

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

N° :.....



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : AUTOMATIQUE

OPTION : AUTOMATIQUE ET SYSTEME

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par : - MOKHTARI Mouna

- BAGHDADI Zahra

Intitulé

**Commande Non Linéaire D'un Système
Hydraulique à Réservoirs Couplés (CE105)**

Soutenu devant le jury composé de:

BENYETTOU Loutfi

Université Mohamed Boudiaf de M'Sila

Président

LOUKAL Keltoum

Université Mohamed Boudiaf de M'Sila

Rapporteur

BOUGUERRA Abderrahmen

Université Mohamed Boudiaf de M'Sila

Examineur

Année universitaire : 2019 /2020

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux.

Qui Nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

*Nous exprimons nos profondes gratitudes et respectueuse reconnaissance à
notre encadreuse :*

Madame K. Loukal

*Pour son encadrement, qui ne s'est pas attardée à nous orienter et à nous
encourager afin de donner le meilleur de nous-mêmes, et pour son suivi
durant la période de formation et de la préparation de notre projet de fin
d'étude.*

*Nous tenons aussi à remercier tous les membres du jury qui ont font
l'honneur d'accepter de juger notre modeste travail.*

*A tous les enseignants de la faculté de technologie, nous adressons des
remerciements particuliers pour la qualité de l'enseignement qui m'a été
dispensé .*

Cette page ne serait être complète sans nos meilleurs collègues et sœurs :

B. Ahlam , B. Asma, B. Zahra, A.Kholoud, DJ. Soumia.

*Enfin. Nous ne pourrons terminer ces remerciements, sans remercier **nos
parents.** Qui nous accompagnées tout au long de nos études par leurs amour
inconditionnel et leurs soutien constant.*





Dédicace

Je tiens à dédier ce modeste travail :

A ma très chère Mère et mon cher père, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs réconfort morale, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations sans limite.

A mes chers frères : Elamine, Adnane

et mes chers secours : Assia, Sara, Rajae

A mon compagnon de vie, mon cher mari :

Ommar Baghdadî

A mes chères amis : Ahlam, Kholoud

A mon binôme : Baghdadî Zahra

A mes cousins : Dounia, Hind, Bouthaina, Lamia, Hanan,

Ahlam, Ferial, Saïda, Loubna, Salima, wafa, soumia,

A toute ma grande famille

Mouna



DEDICACE



Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que :Je dédie ce modeste travail :

A Ma tendre Mère : Tu représentes pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

A Mon très cher Père : Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail et le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.

A mes chers frères : Toufik, Moustafa et Khalil

A mes sœurs : Abir, Dalila

À la femme de mon frère : Zahra

A mon binôme : Mokhtari Mouna

A mes très chère amis : Halima, Kholoud, Ahlam et Asma

B.Zahra

Table des matières

Table des matières	I
Listes des figures	IV
Liste des tableaux	V
Symboles	VI
Introduction Générale	01

Chapitre 1 : Généralités et modélisation d'un système hydraulique à deux réservoirs couplés CE105

1.1 Introduction	03
1.2 Les systèmes hydrauliques	03
1.2.1 Historique	03
1.2.2 Calcification des systèmes hydrauliques	04
1.2.3 Description du système hydraulique à deux réservoirs couplés CE105	04
1.3 Modélisation du système hydraulique CE105 à réservoirs couplés	06
1.3.1 Introduction	06
1.3.2 Modélisation du système hydraulique CE105	06
1.3.3 Détermination des caractéristiques de la pompe et des capteurs de niveau	08
1.3.4 Procédure de calcul K_Q et K_h	08
1.4. Résultat de simulation en boucle ouverte du système CE105	12
1.5 Conclusion	13

Chapitre 2 : commandes par La logique floue type-1 de CE105

2.1 Introduction	14
2.2 Historique de la logique floue	14
2.3 Théorie de la logique floue	15
2.3.1 Domaines d'application	15
2.3.2 Logique classique et logique floue	16
2.3.3 Théorie des ensembles flous	16
2.3.4 Définition de sous-ensembles flous	16
2.3.5 Caractéristiques d'un sous ensemble flou	17
2.3.6 Les variables et les valeurs linguistiques	18
2.3.7 Opérateurs de la logique floue	19
2.3.8 Fonction d'appartenance	19
2.3.9 Règles linguistiques	21
2.4 Structure d'un régulateur flou type-1	21
2.4.1. Fuzzification	22
2.4.2 Base de règle	22
2.4.3. Mécanisme d'inférence flou	23
2.4.4. Défuzzification	24
2.5 Application de la commande par logique flou type-1 de CE105	25
2.6.1 Résultat de simulation	27
2.6.2 Commentaires sur les résultats	30
2.7 Conclusion	30

Chapitre 3: Commande par la logique floue type-2 de CE105

3.1 Introduction	31
3.2 Définition de la logique floue type-2	31
3.3 Définition d'un ensemble flou type-2	33
3.4 Opération sur les ensembles flous type-2	34
3.5 Système et contrôleur flou type-2	35
3.5.1 Fuzzification	36
3.5.2 Base de règle	36
3.5.3 Mécanisme d'inférence	36
3.5.4 Module de traitement de sortie	38
3.5.5 Rédaction de type	38
3.5.6 Défuzzification	38
3.6 Application de la commande par logique floue type-2 de CE105	38
3.6.1 Résultat de simulation	40
3.6.2 Commentaires sur les résultats	42
3.7 Conclusion	43
Conclusion Générale	44
Annexe	46
Référence Bibliographiques	47

Liste des figures

Fig.1.1 : Différent types des systèmes hydrauliques	04
Fig. 1.2 : Présentation du système hydraulique CE105 a réservoirs couplés	05
Fig. 1.3 : Système hydraulique à réservoirs couplés	06
Fig. 1.4 : Caractéristiques de la pompe et des capteurs de niveau	08
Fig.1.5 : Variation du débit en fonction de la tension d'alimentation de la pompe	10
Fig. 1.6 : La tension indiquée par le capteur en fonction du niveau du liquide	10
Fig. 1.7 : schéma bloc de système en boucle ouvert	12
Fig. 1.8 : la réponse du système hydraulique (CE105) en boucle ouvert	12
Fig. 2.1 : Logique classique et logique floue	16
Fig. 2.2 : caractéristique d'un sous-ensemble flou	17
Fig. 2.3 : variables linguistique	18
Fig.2.4 : exemple d'un variable linguistique	18
Fig. 2.5 : Schéma synoptique d'un contrôleur flou type-1	21
Fig. 2.6 : schéma bloc de contrôleur floue appliquée au système hydraulique CE105	25
Fig.2.7 : fonction d'appartenance de l'erreur	26
Fig. 2.8 : fonction d'appartenance de la dérivée de l'erreur	26
Fig. 2.9 : fonction d'appartenance de la sortie	26
Fig. 2.10 : résultats de simulation de la commande par logique floue, pour une entrée échelon	28
Fig. 2.11 : résultats de simulation de la commande par logique floue, pour une entrée carrée	29
Fig. 3.1 : représentation schématique d'un ensemble flou type-2 gaussien	32
Fig. 3.2 : Schéma synoptique d'un contrôleur flou type-2	36
Fig. 3.3 : Opérations d'entrée d'un système flou type-2 avec fuzzification type gaussien	37
Fig. 3.4 : schéma bloc de contrôleur floue type-2 appliquée au système hydraulique CE105	38
Fig.3.5 : fonction d'appartenance de l'erreur	39
Fig. 3.6 : fonction d'appartenance de la dérivée de l'erreur	39
Fig. 3.7 : fonction d'appartenance de la sortie	39
Fig. 3.8 : résultats de simulation de la commande par logique floue type-2, pour une entrée échelon	40
Fig. 3.9 : résultats de simulation de la commande par logique floue type-2, pour une entrée carrée	41

Liste des tableaux

Tableau 1.1 La relation entre la tension d'alimentation et le débit d'entrée	09
Tableau 1.2 La relation entre la tension indiquée par le capteur et le niveau dans le réservoir	10
Tableau 2.1 fonctions d'appartenance de la logique floue type 1	20
Tableau 2.2 Matrice d'inférence floue	23
Tableau 2.3 Table de règles de MacVicar-Whelan	27
Tableau 3.1 fonctions d'appartenance type 2	34

Symboles

Q_e le débit d'entrée gènère par la pompe.

Q_0 Débit sortant par la valve C.

Q_{12} Débit entre les deux réservoirs.

h_i Niveau du liquide dans le réservoir i .

A la section du réservoir.

s_n Section des valves.

(a_{12}, a_0) Coefficients de décharge de la valve A et C.

g Constant de gravite $9,8 \text{ m/s}^2$.

u Tension d'alimentation de la pompe.

y_i Capteur de niveau.

k_Q le gain de la pompe.

k_Q le gain de capteur de niveau y_i .

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

$X = [x_1, x_2]^T$ Vecteur état instantané.

Introduction générale

Introduction générale

La logique, au sens commun du mot, est une conception des mécanismes de la pensée qui ne devrait jamais être floue, toujours rigoureuse et formelle. Mais les Mathématiciens se sont aperçus qu'il n'y avait pas, en réalité, une logique unique, mais autant de logiques qu'on veut tout étant dépendant de l'axiomatique choisie [1] [2].

La logique floue a pour objet d'études la représentation des connaissances imprécises et le raisonnement approché. On peut donc la situer à côté des heuristiques de résolutions de problèmes, des systèmes experts, de l'intelligence artificielle et même du traitement de la langue naturelle [3]. Cette théorie, introduite en 1965 par le professeur Lotfi Zadeh, permet de traiter des propositions ou des états par plusieurs niveaux de vérité [1].

Devant le délicat problème de modélisation des systèmes complexes, les méthodes de commande nécessitant une bonne connaissance du modèle mathématique s'avèrent incapables de répondre aux performances exigées. Afin de répondre à ces exigences toujours croissantes, les algorithmes de commande développés dans la littérature deviennent de plus en plus complexes. Alors, la commande floue s'est présentée, ces dernières années, comme l'une des alternatives.

La commande floue se base sur deux concepts essentiels à savoir : celui de la décomposition d'une plage de variation d'une variable sous formes de nuances linguistiques et des règles provenant de l'expertise de l'opérateur humain qui exprime sous forme linguistique comment doivent évoluer les commandes du système en fonction des variations de l'observation [2].

Un système décrit par des ensembles flous *type-1* est appelé système flou *type-1*. Il y a au moins trois sources d'incertitudes dans de tel système:

- ❖ Le sens des mots utilisés dans les règles peut être incertain, c'est-à-dire qu'un mot peut prendre plusieurs sens.
- ❖ Les mesures activant un système flou *type-1* peuvent être bruitées et incertaines.
- ❖ Les données utilisées pour l'ajustement des paramètres d'un système flou *type-1* peuvent être aussi bruitées.

Les systèmes flous *type-1*, sont incapables de modéliser ces incertitudes, car ils utilisent des fonctions d'appartenance précises, qui ont une représentation bidimensionnelle. Par conséquent, les ensembles flous de *type-2*, dont les fonctions d'appartenance elles-mêmes sont floues, sont l'extension des systèmes flous *type-1*[4].

Introduction générale

Les fonctions d'appartenance type-2 ont une représentation tridimensionnelle, la nouvelle (troisième dimension) des ensembles flous fournit un degré de liberté supplémentaire permettant de prendre en charge les incertitudes [4].

Malheureusement, les ensembles flous type-2 sont plus difficiles à mettre en œuvre, cependant leur utilisation est justifiée par leur efficacité dans les circonstances où il est difficile de trouver une fonction d'appartenance exacte, et leur capacité à minimiser l'effet des incertitudes dans la base des règles du système flou. Si nous projetons la même philosophie sur les systèmes flous, nous allons alors considérer la sortie d'un système flou *type-1* comme étant la valeur moyenne de la fonction de densité de probabilité (pdf), donc pour que le système flou prenne en compte les incertitudes, nous aurons alors besoin d'une certaine variance (dispersion) ; d'où la notion d'ensembles flous *type-2* où la variance est considérée comme étant le domaine d'appartenance secondaire de ces derniers. Les ensembles flous *type-2* ont donné naissance à la logique et aux systèmes flous *type-2* [3] [4].

L'objectif de ce travail consiste à présenter et évaluer la technique de commande appliquée à un système hydraulique à deux réservoirs couplés, en l'occurrence, la commande par logique floue (nous avons appliqué les deux types de ce dernier flou *type-1* et flou *type-2*).

Structure de la Mémoire :

Ce travail qui comprend trois chapitres est organisé comme suit :

- Le **chapitre 1** présente la description et la modélisation d'un système hydraulique à deux réservoirs couplés. Il présente le modèle d'état du système étudié et les résultats de simulation en boucle ouverte.
- Le **chapitre 2** est consacré à la commande par la logique floue type-1 du système hydraulique (CE105) où les résultats de simulation seront présentés et discutés.
- Le **chapitre 3** est l'objet de la commande par la logique floue type-2 de CE105. Les résultats de la simulation numérique obtenus seront présentés leurs performances.

Finalement, ce travail sera clôturé par une conclusion générale qui résumera l'ensemble des résultats obtenus, ainsi que des recommandations et des suggestions sur les travaux futurs dans ce domaine de recherche.

1.1 Introduction

Le comportement dynamique d'un système quelconque ne peut être étudié que s'il est possible de le représenter par un modèle mathématique souvent donné par un système d'équations différentielles ordinaires. L'élaboration d'un modèle dynamique ou la modélisation consiste à utiliser des lois de la physique et/ou des règles de calcul empiriques afin de construire un modèle dynamique relativement simple et satisfaisant compte tenu des objectifs poursuivis et des moyens disponibles. Alors, l'étape de modélisation est un passage indispensable pour concevoir des systèmes de commande performants.

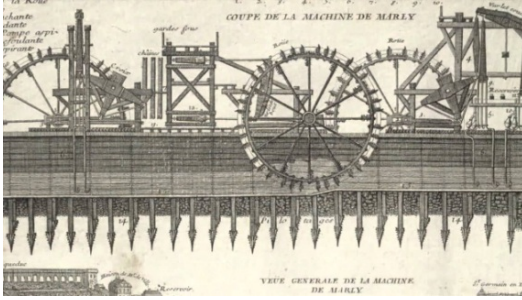
Dans ce chapitre, nous allons présenter la modélisation du système hydraulique à deux réservoirs couplés CE105 en utilisant les lois de la physique et, en particulier, la loi de Bernoulli. Un test de simulation en boucle ouverte du modèle non linéaire obtenu du système hydraulique sera présenté à la fin du chapitre.

1.2 Les systèmes hydrauliques

1.2.1 Historique

Le système hydraulique est utilisé dans beaucoup de domaines industriels tel que le domaine énergétique avec les centrales, le domaine mécanique avec les vérins ou encore le domaine du stockage avec les réservoirs. Ces domaines sont les plus utilisés et les plus demandés car ils continuent à augmenter et à s'améliorer [5].

L'origine des mots hydraulique est issue du grec que (**HYDRAULIKOS**) Ce sont deux mots (**HYDOR**) qui signifie l'eau et (**AULOS**) c'est à dire pipe [6]. Le premier système, appelé le fontainier **CLAUDE DENIS**, C'est une pompe à proximité de l'étang de **CLAGNY** actionnée par un cheval. Créé par **CLAUDE DENIS** dans les années 1639, Ce système a été témoin de nombreux développements. À partir du dix-septième siècle les scientifiques ont essayé d'imaginer une machine pour amener l'eau de la **SEINE** jusqu'à **VERSAILLES**, C'est ce qu'il a confirmé **LE GENTHOMME AMOLD de VILLE** et **LE CHARPENTIER RENNEQUIN SUALEM** par construire un moulin **BALFOUR**, appelé la machine de **MARLY**, qui date de 1680. Et dans l'année 1817 a été remplacée la machine de **MARLY** par une machine à vapeur conçue par **CECILE** et **MARTIN**. Et à partir de Le vingtième siècle les ingénieurs Créer un système avec une pompe fonctionne avec du fluide [7].



a- la machine de marly [8].



b- le fontainier CLAUDE DENIS [9].



c- machine à vapeur [8].



d- système hydraulique CE105 [10].

Fig1.1 Différent types des systèmes hydrauliques.

1.2. 2 Calcification des systèmes hydrauliques

Les systèmes hydrauliques sont traditionnellement divisés en trois catégories:

- ✓ Hydraulique industrielle.
- ✓ Hydraulique mobile.
- ✓ Hydraulique d'aéronef.

La classification est essentiellement due au fait que les composants sont classés dans ces catégories, Bien qu'il y ait un certain chevauchement entre les composants hydrauliques industriels et mobiles, Les composants hydrauliques des avions sont hautement spécialisés en raison des exigences extrêmes en matière de poids et de certification [6].

1.2. 3Description du système hydraulique à deux réservoirs couplés CE105

Le banc didactique d'étude de la régulation de niveau sur un ou deux réservoirs CE105 est considéré comme un benchmark pour l'étude et l'analyse des problèmes de commande des systèmes hydrauliques (Figure 1.2). Ce dispositif, est conçu par « TQ Education And Training» et permet d'effectuer la régulation de niveau du liquide dans un ou deux réservoirs

en variant le débit à partir d'une pompe. Cet équipement est constitué de deux réservoirs verticaux reliés par un canal d'écoulement, une valve rotative, utilisée pour changer la section du canal et, par conséquent, pour changer les caractéristiques d'écoulement entre les réservoirs, il comporte également des capteurs de débit et de niveau du liquide sur chaque réservoir [11] [12].

La vitesse de la pompe peut être ajustée pour remplir le réservoir de gauche au niveau désiré de façon manuel ou automatique et en surveillant le fonctionnement du système. Le réservoir droit peut être rempli à partir du réservoir gauche par l'intermédiaire de l'ouverture variable d'une valve placée au milieu des deux réservoirs. Les trois valves rotatives (A, B, C) de l'appareil permettent de changer les caractéristiques d'écoulement du système et de changer ainsi le comportement dynamique 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 des débits d'entrée et de sortie.

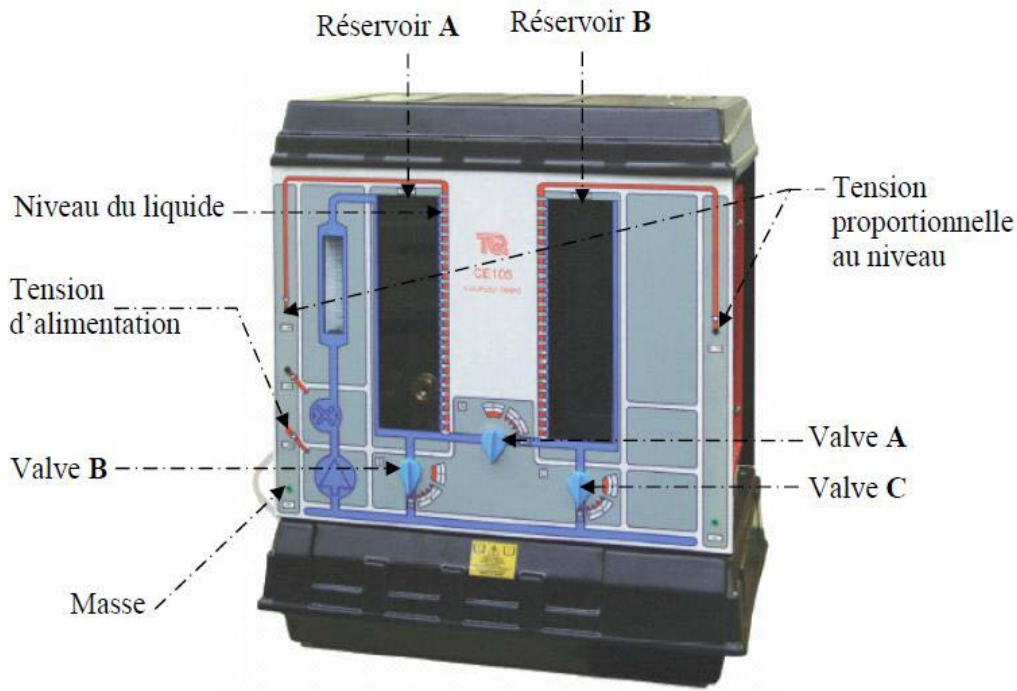


Fig.1. 2Présentation du système hydrauliqueCE105 a réservoirs couplés.

1.3 Modélisation du système hydraulique CE105 a réservoirs couplés

1.3.1 Introduction

Le comportement dynamique d'un système quelconque ne peut être étudié que s'il est possible de le représenter par un modèle mathématique souvent donné par un système d'équations différentielles ordinaires. L'élaboration d'un modèle dynamique ou la modélisation consiste à utiliser des lois de la physique et/ou des règles de calcul empiriques afin de construire un modèle dynamique relativement simple et satisfaisant compte tenu des objectifs poursuivis et des moyens disponibles. Alors, l'étape de modélisation est un passage indispensable pour concevoir des systèmes de commande performants.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la modélisation du système hydraulique à deux réservoirs couplés CE105 en utilisant les lois de la physique et, en particulier, la loi de Bernoulli.

Un test de simulation en boucle ouverte du modèle non linéaire obtenu du système hydraulique sera présenté à la fin du chapitre.

1.3.2 Modélisation du système hydraulique CE105

Considérons maintenant le système CE105 comprenant deux réservoirs et représenté par la Figure (1.3). Les équations d'état sont obtenues en remarquant que la variation du volume d'eau dans un réservoir est égale à la somme des débits entrants moins la somme des débits sortants.

Le système considéré contient deux réservoirs, et caractérisé par deux états h_1 (le niveau dans le premier réservoir) et h_2 (le niveau dans le deuxième réservoir) et trois débits : Q_e c'est le débit d'entrée, Q_{12} est le débit entre le premier et le deuxième réservoir, Q_o est le débit sortant par la valve C. Il est à noter que la valve B est considérée toujours fermée. En utilisant les équations massiques (équilibre des débits) [10-12].

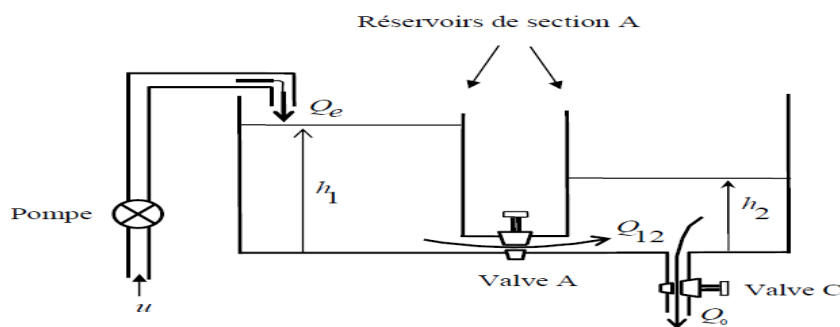


Fig. 1.3 Système hydraulique à réservoirs couplés.

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

$$A \cdot \frac{dh_1}{dt} = Q_{12} - Q_0 \quad (1.1)$$

Pour le deuxième réservoir

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

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

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

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

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

Avec, A la section du réservoir, i h le niveau du liquide dans le réservoir i , Q_e le débit d'entrée généré par la pompe ; et Q_{12} est le débit entre les deux réservoirs [10] tels que :

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

s_n : est la section des valves A et C. Dans la pratique, cette section est donnée par les dimensions de la valve et du canal d'écoulement.

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

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

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

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

1.3.3 Détermination des caractéristiques de la pompe et des capteurs de niveau

Il est clair que pour l'équation différentielle, h_1 et h_2 sont considérés comme les états, et Q_e l'entrée ou la commande. En effet, dans la pratique on fait varier la tension d'alimentation u de la pompe pour ajuster le débit d'entrée, Q_e le capteur de niveau nous donne une tension y_i proportionnelle au niveau h_i , comme illustre le schéma suivant [10]:

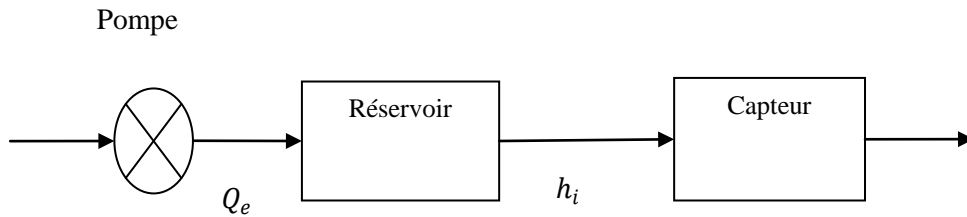


Fig.1.4. Caractéristiques de la pompe et des capteurs de niveau.

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

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

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

1.3.4 Procédure de calcul K_Q et K_h

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

Gain K_Q : Premièrement, nous fermons complètement la valve A (l'ouverture variable d'écoulement entre les deux réservoirs) et la valve B (de débordement). Ensuite, nous varions la tension d'alimentation de la pompe. Dès que, le flotteur indique la valeur $400 \text{ cm}^3/\text{min}$ pour le débit, on note la valeur de la tension correspondante. Cette procédure est répétée pour des grandes valeurs de débit (d'une manière croissante) et chaque fois nous prenons la tension correspondante jusqu'à la valeur maximale du débit $4000 \text{ cm}^3/\text{min}$ [7-10].

Lorsque le débit maximum est atteint, on répète la même procédure mais dans la direction inverse (décroissante) de 4000 cm³/min jusqu'à 0 cm³/min. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau (1.1).

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

Tableau 1.1 La relation entre la tension d'alimentation et le débit d'entrée [7].

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

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

La même procédure a été faite sur le deuxième réservoir et pratiquement les mêmes résultats ont été obtenus (voir tableau 1.2) [10].

Le niveau (mm)	La sortie de capteur (V)	La sortie de capteur (V)
	Croissante	Décroissante
0	0.1	0.1
50	2.1	2.12
100	4.18	4.22
150	6.25	6.3
200	8.3	8.34
250	10.3	10.3

Tableau 1.2 La relation entre la tension indiquée par le capteur et le niveau dans le réservoir [7].

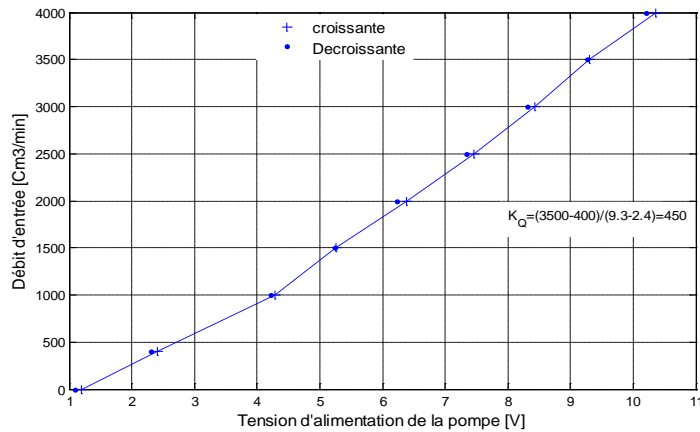


Fig.1.5 Variation du débit en fonction de la tension d'alimentation de la pompe.

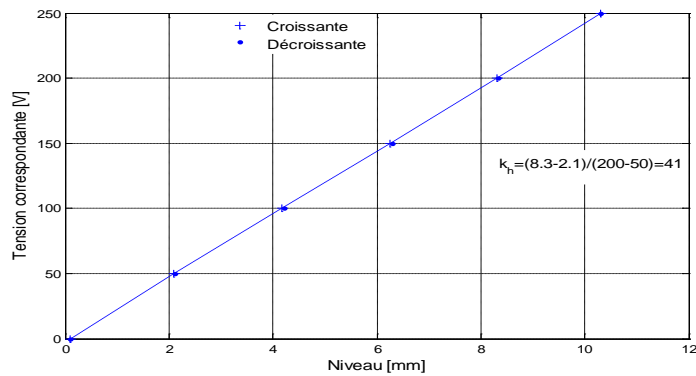


Fig.1.6 La tension indiquée par le capteur en fonction du niveau du liquide.

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

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

Avec :

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

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

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

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

Le modèle d'état:

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

Remarque : Nous pouvons étudier le système CE105 comme étant un système linéaire (autour d'un point de fonctionnement) ou bien non linéaire (dans de large domaine de fonctionnement), et avec couplage ou non [9-12]. Ceci, suivant les positions des valves (A, B, C).

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

1.4. Résultat de simulation en boucle ouverte du système CE105

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation en boucle ouverte du système hydraulique CE105. Ces résultats ont été obtenus en représentant le modèle dynamique non linéaire du système hydraulique CE105 à réservoirs couplés dans Simulink (Figure 1.7) avec les paramètres de simulation voir l'annexe.

Comme étant une consigne pour la sortie $y_r = k_h \cdot x_1$ Cette référence est proportionnelle au niveau désiré dans les deuxièmes réservoirs.

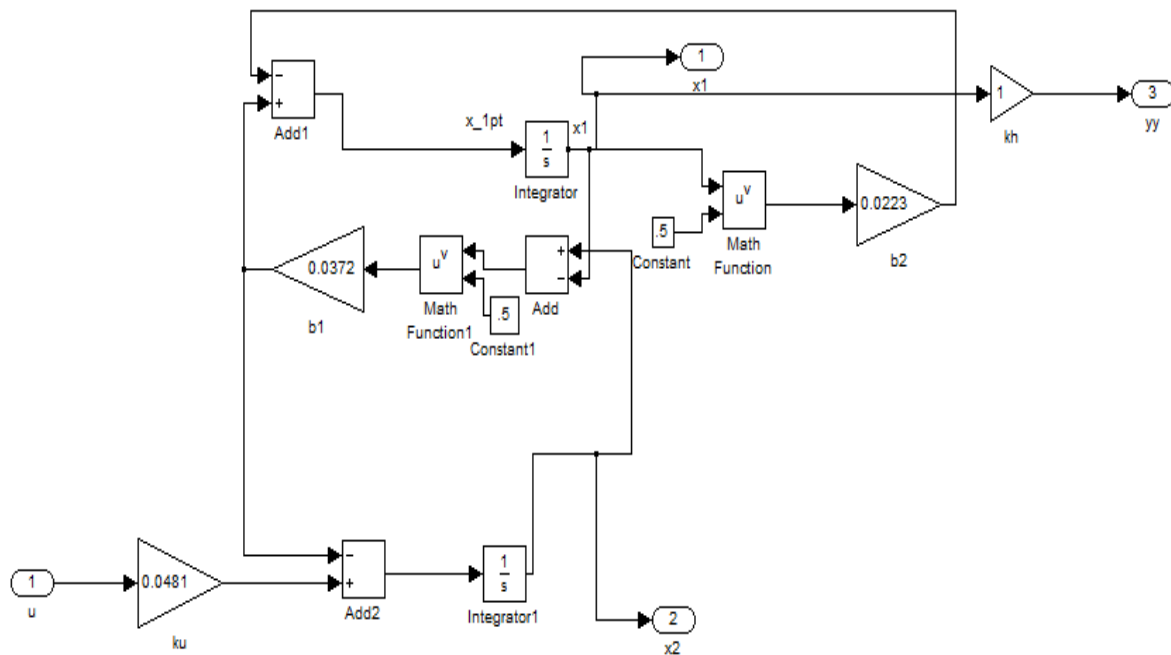
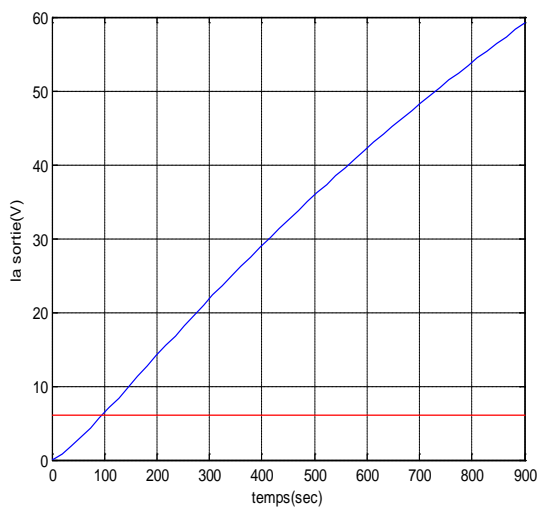
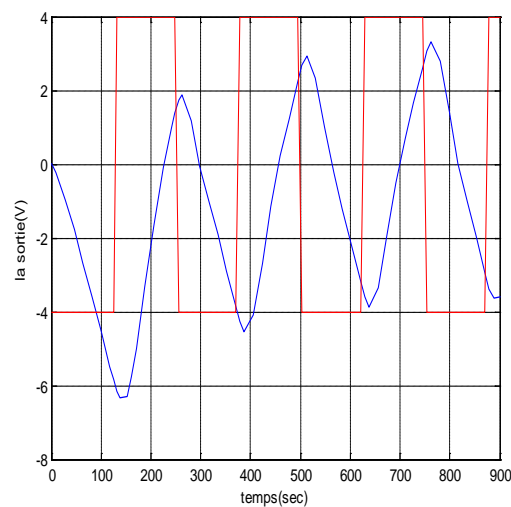


Fig.1.7 schéma bloc de système en boucle ouvert.



a) la sortie pour une entrée constante.



b) la sortie pour une entrée carrée.

Fig.1.8 La réponse du système hydraulique (CE105) en boucle ouvert.

1.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la description du système hydraulique CE105 et sa modélisation dynamique. Le système hydraulique est constitué de deux réservoirs couplés et son modèle dynamique est un modèle non linéaire avec une seule entrée et une sortie. Un test de simulation en boucle ouverte est présenté pour illustrer le comportement du système par rapport aux variations du coefficient de décharge de la valve de sortie, alors notre système sera instable. Dans le chapitre suivant une approche utilisant un système de contrôle basé sur la logique floue sera introduite.

2.1 Introduction

De nos jours, la logique floue (fuzzy logic) est un axe de recherche important sur lequel se focalisent de nombreux scientifiques. Des retombées technologiques sont d'ores et déjà disponibles, tant dans le domaine grand public (appareils photos, machines à laver, fours à micro-onde), que dans le domaine industriel (classification, aide à la décision, réglage et commande de processus, complexes liés à l'énergie, aux transports, à la transformation de la matière, à la robotique, aux machines-outils).

Les bases théoriques de la logique floue ont été formulées en 1965 par le professeur Lotfi A. Zadeh, de l'Université de Berkeley en Californie [13]. Il a introduit la notion de sous-ensemble flou pour fournir un moyen de représentation et de manipulation des connaissances imparfaitement décrites, vagues ou imprécises. A cette époque, la théorie de la logique floue n'a pas été prise au sérieux excepté par quelques experts. Dès 1975, Mamdani et Assilian publient les premiers résultats permettant une exploitation de cette théorie dans des systèmes de réglage [14]. En utilisant une structure de contrôleur relativement simple, ils ont obtenu de meilleurs résultats lors de la commande de certains processus que ceux fournis par un régulateur standard de type PID.

Peu de temps après, en 1977, le danois Ostergaard [15] a appliqué la logique floue à la commande de tubes broyeurs pour la fabrication de ciment. A cette époque, la plupart des études concernant les systèmes de régulation exploitant la logique floue ont été réalisées en Europe [16]. A partir de 1985 environ, ce sont les Japonais [14] qui commencent à utiliser largement la logique floue dans des produits industriels et de consommation pour résoudre des problèmes de réglage et de commande.

2.2 Historique de la logique floue

Depuis longtemps l'homme cherche à maîtriser les incertitudes et les imperfections inhérentes à sa nature. La première réelle manifestation de la volonté de formaliser la prise en compte des connaissances incertaines fut le développement de la théorie des probabilités à partir du XVII^e siècle. Mais les probabilités ne peuvent maîtriser les incertitudes psychologiques et linguistiques. On a donc assisté aux développements des théories de probabilité subjective (dans les années 50) puis de l'évidence (dans les années 60) [17].

Puis la Logique Floue est apparue en 1965 à Berkeley dans le laboratoire de Lotfi Zadeh avec la théorie des sous-ensembles flous puis en 1978 avec la théorie des possibilités. Ces deux théories constituent aujourd'hui ce que l'on appelle Logique Floue [18].

La Logique Floue permet la formalisation des imprécisions dues à une connaissance globale d'un système très complexe et l'expression du comportement d'un système par des mots.

Elle permet donc la standardisation de la description d'un système et du traitement de données aussi bien numériques qu'exprimées symboliquement par des qualifications linguistiques [19].

- 1973, Zadeh introduit la notion de variables linguistiques.
- 1974, Mamdani (Londres) réalise un contrôleur flou pour moteur à vapeur.
- 1987, explosion du flou au Japon et qui atteint son apogée en 1990.
- 1995 J. S. R. Jang Logique floue élargie aux systèmes à réseaux de neurones et l'Intelligence Artificielle.

2.3 Théorie de la logique floue

La logique floue (en anglais «fuzzy logic») est un axe de recherche important sur lequel se focalisent de nombreux scientifiques. Des retombées technologiques sont d'ores et déjà disponibles, tant dans le domaine grand public (appareils photos, machines à laver,) que dans le domaine industriel (réglage et commande de processus complexes liés à l'énergie, aux transports, à la transformation de la matière, à la robotique, aux machines-outils)[20]. Dans ce chapitre, nous présentons les éléments de base de la théorie de la logique en insistant sur les contrôleurs à logique floue.

2.3.1 Domaines d'application

Les domaines d'applications pratiques déjà connues sont innombrables, nous en citons quelque sens [21]:

- l'intelligence artificielle.
- la robotique.
- le contrôle des machines.
- l'informatique.
- le traitement des données.
- la communication homme-machine.
- la reconnaissance des formes.
- la médecine.
- les transports.

2.3.2 Logique classique et logique floue

Dans le cadre de la logique classique, une proposition est soit vraie, soit fausse (1 ou 0). Par exemple, la logique classique peut facilement partitionner la température d'une pièce en deux sous-ensembles, «moins de 15 degrés» et «15 degrés ou plus». La figure 1.1a montre le résultat de cette partition. Toutes les températures de moins de 15 degrés sont alors considérées comme appartenant à l'ensemble «moins de 15 degrés». On leur affecte une valeur de 1. Toutes les températures atteignant 15 degrés ou plus ne sont pas considérées comme appartenant à l'ensemble «moins de 15 degrés». On leur attribue une valeur de 0. Cependant, le raisonnement humain s'appuie fréquemment sur des connaissances ou des données inexactes, incertaines ou imprécises. Une personne placée dans une pièce dont la température est soit de 14.95 degrés soit de 15.05 degrés, ne fera certainement pas de distinction entre ces deux valeurs. Cette personne sera pourtant capable de dire si la pièce est «froide» ou «chaude», sans pour cela utiliser de température limite ni de mesure précise.

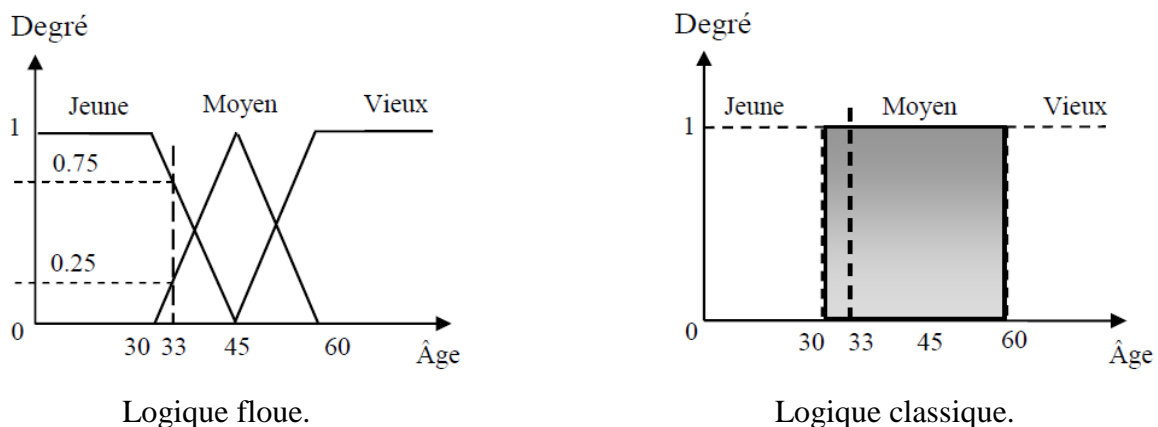


Fig.2.1 Logique classique et logique floue.

2.3.3 Théorie des ensembles flous

On introduit la théorie des ensembles flous comme théorie mathématique basée sur la théorie des ensembles, mais qui présente l'intérêt de l'étendre, en modifiant la définition même d'un ensemble ou plus précisément celle d'un sous-ensemble car on considère toujours un ensemble ordinaire comme référence pour définir des ensembles flous.

2.3.4 Définition de sous-ensembles flous

Soit X un ensemble classique de référence.

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

Les sous-ensembles flous servent à décrire des concepts vagues, imprécis, des propriétés graduelles ou des événements incertains. Les notions d'inclusion, de réunion, intersection, complément, relation, convexité, . . . etc., sont étendues à de tels ensembles, et diverses propriétés de ces notions dans le contexte des ensembles flous sont établies.

1. Egalité : $A = B$ si $\forall x \in X: \mu_A(x) = \mu_B(x)$.
2. Inclusion: $A \subset B$ si $\forall x \in X: \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$.
3. Intersection: $A \cap B = C$ telque: $\forall x \in X: \mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$.
4. Union: $A \cup B = D$ telque: $\forall x \in X: \mu_D(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$.
5. Complément d'un sous-ensemble flou: $\forall x \in X: \mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x)$.

2.3.5 Caractéristiques d'un sous ensemble flou

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

$$S(A) = \{x \in X / \mu_A(x) > 0\} \quad (2.1)$$

Remarque : l'ensemble flou dont le support est un ensemble singleton est appelé « singleton flou ».

- **Hauteur** : c'est la valeur maximale de la fonction d'appartenance qui est égale 1 (voir la figure (2.2)).

$$H(A) = \max(\mu_A(x)) \quad (2.2)$$

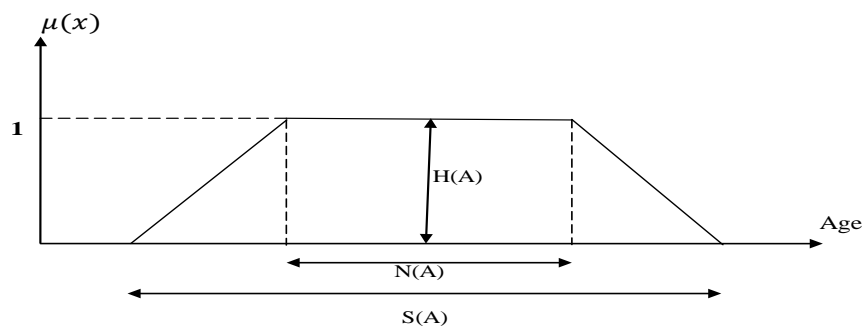


Fig.2.2 Caractéristique d'un sous –ensemble floue.

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

$$N(A) = \{x \in X / \mu_A(x) = 1\} \quad (2.3)$$
- **Le Type** : elles peuvent être par exemple triangulaires, trapézoïdales, gaussiennes, sigmoïdes ou des singletons.

2.3.6 Les variables et les valeurs linguistiques

La logique floue se repose sur des variables floues dites variables linguistiques à valeurs linguistiques dans l'univers de discours U .

Une variable linguistique représente un état dans le système à régler ou une variable de réglage dans un contrôleur flou. Chaque valeur constitue un ensemble flou de l'univers de discours.

Une variable linguistique est généralement caractérisée par [22] :

- Un nom de la variable linguistique.
- Un ensemble des valeurs linguistique qui peut prendre la variable linguistique.
- L'univers de discours, c'est-à-dire l'ensemble des valeurs numérique sur lesquelles est défini.

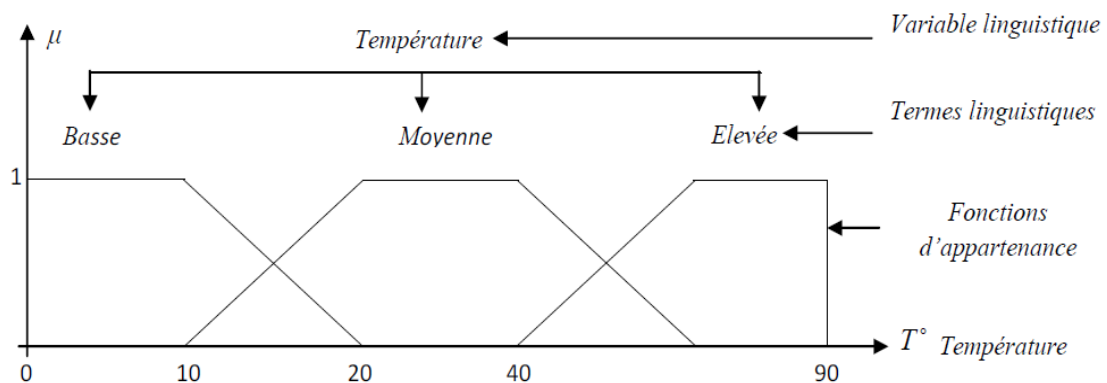


Fig.2.3 Variable linguistique.

Exemple :

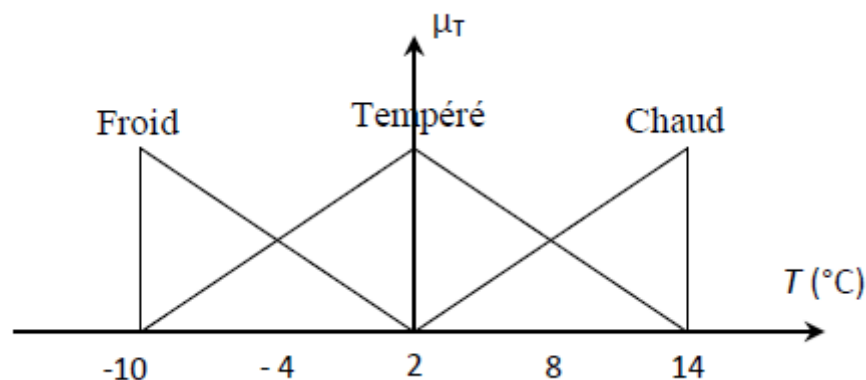


Fig.2.4: Exemple d'un variable linguistique.

- Univers de discours : Gamme de température de -10°C à 14°C .
- Variable linguistique : La température.
- Valeurs linguistiques : « chaud » « tempéré » « froid ».

2.3.7 Opérateurs de la logique floue

Il s'agit de la généralisation des opérateurs de : négation, intersection et union de la théorie des ensembles classiques.

- **L'opérateur NON (complément) :**

Il est défini mathématiquement par : $\bar{A} = \{ X/X \in A \}$ et il représenté par la fonction :

$$\text{NON} (\mu_A(x)) = \overline{\mu_A(x)} = 1 - \mu_A(x) \quad (2.4)$$

- **L'opérateur ET (intersection) :**

Il est défini mathématiquement par : $A \cap B = \left\{ \frac{x}{x} \in A \cap X \in B \right\}$ et il représenté par la fonction :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A \cap \mu_B(x) = \min (\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.5)$$

- **L'opérateur OU (union) :**

Il est défini mathématiquement par : $A \cup B = \left\{ \frac{x}{x} \in A \cup X \in B \right\}$ et il représenté par la fonction :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A \cup \mu_B(x) = \max (\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.6)$$

2.3.8 Fonction d'appartenance

Il s'agit d'établir une relation entre le degré de vérité de la variable floue et la grandeur d'entrée correspondante, les sous-ensembles flous sont ceux caractérisés par une fonction d'appartenance notée $\mu_A(x)$ définie sur $[0,1]$.

Les fonctions d'appartenance les plus utilisées sont représentées dans le tableau suivant [23] [24]

Fonction	Forme algébrique	Forme graphique
Fonction triangulaire	$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ \frac{d-x}{d-c} & b \leq x < c \\ 0 & x > c \end{cases}$	
Fonction trapézoïdale	$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x < d \\ 0 & x > d \end{cases}$	
Fonction gaussien	$\mu_A(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right)$	
Fonction singleton	$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & x = a \\ 0 & x \neq a \end{cases}$	

Tableau 2.1 fonctions d'appartenance de la logique floue type-1.

Le choix des formes des fonctions d'appartenance est arbitraire. Des études comparatives ont montré qu'avec les différentes formes des fonctions d'appartenance, les résultats sont pratiquement similaires en boucle fermée. La forme la plus fréquemment utilisée en commande floue est la forme triangulaire. Le nombre de fonctions d'appartenance est

généralement impair et se répartissent autour de zéro. En général, on introduit pour une variable linguistique trois, cinq ou sept ensembles flous. Le choix du nombre dépend de la précision souhaitée. Les fonctions d'appartenance peuvent être symétriques, non symétriques et équidistantes ou non équidistantes [25].

2.3.9 Règles linguistiques

L'idée principale des systèmes basés sur la logique floue et d'exprimer la connaissance humaine sous la forme de règles linguistiques de forme si, alors. Chaque règle à deux parties [26]:

1. Partie antécédente (prémisse ou condition), exprimée par Si...
2. La partie conséquente (conclusion), exprimée par alors...
 - La Partie antécédente est la description de l'état du système.
 - La partie conséquente exprime l'action que l'opérateur qui contrôle le système doit exécuter. Chaque règle floue est basée sur l'implication floue.

Zadeh a été le premier à introduire la notion de règle floue sous la forme : **Règle : Si x est A alors y est B .**

2.4 Structure d'un régulateur flou type 1

Il existe trois modules pour un régulateur à logique floue [23] :

1. La fuzzification des entrées et sorties.
2. L'inférence floue selon une base de règle.
3. La défuzzification des sorties.

L'architecture d'un contrôleur flou est donnée par le schéma suivant :

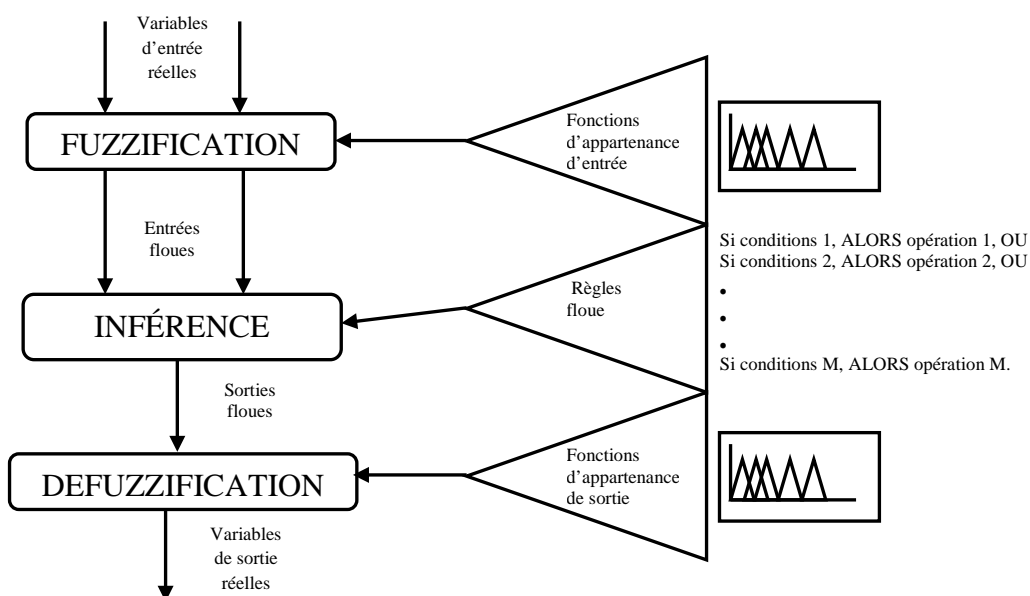


Fig.2.5 Schéma synoptique d'un contrôleur flou type-1.

2.4.1. Fuzzification

C'est le mécanisme réalisant l'interface "Numérique - linguistique". Les variables d'entrée et de sortie choisies pour modéliser ou commander un système sont des grandeurs numériques. L'étape de fuzzification consiste à transformer ces grandeurs réelles en variables linguistiques en vue d'un traitement d'inférence. Ainsi, à chaque variable d'entrée et de sortie est associé des ensembles caractérisant les termes linguistiques pris par ces variables. Ces termes seront utilisés pour écrire les règles d'inférence [25].

Le bloc de fuzzification effectue les fonctions suivantes :

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

2.4.2 Base de règle

Ce bloc est une base de connaissance qui correspond à l'expertise ou au savoir-faire de l'opérateur sur le comportement du système. Elle est composée de l'ensemble des informations et des connaissances dans le domaine d'application et le résultat de commande prévu. Elle permet de déterminer le signal de sortie du contrôleur flou et exprime la relation qui existe entre les variables d'entrées transformées en variables linguistiques et les variables de sortie converties également en variables linguistiques [26]. Ainsi, elle est constituée par une collection de règles données sous la forme «Si...Alors....». D'une manière générale, on peut exprimer la 2^{ème} règle floue par la relation suivante :

- Modèle de Mamdani :

$$R^i : \text{Si } x_1 \text{ est } F_1^i \text{ et } x_2 \text{ est } F_2^i \text{ et } \dots x_n \text{ est } F_n^i \text{ Alors } y_j \text{ est } G_j$$

- Modèle de Takagi Sugeno :

$$R^i : \text{Si } x_1 \text{ est } F_1^i \text{ et } x_2 \text{ est } F_2^i \text{ et } \dots x_n \text{ est } F_n^i \text{ Alors } y_i = a_0^i + a_1^i x_1 + \dots + a_n^i x_n$$

Où : $i = 1, \dots, m$.

- m est le nombre total des règles.
- F_1, F_2, \dots, F_n sont les ensembles flous (valeurs linguistique) des entrées (x_1, x_2, \dots, x_n)
- G_j est l'ensemble flou correspondant à la sortie y_j

- les $a_0^i, a_1^i x_1, \dots, a_n^i$ sont paramètres ajustables des conséquences de la règle R^i .

On peut écrire les règles d'inférence sous forme d'une matrice appelée Matrice d'inférence, qui est généralement antisymétrique. A titre d'exemple, si on considère un contrôleur flou à deux entrées caractérisées par trois ensembles flous et une sortie, alors la matrice d'inférence peut prendre la forme suivante :

x_1			
x_2	F_1^1	F_1^2	F_1^3
F_2^1	G_1	G_4	G_7
F_2^2	G_2	G_5	G_8
F_2^3	G_3	G_6	G_9

Tableau 2.2 Matrice d'inférence floue.

2.4.3. Mécanisme d'inférence flou

L'inférence floue ou la logique de prise de décision est le cœur du contrôleur flou qui possède la capacité de simuler les décisions humaines et de déduire (inférer) les actions de commande floue à l'aide de l'implication floue et des règles d'inférence de la logique floue. Elle utilise les variables floues transformées par la fuzzification et les règles d'inférence pour créer et déterminer les variables floues de sortie, en se basant sur des opérations floues appliquées aux fonctions d'appartenance [21].

Comme on l'a mentionné, il existe plusieurs possibilités pour réaliser les opérateurs flous qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance.

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

Pour le réglage par logique floue, on utilise en général l'une des trois méthodes suivantes :

- Méthode d'inférence Max - Min (Méthode de Mamdani).
- Méthode d'inférence Max - Produit (Méthode de Larsen).
- Méthode d'inférence Somme - Produit.

2.4.4. Défuzzification

La dernière étape pour avoir un système flou opérationnel s'appelle la défuzzification, c'est une interface "linguistique - Numérique". Lors de la seconde étape, on a généré un tas de commandes sous la forme de variables linguistiques (une commande par règle). Le but de la défuzzification est de fusionner ces commandes et de transformer les paramètres x_2 résultants en donnée numérique. L'étape de défuzzification se déroule en deux temps [21] [27].

D'abord, il faut fusionner les variables linguistiques communes à l'aide d'un opérateur de la logique floue choisi par le concepteur du système. Si on a plusieurs règles d'inférences qui génèrent plusieurs valeurs de la même variable linguistique, on peut choisir un opérateur pour combiner les valeurs de la variable. Cet opérateur sera dans la grande majorité des cas, le OU logique utilisant l'opérateur de maximalité. Dans un second temps, nous pouvons réellement entamer la partie délicate de la défuzzification.

On a une série de variables linguistiques qui caractérisent une seule et même donnée, défuzzifier la donnée revient donc à trouver la meilleure valeur quantitative en fonction des fonctions d'appartenances des variables linguistiques.

Il existe plusieurs méthodes de défuzzification, la plus utilisée est la méthode du centre de gravité [28]

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} \mu_{ci}(y) \omega_i}{\sum_{i=1}^{N_c} \mu_{ci}(y) \omega_i} \quad (2.7)$$

Où :

- \bar{y} : la valeur numérique de sortie.
 - N_c : le nombre de valeur linguistique de conséquence.
- ω_i : les sommets des ensembles flous de conséquence.
- μ : la valeur d'appartenance.

2.5 Application de la commande par logique floue type-1 de CE105

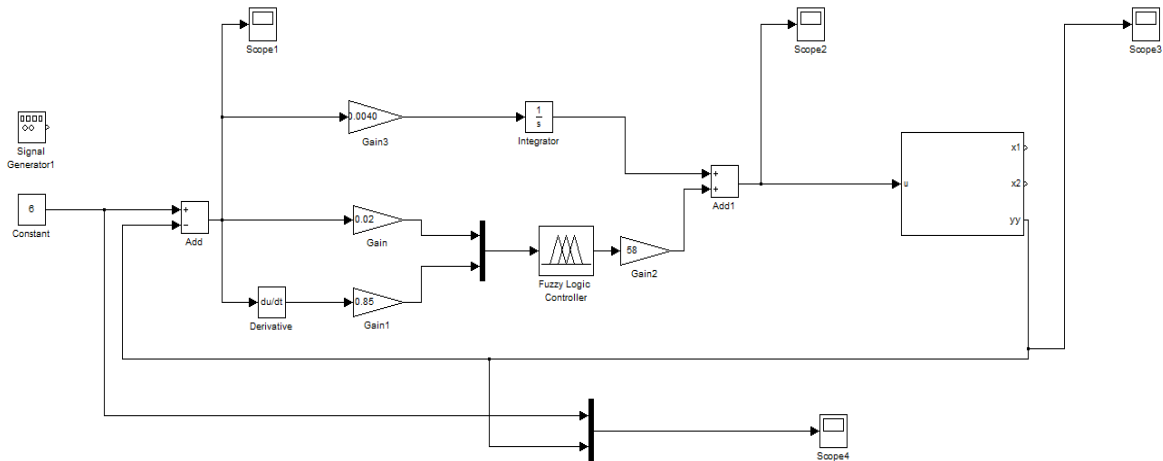


Fig.2.6 Schéma bloc de contrôleur floue type-1 appliquée au système hydraulique CE105.

Un ensemble de règles floues de la forme suivante est utilisé pour faire cette adaptation :

$$si e(k) est A_i et \Delta e(k) est B_i alors \Delta k_p est C_i \tag{2.8}$$

Où A_i, B_i et C_i sont les ensembles flous correspondant à $e(k), \Delta e(k)$ et ΔK_p , respectivement. $e(k)$ et $\Delta e(k)$ représentent l'erreur de sortie et sa dérivée.

Pour la vitesse Ω l'erreur et sa dérivée sont données par :

$$e_{\Omega}(k) = \Omega_d - \Omega \tag{2.9}$$

$$\Delta e_{\Omega}(k) = \frac{e_{\Omega}(k+1) - e_{\Omega}(k)}{T} \tag{2.10}$$

Où T est la période d'échantillonnage.

Les fonctions d'appartenance des variables d'entrée, la dérivée d'entrée et sortie sont définies par des formes triangulaires et trapézoïdales (Figures 2.7, 2.8 et 2.9).

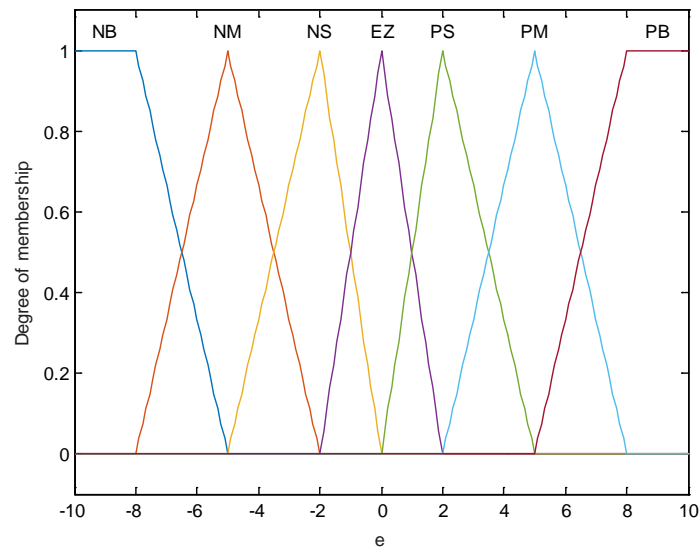


Fig2.7 : fonction d'appartenance de l'erreur

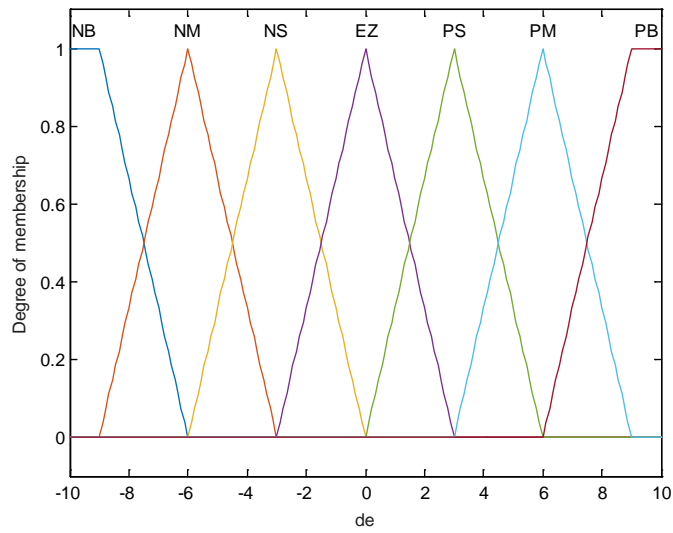


Fig. 2.8 fonction d'appartenance de la dérivée de l'erreur.

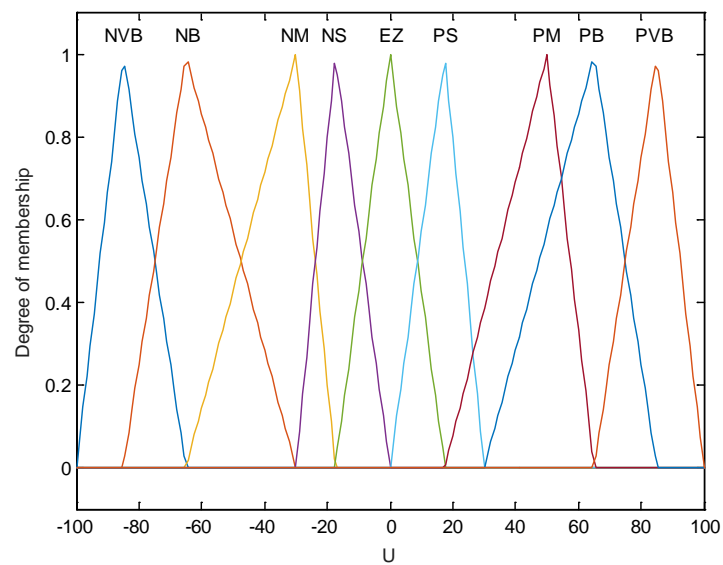


Fig. 2.9 fonction d'appartenance de la sortie.

Avec :

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

Pour le régulateur de niveau la table des règles flous qui à servir ou mécanisme d'inférence est donné par le tableau 2.3 :

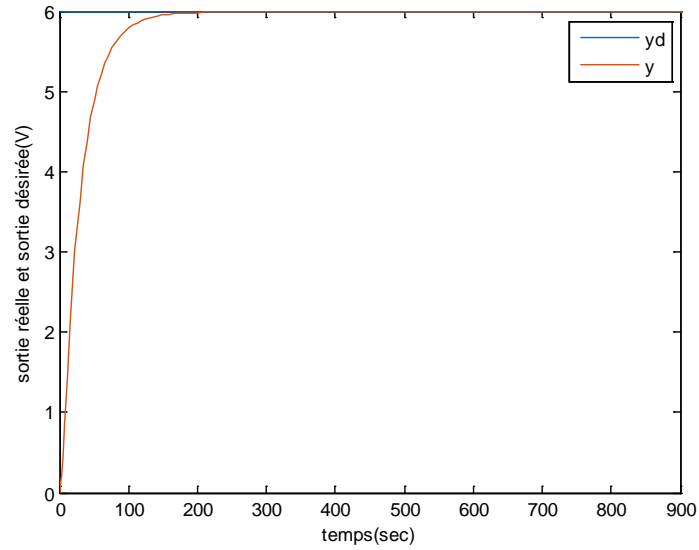
		e						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
de	NB	NVB	NVB	NVB	NB	NM	NS	ZE
	NM	NVB	NVB	NB	NM	NS	ZE	PS
	NS	NVB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
	ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PVB
	PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PVB	PVB
	PB	ZE	PS	PM	PB	PVB	PVB	PVB

Tableau 2.3 Table de règles de MacVicar-Whelan

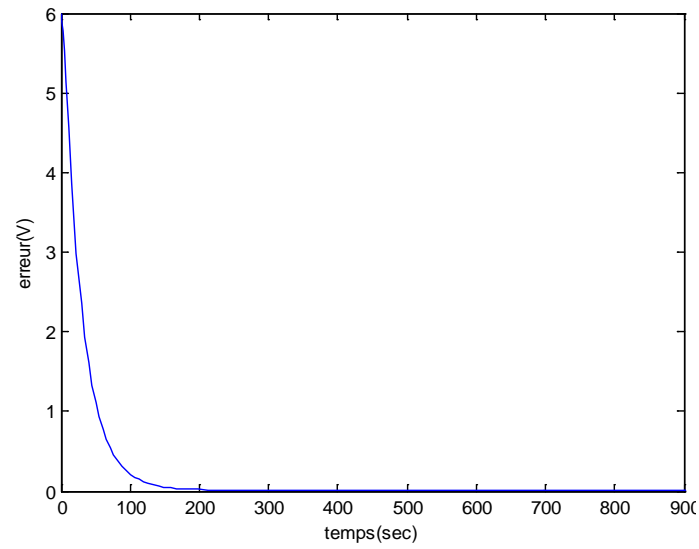
2.6 Résultats de simulation

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation concernant l'application de la loi de commande par la logique floue type-1 schématisée par la figure (2.10) et figure (2.11). Ces résultats ont été obtenus en utilisant le modèle mathématique du système hydraulique à réservoirs couplés avec les paramètres de simulation suivants :

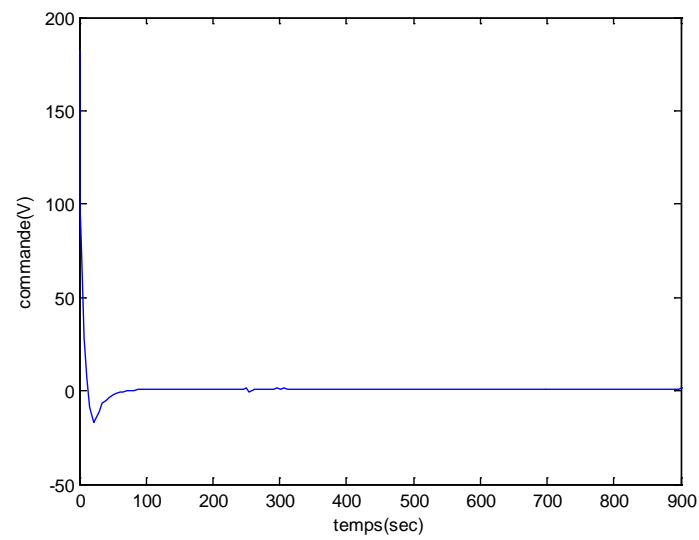
Le temps de simulation $t_{max} = 900$ sec. Avec un gain de commutation $K = 8$ et le paramètre de la surface de glissement $\mu = 0.5$. Le niveau de référence $h_{d2} = 6$ cm.



a): la sortie

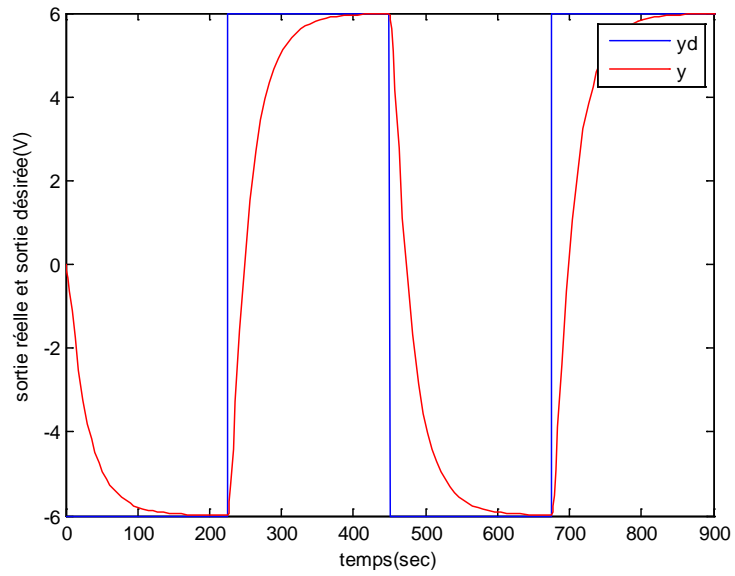


b): l'erreur

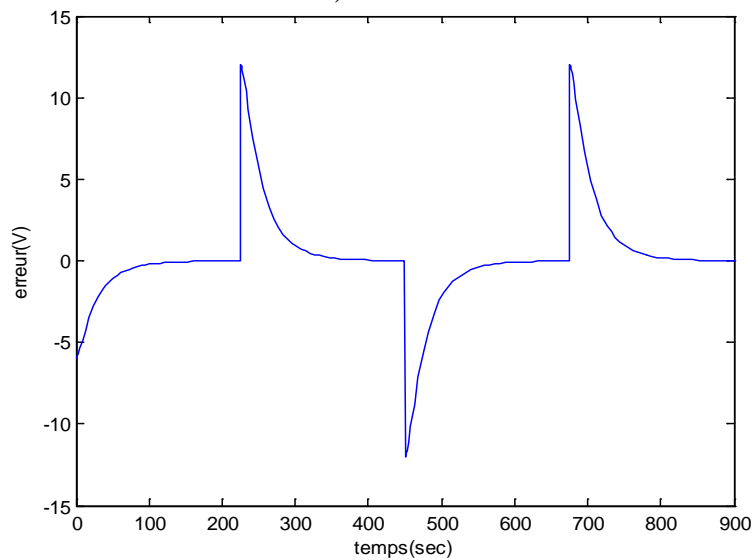


c): la commande

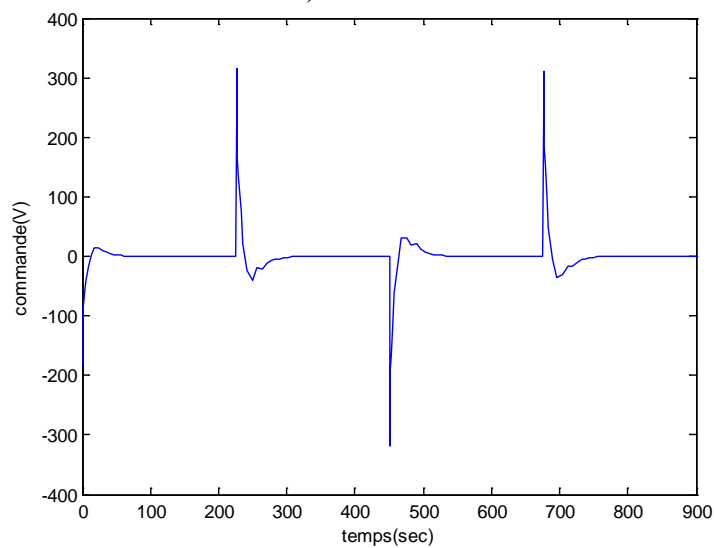
Fig.2.10 Résultats de simulation de la commande par logique floue, pour une entrée échelon.



a): la sortie



b) :l'erreur



c) : la commande

Fig.2.11 Résultats de simulation de la commande par logique floue, pour une entrée carrée.

2.6.2 Commentaires sur les résultats

On peut voir clairement que les trajectoires de sorties convergent rapidement vers les valeurs désirées même en présence de la perturbation externe.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé principalement une technique de commande intelligente par la logique floue type-1. La logique floue, établie par Zadeh en 1965, permet la représentation et le traitement de connaissances imprécises ou approximatives. Le nombre d'applications basées sur la théorie de la logique floue a augmenté considérablement ces dernières années car cette logique est exprimée usuellement par des règles linguistiques de la forme Si –Alors. Elle est utilisée pour résoudre les problèmes de décision en contrôle ou pour décrire le comportement dynamique d'un système inconnu ou mal défini. La première génération de la logique floue est appelée la logique floue type-1.

Dans le but d'améliorer les performances de commande (stabilité, précision...), et de prendre en considération la présence des incertitudes paramétriques et/ou des perturbations externes, on propose dans le chapitre suivant, d'utiliser des régulateurs flous type-2.

3.1 Introduction

Le concept des ensembles flous de type-2 a été introduit par Zadeh [29] comme extension du concept des ensembles flous ordinaires dits ensembles flous type-1. Un ensemble flou type-2 est caractérisé par une fonction d'appartenance, c.-à-d. la valeur d'appartenance de chaque élément de l'ensemble est un nombre flou dans l'intervalle $[0,1]$. De tels ensembles sont conseillés dans le cas où nous avons une incertitude au niveau de la valeur de l'appartenance elle-même. L'insecticide peut être soit au niveau de la forme de la fonction d'appartenance soit dans l'un de ses paramètres.

La transition d'un ensemble ordinaire à un ensemble flou est la conséquence directe de l'indéterminisme de la valeur de l'appartenance d'un élément à un ensemble flou type-2. Pour cela, on peut considérer que l'ensemble flou type-1 comme une approximation du première ordre de l'incertitude et que les ensemble flou type-2 comme une approximation du deuxième ordre. Ce chapitre sera consacré à la présentation des principes de base et le fondement théorique de la théorie de la logique floue type -2.

3.2 Définition de la logique floue type-2

Un ensemble flou type-2, noté \hat{A} est caractérisé par une fonction d'appartenance tridimensionnelle, $\mu_{\hat{A}}(x, u)$, c.-à-d.:

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \mu_{\hat{A}}(x, u) / (x, u) \quad J_x \subseteq [0,1] \quad (3.1)$$

Avec $\int \int$ dénote l'union de tous les éléments du produit cartésien sur x et u .

À chaque point fixe x de X , J_x est l'appartenance primaire de x , et x est appelé variable primaire [29] [30].

Donc pour $x' \in X$ et $\forall u \in J_x \subseteq [0,1]$, on a:

$$\mu_{\hat{A}}(x = x', u) = \mu_{\hat{A}}(x') = \int_{u \in J_x} f_{x'}(u) / u \quad J_x \subseteq [0,1] \quad (3.2)$$

Avec $0 \leq f_{x'}(u) \leq 1$. Puisque $\forall x'$, ce x' va appartenir à X , c.-à-d. $x' \in X$, alors nous notons la fonction d'appartenance secondaire par $\mu_{\hat{A}}(x)$ qui est une fonction d'appartenance flou type1.

En se basant sur le concept des ensembles secondaires, on peut réinterpréter un ensemble flou type-2 comme l'union de tous les ensembles secondaires, c.-à-d., en utilisant l'équation (3.2), on peut écrire \tilde{A} sous la forme suivante [30]:

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \mu_{\tilde{A}}(x) / (x) = \int_{x \in X} \left[\int_{u \in J_x} f_x(u) / (u) \right] / x \quad J_x \subseteq [0,1] \quad (3.3)$$

On représente sur la Fig.2.1 les grandeurs floues déjà expliqués, voir [30][31][32]. Le domaine de la fonction d'appartenance secondaire est appelé appartenance primaire de x noté J_x telle que $J_x \subseteq [0,1] \forall x \in X$.

L'amplitude de la fonction d'appartenance secondaire est appelée degré d'appartenance secondaire noté $f_x(u)$.

Un ensemble flou type-2 intervalle est un ensemble flou type-2 dont toutes les fonctions d'appartenance secondaires sont des ensembles type-1 de formes intervalles, c.-à-d. :

$$f_x(u) = 1, \forall u \in J_x \subseteq [0,1] \forall x \in X.$$

Les ensembles flous type-2 intervalle reflètent l'uniformité de l'incertitude au niveau de la fonction d'appartenance primaire, ce type de fonctions d'appartenance est le plus souvent utilisé dans les systèmes flous type-2. Notons que ce type de fonctions d'appartenance est représenté seulement par ses domaines (intervalles), qui peuvent être exprimés en terme des bornes gauches et droites $[l, r]$ ou par leurs centres et largeurs $[c-s, c+s]$ où $c = (l+r)/2$ et $c = (l-r)/2$.

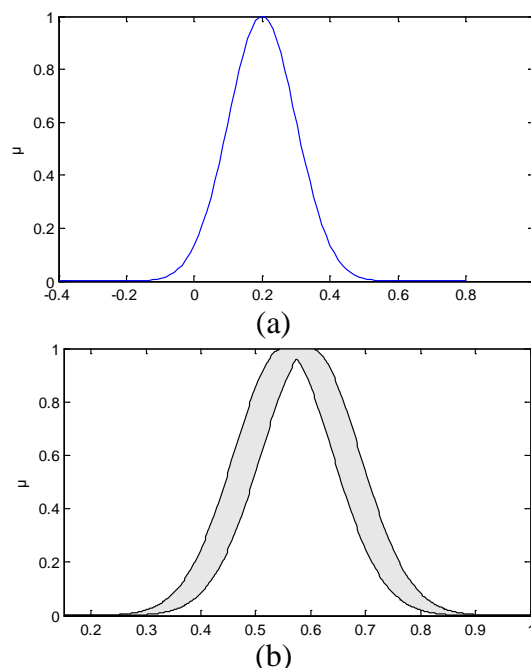


Fig. 3.1 Représentation schématique d'un ensemble flou type-2 gaussien.

Les appartenances secondaires sont représentées dans (b), où on remarque qu'ils sont gaussiens [33].

L'incertitude dans un ensemble flou type-2, \tilde{A} est représentée par une région bornée appelée «Footprint Of Uncertainty » *FOU*. C'est l'union de toutes les appartenances primaires [34-36]:

$$FOU(\tilde{A}) = \bigcup_{x \in X} J_x \quad (3.4)$$

La fonction d'appartenance supérieure sera notée par $\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x) \forall x \in X$, et la fonction d'appartenance inférieure sera notée par $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) \forall x \in X$, alors nous avons :

$$\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x) = \overline{FOU(\tilde{A})} \quad (3.5)$$

$$\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) = \underline{FOU(\tilde{A})} \quad (3.6)$$

3.3 Différents types d'ensembles flous type-2

- **Ensemble flou type-2 gaussien :**

Le degré d'appartenance de chaque point est un ensemble flou type-1 gaussien dont le domaine de définition est inclus dans l'intervalle [0,1].

- **Ensemble flou type-2 triangulaire :**

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

- **Ensemble flou type-2 intervalle :**

Le degré d'appartenance de chaque point est un ensemble ordinaire dont le domaine de définition est inclus dans l'intervalle [0,1]. Dans ce cas, les appartenances secondaires sont égales à 1.

Les fonctions d'appartenance les plus utilisées sont représentées dans le tableau suivant :

Fonction	Forme algébrique	Forme graphique
Fonction triangulaire	$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x < c \\ 0 & x > c \end{cases}$ $\mu_{\tilde{A}}(x, u) = \begin{cases} 0 & x < (a + \alpha) \\ (1 - \alpha) \frac{x - (a + \alpha)}{b - (a + \alpha)} & (a + \alpha) \leq x < b \\ (1 - \alpha) \frac{x - (a + \alpha)}{b - (a + \alpha)} & b \leq x \leq (c - \alpha) \\ 0 & x > (c - \alpha) \end{cases}$	
Fonction trapézoïdale	$\overline{\mu_{\tilde{A}}(x, u)} = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x < d \\ 0 & x > d \end{cases}$ $\mu_{\tilde{A}}(x, u) = \begin{cases} 0 & x < (a + \alpha) \\ (1 - \alpha) \frac{x - (a + \alpha)}{b - (a + \alpha)} & (a + \alpha) \leq x < b \\ (1 - \alpha) \frac{(d - a) - x}{(d - a) - c} & b \leq x \leq (d - \alpha) \\ 0 & x > (d - \alpha) \end{cases}$	
Fonction gaussien	$\overline{\mu_{\tilde{A}}(x, u)} = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right)$ $\mu_{\tilde{A}}(x, u) = (1 - \alpha)\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right)$	

Tableau 3.1 fonctions d'appartenance type 2.

3.4 Opérations sur les ensembles flous type-2

Les degrés d'appartenance des ensembles flous type-2 sont des ensembles type-1 ; par conséquent, pour effectuer des opérations telles que l'union et l'intersection sur les ensembles

type- 2, nous devons faire appel aux opérations t-conorme et t-norm sur des ensembles de type1. Cela est réalisable en utilisant le principe d'extension de Zadeh [33-36].

Une opération "*" entre deux nombres ordinaires peut être étendue à deux ensembles type-1:

$$F = \int_v f(v) / v \quad (3.7)$$

Et

$$G = \int_w g(w) / w \quad (3.8)$$

De la façon suivante:

$$F * G = \int_{v w} [f(v) \bullet g(w)] / v * w \quad (3.9)$$

Où le symbole "•" représente l'opération T-norme utilisée, généralement c'est une opération de produit ou de minimum. L'extension de la T-conorme aux ensembles flous de type-1 est donnée par:

$$F \cap G = \int_{v w} [f(v) \bullet g(w)] / v \wedge w \quad (3.10)$$

La complémentation est donnée par :

$$\bar{F} = -F = \int_v f(v) / (1-v) \quad (3.11)$$

Les opérations d'union "join", d'intersection "meet", et de complémentation sont notées : \cup , \cap , et $\bar{}$ respectivement.

3.5 Systèmes et contrôleurs flous type-2

Il existe quatre modules pour un régulateur à logique flou :

1. La fuzzification des entrées et sorties.
2. L'inférence floue selon une base de règle.
3. La réduction de type.
4. La défuzzification des sorties.

L'architecture d'un contrôleur flou est donnée par le schéma suivant :

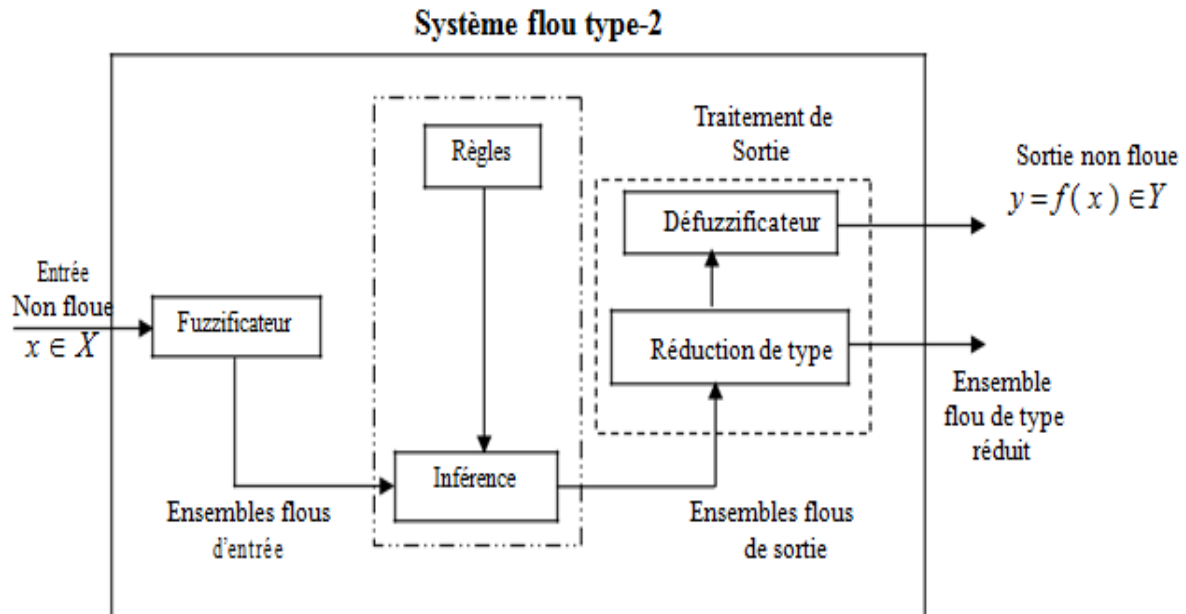


Fig. 3.2 : Schéma synoptique d'un contrôleur flou type-2.

3.5.1. Fuzzification

L'interface de fuzzification fait correspondre à l'entrée déterministe un ensemble flou qui peut être généralement un EFT-2. Cependant, dans ce qui suit, nous utilisons seulement une fuzzification par singleton pour laquelle l'ensemble flou d'entrée possède uniquement un seul degré d'appartenance non nul [37].

3.5.2. Base des règles

La structure des règles reste exactement la même dans le cas des SFT-1. La $l^{ième}$ règle dans un SFT-2 à la forme suivante :

$$"R^l : \text{si } x_1 \text{ est } F_1^l \text{ et } x_2 \text{ est } F_2^l \text{ et } \dots \text{ et } x_p \text{ est } F_p^l, \text{ Alors } y \text{ est } G^l " \quad (3.12)$$

Où les x_i sont des entrées, F_i^l sont des ensembles antécédents ($i = 1 \dots p$), y est la sortie, et G^l est l'ensemble conséquent.

3.5.3. Mécanisme d'inférence

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

exactement la même, la seule différence étant que quelques (ou toutes) les fonctions d'appartenance seront de type-2.

Il n'est pas nécessaire que toutes les fonctions d'appartenance des prémisses et des conséquences soient de type-2. Il suffit qu'une seule fonction d'appartenance dans une prémisse ou dans une conséquence soit de type-2 pour que tout le système le soit aussi [38].

➤ **Théorème**

Dans un système flou type-2 intervalle, avec une t-norm min ou prod, l'intervalle d'activation $F^l \in [\underline{f}^l, \bar{f}^l]$ de la $i^{\text{ème}}$ règle est :

$$\underline{f}^l = \underline{\mu}_{\tilde{F}_1^l}(x_1) * \underline{\mu}_{\tilde{F}_2^l}(x_2) * \dots * \underline{\mu}_{\tilde{F}_n^l}(x_n) \tag{3.13}$$

$$\bar{f}^l = \bar{\mu}_{\tilde{F}_1^l}(x_1) * \bar{\mu}_{\tilde{F}_2^l}(x_2) * \dots * \bar{\mu}_{\tilde{F}_n^l}(x_n) \tag{3.14}$$

Ceci est clairement représenté sur la figure (3.3), où le nombre d'antécédents est $p = 2$. Dans ce cas, le degré d'activation est un ensemble type-1 intervalle $[\underline{f}^l, \bar{f}^l]$ ou :

$$\underline{f}^l = \underline{f}_1^l * \underline{f}_2^l \tag{3.15}$$

$$\bar{f}^l = \bar{f}_1^l * \bar{f}_2^l \tag{3.16}$$

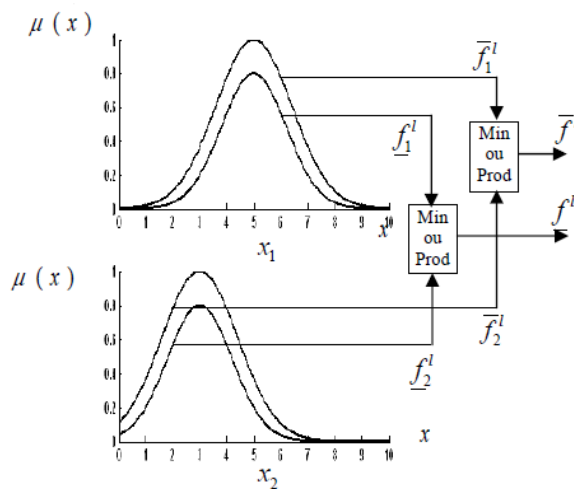


Fig.3.3: Opérations d'entrée d'un système flou type-2 avec fuzzification type gaussien.

3.5.4 Module de traitement de la sortie :

Le module de traitement de la sortie se compose de deux blocs, le réducteur de type et l'interface de défuzzification.

3.5.5 Réduction de type :

La réduction de type prend en considération plus d'information au sujet des incertitudes des règles que la valeur défuzzifiée (un nombre). Cependant, cette opération nécessite des calculs intensifs, à l'exception du SFT-2 type intervalle pour lesquels il existe une procédure simple pour la mise en œuvre de la réduction de type [39].

Parmi les méthodes de réduction de type utilisées on cite :

- La réduction de type par le centre de gravité.
- La réduction de type par la hauteur.
- La réduction de type par le centre des ensembles.

3.5.6. Défuzzification

Pour obtenir une sortie ordinaire (non floue) du système flou type-2, nous devons défuzzifier l'ensemble de type réduit. Nous allons transformer l'ensemble flou type-2 en ensemble flou type-1 et la sortie soit [39]:

$$Y_{CG} = \frac{y_l + y_r}{2} \quad (3.17)$$

3.6 Application de la commande par logique floue type-2 de CE105

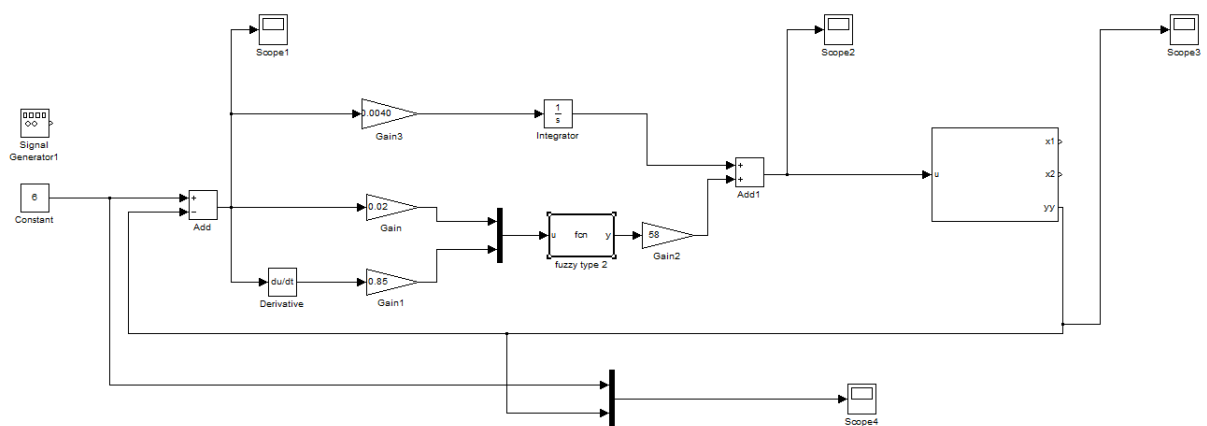


Fig.3.4 Schéma bloc de contrôleur flou type 2 appliquée au système hydraulique CE105.

Les fonctions d'appartenance des variables d'entrée, la dérivée d'entrée et sortie sont définies par des formes triangulaires et trapézoïdales (Figures 3.5, 3.6 et 3.7).

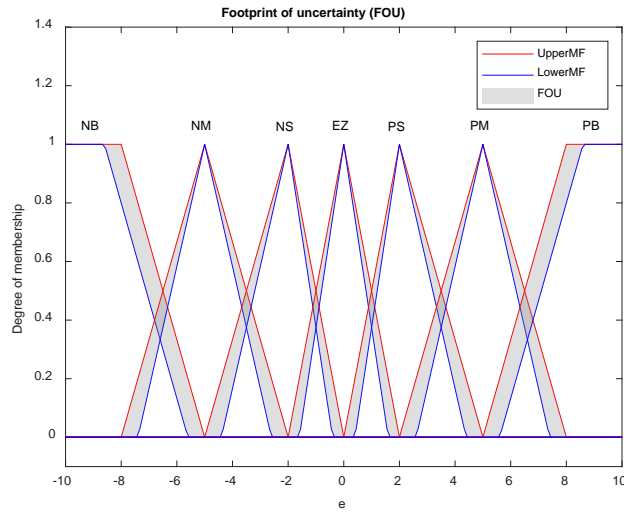


Fig3.5 fonction d'appartenance de l'erreur

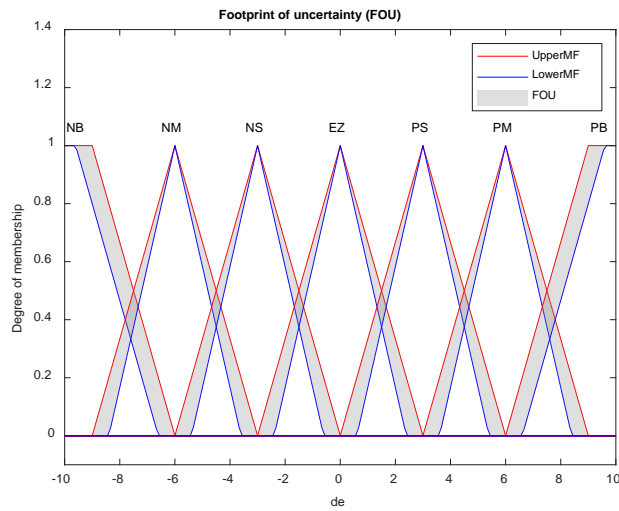


Fig. 3.6 fonction d'appartenance de la dérivée de l'erreur.

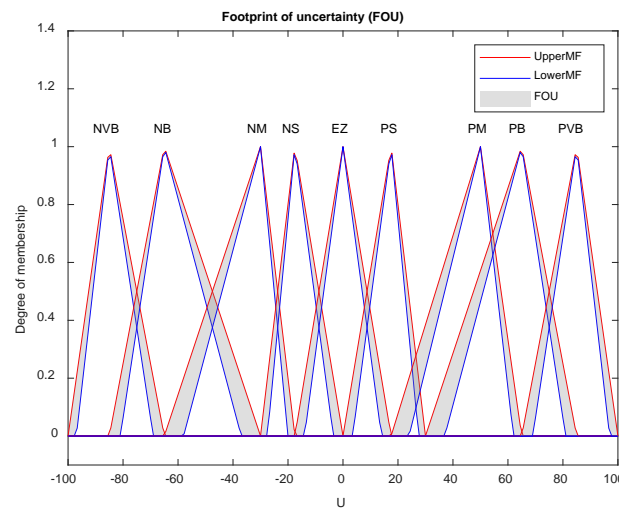
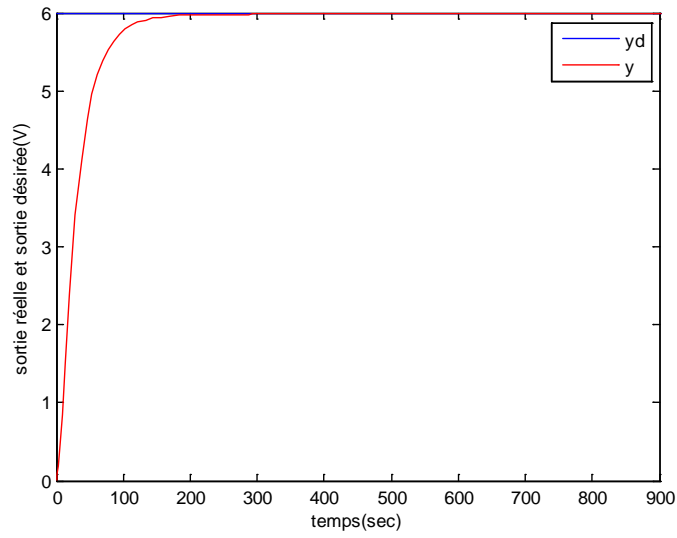


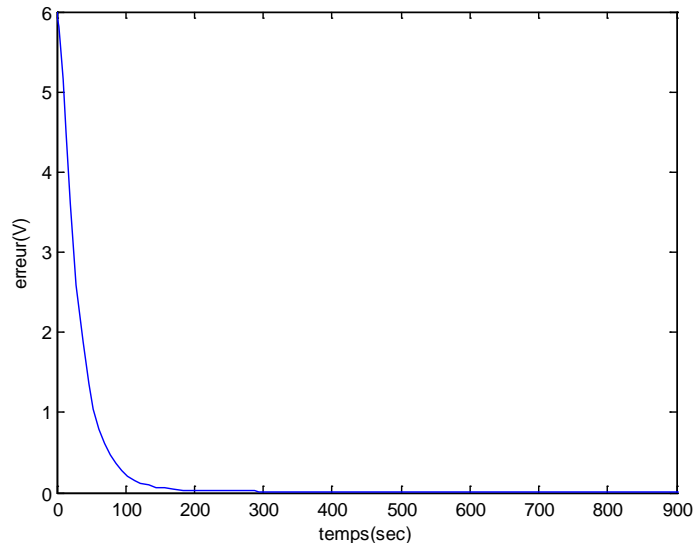
Fig. 3.7 fonction d'appartenance de la sortie.

Pour le régulateur de niveau la table des règles floues qui à servir ou mécanisme d'inférence est donné par le tableau 2.3 (chapitre2)

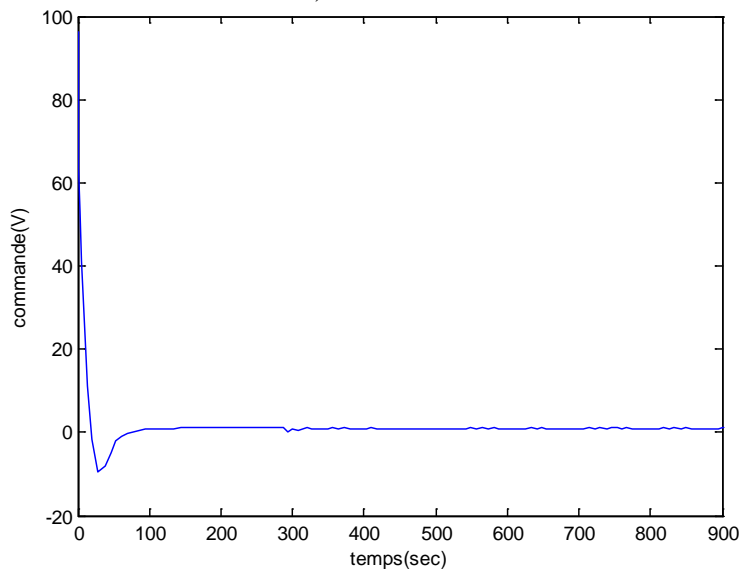
3.6.1 Résultats de simulation



a): la sortie.

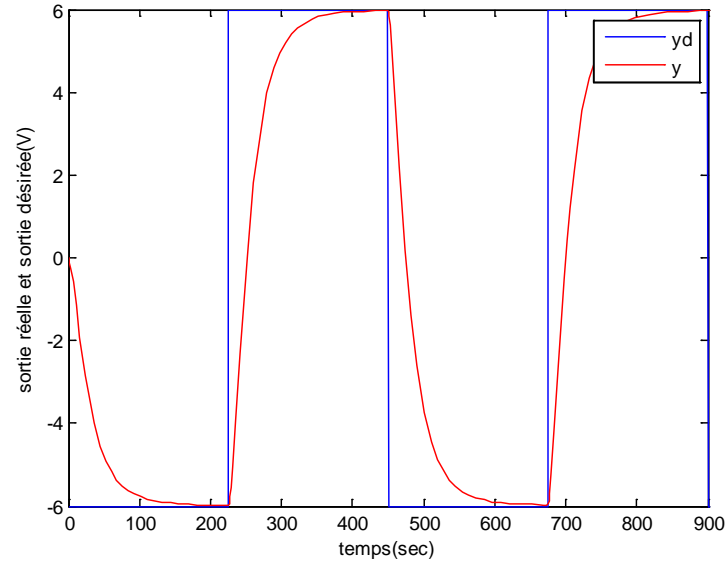


b): l'erreur.

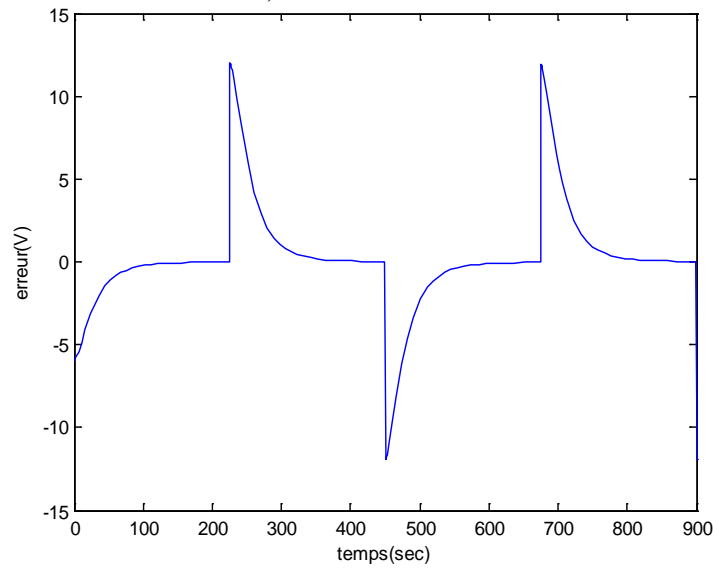


c): la commande.

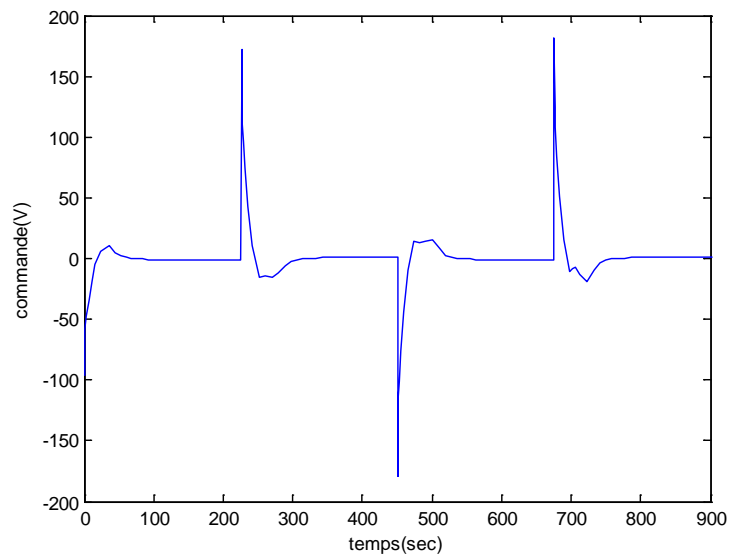
Fig.3.8 résultats de simulation de la commande par logique floue type 2, pour une entrée échelon.



a): la sortie



b): l'erreur.



c): la commande.

Fig.3.9 résultats de simulation de la commande par logique floue type 2, pour une entrée carrée.

2.6.2 Commentaires sur les résultats

On peut voir clairement que les trajectoires de sorties convergent rapidement vers les valeurs désirées même en présence de la perturbation externe.

Les résultats illustrent que la loi de commande de logique floue type-2 donne de meilleures performances comparée à la loi de commande floue type-1, à savoir le temps de réponse et la précision de convergence vers leurs valeurs désirées.

3.7 Conclusion

Ce chapitre est une étude détaillée des systèmes flous *type-2*. Parmi les points que nous avons traité on peut citer : les opérations sur les ensembles flous *type-2*, qui consiste une généralisation des opérations des ensembles flous *type-1*, la structure des systèmes et contrôleurs flous *type-2*, et surtout, d'une manière plus détaillée, le traitement de la sortie de ces derniers qui exige d'abord la réduction de type puis la défuzzification. Pour ne pas rester dans le cadre descriptif, nous avons fait état de deux exemples d'application.

Conclusion générale

L'étude présentée dans ce mémoire a pour objectif de comparer deux types de commande d'intelligence artificielle, et montre qu'ils peuvent être utilisés pour commander des systèmes non linéaires. Nous sommes intéressés à la commande d'un système hydraulique à deux réservoirs couplés.

En premier lieu, nous avons présenté le modèle dynamique non linéaire d'un système hydraulique à deux réservoirs couplés. Puis nous avons appliqué deux techniques de commande, la commande basée sur contrôleur floue *type-1* et la commande par contrôleur floue *type-2*. Ainsi, on peut résumer le travail effectué dans ce mémoire comme suit :

La modélisation d'un système hydraulique à deux réservoirs couplés, en l'occurrence, le système hydraulique CE105 a été présenté en premier lieu. Le modèle d'état obtenu est un modèle dynamique non linéaire de deuxième ordre où les variables d'état sont les niveaux du liquide dans les deux réservoirs. La variable de sortie étant le niveau dans le deuxième réservoir. La variable d'entrée de commande étant la tension d'alimentation de la pompe qui alimente le premier réservoir.

La commande par la logique floue a été présentée en deuxième lieu. Cette technique est une approche au raisonnement humain. Dans ce lieu on a vu les étapes et les méthodes les plus répandus pour la réalisation d'un système basé sur la logique floue. Les fonctions d'appartenances sont le cœur de la logique floue, et ce sont eux qui mettent la différence entre la logique classique (booléenne) et la logique floue. L'inférence est où l'expérience humaine détermine la manière de raisonnement du système. Et l'agrégation c'est où le système prend le rôle de l'être humain et commence à raisonner et de défuzzifier ensuite pour donner des résultats. La commande floue est caractérisée par :

- Son aptitude à appréhender des problèmes tels que non linéarités et retards
- Possibilité de prise en compte d'objectifs contradictoires
- L'utilisation du savoir d'un expert sur la façon de piloter le système et donc la suppression de la procédure de modélisation mathématique du processus à commander.

La logique floue classique appelée aujourd'hui logique floue *type-1* a été généralisée vers une nouvelle logique floue appelée logique floue *type-2*. Ce dernier a été présenté en troisième lieu. Ces dernières années, Mendel et ses collègues ont beaucoup travaillé sur cette nouvelle logique, ils ont bâti son fondement théorique, et ils ont démontré son efficacité et sa supériorité par rapport à la logique floue *type-1*.

Conclusion générale

Enfin, les résultats de simulation ont montré la supériorité des régulateurs flous *type-2* par rapport aux régulateurs flous *type-1*, pour ce type des systèmes.

Suggestions et perspectives

Suite à cette étude, quelques suggestions et perspectives peuvent être faites afin de pouvoir contribuer si possible les systèmes hydrauliques, à savoir :

- Application des techniques de réglage de l'automatique moderne à savoir la commande non linéaire, la fusion des réseaux de neurones avec les techniques flous *type-2*, la commande par mode glissant et mode glissant d'ordre supérieur, commande par la méthode du backstepping, commande hybride glissante-backstepping etc ...

Annexe

Les paramètres du système hydraulique CE105 sont donnés au tableau 1 :

Section du chaque réservoir	A	9350.10^{-6} m^2
Section de l'ouverture variable de chaque valve	s_1	$78.5. 10^{-6} \text{ m}^2$
	s_2	$78.5. 10^{-6} \text{ m}^2$
Coefficient de décharge	a_{12}	1
	a_0	0.6
Gain de la pompe	K_p	$450.10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s.v}$
Gain du capteur	K_s	41 v/m
Constante de gravité	g	9.81 m/sec^2

Tableau 1 : Paramètres du Système Hydraulique [40].

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] A. Kaufman, ‘ Introduction à la théorie des sous-ensembles flous’, Tome1, Masson, 1973.
- [2] L. A. Zadeh, ‘Fuzzy sets,’ Information and control, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [3] L. Gacogne, ‘Elément de logique floue,’ Hermes, 1997.
- [4] J. M. Mendel, ‘Type-2 fuzzy sets made simple,’ IEEE transactions on fuzzy systems, vol. 10, no. 2, avril 2002.
- [5] A. Mahir « Système hydraulique », Université Lille1 Projet IMA4.
- [6] Cite web, https://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_drive_system.
- [7] Cite web,
http://ressources.chateauversailles.fr/IMG/pdf/le_systeme_hydraulique_chronologie_dtra_vaux_d_adduction.pdf.
- [8] Cite web, https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_de_Marly.
- [9] Cite web, <https://andrenotre.com/2012/04/30/bassin-dappolon-jardins-de-versailles-chevaux-sous-les-grandes-eaux/>.
- [10] M. Boubakir, « Méthodes de commande par mode de glissement appliquées au bras manipulateur et au système hydraulique CE105 à réservoirs couplés», Ecole Militaire Polytechnique, Mémoire de magistère, 2007.
- [11] A. Boubakir, F. Boudjema, S. Labiod, A neuro-fuzzy-sliding mode controller using nonlinear sliding surface applied to the coupled tanks system, International Journal of Automation and Computing, Vol. 06, pp. 72-80, February 2009.
- [12] Manuel d’utilisation, “TecQuipment CE105 Coupled Tanks Apparatus”, Control Systems, UMIST, Manchester, U, K.
- [13] Zadeh, L. A. Soft computing and fuzzy logic. *IEEE Software*, 11(6), pp 48-56, 1994
- [14] Mamdani, E.H., Assilian, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *Int. J. Man Mach. Studies*, 7(1): 1–13, 1975.

Références bibliographiques

- [15] Y. Bekakra. « Contribution à l'étude et à la commande robuste d'un aérogénérateur asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2014.
- [16] Ostergaad, J.J. Fuzzy logic control of a heat exchange process. in Fuzzy Automata and Decision Processes, M.M. Gupta, G.N. Saridis, and B.R. Gaines,Eds., pages 285–320, 1977.
- [17] Willaeyts, D., Malvache, N. Use of fuzzy model for process control. IEEE International Conference on Cybernetics and Society, 1978.
- [18] Tamakawa, T. High speed fuzzy controller hardware system. Proc. 2nd Fuzzy System Symp., pages 122–130, 1986.
- [19] Rémi Dubois Application des nouvelles méthodes d'apprentissage à la détection précoce d'anomalies en électrocardiographie Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie -Paris VI (Janvier 2004).
- [20] Mme OUISSI Fatima Zohra, « Classification des arythmies cardiaques par les arbres de décision flous », thèse de master, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2011.
- [21] Jang, J.-S. R.ANFIS : Adaptive-network-based fuzzy inference systems. IEEE Trans. Syst. Man and Cybern., 23(3) :665–685, 1993.
- [22] K.M. Passino and S. Yurkovich, Fuzzy Control, Reading, MA :Addison-Wesley, 1998.
- [23] Pierre GABRIEL : 'Introduction à la Logique Floue et à la Commande Floue' exposé, 2000-2001.
- [24] K.wang et H. Lee : 'First Course on Fuzzy Theory and Applications', Springer, Berlin, 2005.
- [25] Antoine Cornuéjols : 'Introduction à la logique floue', présentation, janvier2008.
- [26] Gacogne. Louis, 'Eléments de logique floue', Paris, Hermès, 1997.
- [27] Nakoula Y : 'Apprentissage des Modèles linguistiques flous, par jeu de règles pondérées', Thèse de Doctorat, Université de Savoie, France, juillet 1997.

Références bibliographiques

- [28] Faucher J , ‘les plans d’expériences pour le réglage et commande à base logique floue’
Thèse de Doctorat Spécialité Génie Electrique et Automatique, Institut national
polytechnique de Toulouse.
- [29] L. A. Zadeh, « Fuzzy sets, fuzzy logic and fuzzy systems», World Scientific Publishing
1996.
- [30] N. N. Karnik, et J. M. Mendel, “An introduction to type-2 fuzzy logic systems,” Univ.
Southern California, Rep., Oct. 1998.
- [31] Q. Liang, N. N. Karnik et J. M. Mendel, “Connection admission control in ATM networks
using survey-based type-2 fuzzy logic systems,” IEEE Trans. Syst., vol. 30,no. 3, pp.
329-339, Aug. 2000.
- [32] N. N. Karnik, J. M. Mendel et Q. Liang, “Type-2 fuzzy logic systems,” IEEE Trans. Fuzzy
Syst., vol. 7, no. 6, pp. 643-658, Dec. 1999.
- [33] L. A. Zadeh, « Fuzzy sets, fuzzy logic and fuzzy systems», World Scientific Publishing
1996.
- [34] N. N. Karnik, et J. M. Mendel, « An introduction to type-2 fuzzy logic systems»,
Université. Southern California, Rep., Oct. 1998.
- [35] Q. Liang, N. N. Karnik et J. M. Mendel, « Connection admission control in ATM
networks using surveybased type-2 fuzzy logic systems », IEEE Trans. Syst., vol. 30, no.
3, pp. 329-339, Aug. 2000.
- [36] N. N. Karnik, et J. M. Mendel, « Operation on type-2 fuzzy sets », Int. J. Fuzzy Sets Syst.,
vol. 122, pp. 327-348, 2001.
- [37] N.N. Karnik et J.M. Mendel : ‘centroid of a type-2 fuzzy set’, Information
sciences,vol.132, issue.1-4, page.195-220, 2001.
- [38] Q. Liang et J. M. Mendel : ‘Interval type-2 fuzzy logic systems: Theory and design’, IEEE
Transactions, Fuzzy Systems, vol.8, issue.5, page 535-550, 2000.
- [39] N.N. Karnik et J.M. Mendel : ‘An introduction to type-2 Fuzzy Logic Systems’, Technical
Report, University of Southern California, 1998.

Références bibliographiques

- [40] A. Boubakir , F. Boudjema , C. Boubakir , N. Ikhlef, “Loi de Commande par Mode de Glissement avec Une Surface de Glissement Non Linéaire Appliquée au Système Hydraulique à Réservoirs Couplés”, 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007, 03-04 Novembre 2007, Sétif, Algérie.

Résumé

Le travail réalisé dans cette mémoire concerne la commande non linéaire d'un système hydraulique, en utilisant des approches issues de la théorie de la logique floue type1 et type2 et leurs applications sur le système hydraulique CE105. Dans une première partie, on a présenté un bref tour d'horizon sur les systèmes hydrauliques, puis la modélisation mathématique du système hydraulique CE105 et la commande par la logique floue type-1 et la commande par la logique floue type-2 du système hydraulique CE105. Des simulations sont effectuées pour valider chaque commande. Finalement les résultats obtenus de cette technique de commande robuste basée sur les systèmes flous type-2 du système hydraulique CE105 se traduisent par de meilleures performances dynamiques.

Mots clés : système hydraulique, CE105, commande non linéaire, logique floue type-1, floue type-2.

Abstract

The work concerns the nonlinear control of a hydraulic system, using approaches derived from type1 and type2 fuzzy logic theory and their applications on the hydraulic system CE105. In the first part, we presented a brief overview of the hydraulic systems, then the mathematical modeling of the hydraulic system CE105 and the type-1 fuzzy logic control and type-2 fuzzy logic control of the hydraulic system. CE105. Simulations are carried out to validate each order. Finally, the results obtained from this robust control technique based on fuzzy type-2 systems of the hydraulic system CE105 show superior performances.

Key words: hydraulic system, CE105, nonlinear control, type-1 fuzzy logic, type-2 fuzzy logic.