique flow.

$A = 9350 \cdot 10^{-6} m^2$  ; la section de chaque valve  $S_n = 78.5 \cdot 10^{-6}$  ; coefficient de décharge  $a_0 = 0.6$  ; coefficient de décharge  $a_{12} = 1$  ; le gain de la pompe  $K_Q = 450 \text{ cm}^3 / \text{min} / V$  ; le gain  $K_h = 41 V / m$  ; la période d'échantillonnage  $T = 0.2 \text{ sec}$  et le temps de simulation  $T_{\text{max}} = 900 \text{ sec}$  ; la constante de gravité  $g = 9.81 \text{ m} / \text{sec}$ , un gain de commutation  $K = 8$ , et le paramètre de la surface de glissement 0.5.



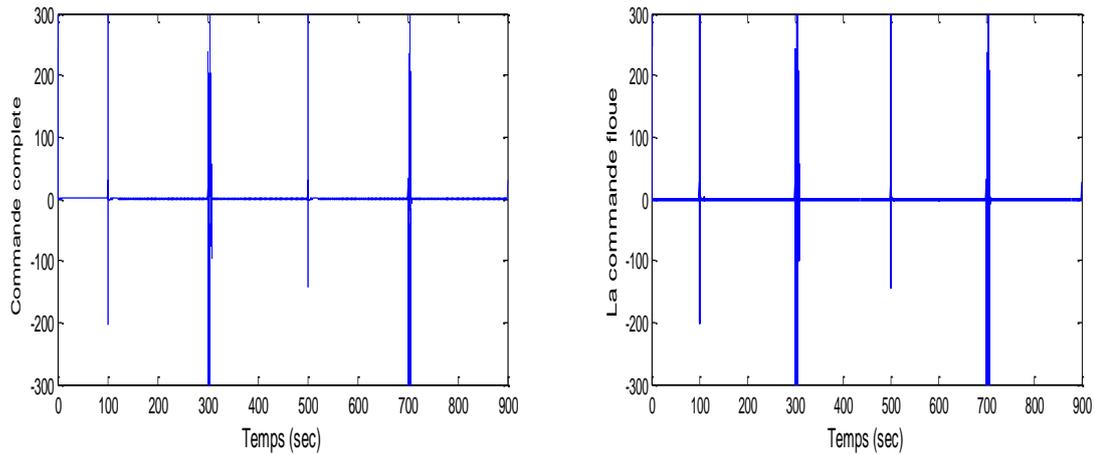


FIG.IV.9 Résultats de simulation de la commande logique floue appliquée au système CE105.

### IV.7.3 Commentaire sur le résultat

En ce qui concerne le système hydraulique CE105, nous avons d'abord utilisé une commande glissante, les résultats de l'application de la commande floue sont illustrés dans la Figure (IV.9). Comme illustré par ces graphiques, les résultats en régime transitoire sont satisfaisants. Par exemple, la réponse prend environ 10 secondes en moyenne.

Ce résultat est attendu, car la dynamique des systèmes hydrauliques est généralement très lente. De plus, le remplacement du terme glissant par le terme flou permet de réduire les oscillations induites par le phénomène de broutement, sans compromettre la précision des réponses du système. De plus, la commande synthétisée présente une grande résistance face aux erreurs de modélisation et aux fluctuations paramétriques.

### IV.8. Conclusion

Nous avons examiné dans ce chapitre la façon de synthétiser une loi de commande par mode glissant-floue en utilisant la classe des surfaces de glissement non linéaires.

Cette étude nous a permis d'aboutir aux points suivants :

Les systèmes flous sont très riches, vu la possibilité de pouvoir décider sur plusieurs paramètres à savoir les fonctions d'appartenance.

L'avantage de la LF proche du langage humain et permet de capter le savoir-faire humain.

## CONCLUSION GENERALE

Ce travail a porté sur la commande d'un système hydraulique non linéaire à réservoirs couplés CE105, en utilisant des techniques de commande avancées telles que le mode glissant et la logique floue. L'objectif était d'utiliser des lois de commande robustes qui assurent de bonnes performances de régulation du niveau d'eau dans les réservoirs malgré les incertitudes et perturbations.

Dans le **premier chapitre**, nous avons introduit les concepts fondamentaux des systèmes hydrauliques. Ce chapitre a fourni une base théorique essentielle pour comprendre les défis associés aux systèmes hydrauliques. Une modélisation mathématique détaillée du système CE105 a été établie, mettant en évidence sa nature non linéaire.

Le **deuxième chapitre** a été consacré à l'étude détaillée du contrôleur PID, qui est une méthode de commande classique largement utilisée. Nous avons ensuite discuté de ses avantages et de ses limitations, puis nous avons appliqué cette commande à notre modèle de système CE105 pour un signal de référence constant et variable.

Le **troisième chapitre** a présenté la commande par mode glissant, une technique robuste qui permet de surmonter les limitations des contrôleurs PID en offrant une meilleure résistance aux perturbations et aux incertitudes. Nous avons détaillé la théorie derrière cette méthode et expliqué son application spécifique au système hydraulique CE105.

Enfin, le **quatrième chapitre** a introduit la logique floue et son intégration avec la commande par mode glissant pour former un contrôleur mode glissant-flou. Cette approche hybride combine les avantages de la robustesse du mode glissant et de la flexibilité de la logique floue pour améliorer la performance globale du système.

La simulation réalisée a démontré l'efficacité de cette méthode hybride dans la commande du système hydraulique CE105. Les résultats montrent une amélioration significative de la précision et de la stabilité du système par rapport aux méthodes de commande traditionnelles.

*« La science n'a pas de patrie »*

*Louis Pasteur*

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Q. L. & A.-h. MAHIR, École Polytechnique universitaire, Lille, 2012/2013.
- [2] «Système, groupe hydraulique - glossaire hydraulique industrielle».
- [3] [En ligne]. Available: <https://www.lechodemaskinonge.com/>.
- [4] «Systèmes Hydrauliques - Auto Care Association».
- [5] B. Noureddine, ««Commandes prédictives appliquées au robot PUMA et au palier magnétique actif»,» Ecole Nationale Polytechnique, 15 Décembre 2007.
- [6] B. Ahcene, «"Méthodes de commande par mode de glissement appliquées au bras",» École Militaire Polytechnique, 2007.
- [7] [En ligne]. Available: [www.abcclim.net](http://www.abcclim.net) was indexed by Google more than 10 years ago.
- [8] «Wikipedia», [En ligne]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9gulateur\\_PID](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9gulateur_PID).
- [9] N.CHERRAT, ««Contribution à la commande PID floue adaptative des systèmes non linéaires »,» l'université de JIJEL, 2019.
- [10] P. Prouvost, «"Automatique-Contrôle et régulation 2/e : Cours, exercices et problèmes corrigés",» Dunod, 2010.
- [11] [En ligne]. Available: <https://fr.linkedin.com/advice/1/what-advantages-disadvantages-pid-controllers?lang=fr>.
- [12] O. Katsuhito, «"Dinamica de sistemas",» Mexico, 1987.
- [13] Y. H. F. BELALA, «« La commande par mode glissant basée sur la technique de réseau de neurones»,» l'Université de Tebessa, 2022.
- [14] T.Amieur, ««la commande par mode glissant»,» l'Université de Biskra, 2009.
- [15] A. S. A. E. Mahdi, «" Commande en vitesse par mode glissant d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation ",» Université Djillali Liabes, SIDI-BEL-ABBES,, 2010.
- [16] «[https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/benbrahim\\_meriem/files/chapitre\\_3\\_221f.pdf](https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/benbrahim_meriem/files/chapitre_3_221f.pdf)».
- [17] M.benbrahim, ««logique-floue» maths et informatique»,» 2022.
- [18] F. e. F.Guely, «"cahier technique n=° 191 : la logique flou"».
- [19] S. O.LAHMAR, «"Etude comparative entre la commande par logique floue et régulateur PI d'un MCC",» l'Université de Annaba, 2009.
- [20] [En ligne]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Logique\\_floue](https://fr.wikipedia.org/wiki/Logique_floue).
- [21] A.Khermiche, ««Commande non linéaires d'un système hydraulique CE105 à réservoirs couplés»,» l'Université de M'SILA, 2014.

- [22] M. MOUSSAOUI, ««CONTROLEUR FLOU TESTABLE »,» l'Université de Sétif, 2009.
- [23] J. Slotine, «“The robust control of robot manipulators ,Res. Vol 4, 10.2, pp 49-64",» 1985..
- [24] S. Labiod, «Contribution à la commande adaptative floue des systèmes non linéaires,» Thèse de doctorat ENP, Alger, 2004.
- [25] A. Boulkroune, «Commande floue adaptative avec et sans observateur des systemes non lineaires incertains,» thèse de doctorat ENP, Alger, 2009.