



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Ingénierie de la Maintenance en Instrumentation

Thème

Modélisation et conception des contrôleurs pour un système hydraulique à réservoirs couplés

Présenté et soutenu publiquement par :

CHAHMI Wahiba

et

TAHIDOUSTI Asmaa

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
AOUIMER Djebli	MAA	IMSI-Univ. D'Oran2	Présidente
MEKKI Ibrahim El Khalil	MCA	IMSI-Univ. D'Oran2	Encadreur
HAIMOUR Rachida	MCB	IMSI-Univ. D'Oran2	Examineur

Année 2019/2020



Remerciements

Avant tout nous remercions Dieu Le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur **Mekki Ibrahim El Khalil** pour avoir d'abord proposé ce thème, pour le suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire, et qui n'a pas cessé de nous donner des conseils et des remarques.*

Nous remercions également le président de jury et les membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.

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

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.





Dédicace

Je dédie ce projet :

A ma chère mère,

*Pour ma vie et ma bien aimée et tout dans ce monde,
ce projet a été accompli grâce à vous, Dieu voulait que vous commenciez mon projet
avec
moi et que vous me souteniez malgré votre maladie,
mais Dieu ne voulait pas que vous soyez avec moi le jour où j'ai obtenu mon diplôme et
voyez
ma réussite,
que Dieu ait pitié de toi, maman*

WAHIBA



Dédicace

Je dédie ce projet :

A mes chères parents,

Qui m'ont toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère. Et ma considération pour les sacrifices.

A l'homme, ma précieux offre du dieu, à qui je dois ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez. Vous représentez la source de mon bonheur. Puisse dieu vous préserve et vous donne une longue et joyeuse vie.

A tous les membres de ma famille,

Mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A tous mes amis,

Qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès. Merci pour leurs amours et leurs encouragements.

A mon amie Boudia Nesrine

Pour son aide et support dans les moments difficiles.

A ma chère binôme ,Chahmi wahiba

Pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

Asmaa

Sommaire

Liste des figures	
Liste de tableaux	
Introduction générale	01
Chapitre I : Instrumentation et régulation	
I.1-Introduction	02
I.2-Notion de système	02
I.2.1-Système linéaire	03
I.2.2 Système continu et système invariant	03
I.3-Contrôle industriel	03
I.3.1 Régulation.....	04
I. 3.1.1 Les types de régulation.....	04
a) Régulation par rétroaction, à boucle fermée.....	04
b) Régulation à boucle ouverte ou contrôle en chaîne ouverte.....	05
I. 3.1.2 Principe de fonctionnement.....	05
I.3.1.3 Régulation en cascade.....	05
I.3.1.4 Régulation en discontinu.....	06
a) Principe de régulation par tout ou rien, T ou R (ON-OFF).....	06
b) Caractéristiques du mode T ou R.....	06
I. 3.1.5 Régulation continue.....	07
I.3.1.6 Critères de performance d'une régulation.....	07
a) Stabilité.....	07
b) Paramètres de la réponse d'un système stable.....	08
I. 3.1.7 Régulation ou Asservissement.....	09
I.3.2Instrumentation.....	09
I.3.2.1 Signal de mesure.....	10

Sommaire

a) Signal analogique.....	10
b) Signal numérique.....	10
I.3.2.2 Technologie général d'un capteur /transmetteur.....	11
a) Capteur.....	11
b) Les différentes familles de capteurs.....	11
I. 3.2.3 Transmetteur.....	12
I.3.3 Instrument de mesure et de contrôle.....	12
I.3.3.1 Mesure et capteur de niveau.....	12
I.3.3.2 Instruments de contrôle.....	14
a) Vanne de régulation.....	14
b) Les pompes.....	15
I.4 Conclusion.....	16

Chapitre II : Description et modélisation du système hydraulique à réservoirs couplés

II.1 Introduction.....	17
II.2 L'hydraulique.....	17
II.3 Modélisation.....	17
II.4 Modèle à réservoir unique.....	17
II.4.1 Fonction de transfert.....	19
II.4.2 Espace d'état.....	19
II .5 Modélisation du système hydraulique CE105 à réservoirs couplés.....	20
II.5.1 Description du matériel.....	20
II.5.2 Pourquoi les systèmes à double réservoirs ?.....	21
II.5.3 Modélisation du CE105.....	22
II.5.4 Contrôle du niveau des réservoirs couplés.....	26

II.6 Conclusion..... 28

Chapitre III : Les contrôleurs appliqués sur CE105

III.1 Introduction..... 29

III.2 Commande PID..... 29

III.2.1 Principe..... 29

III.2.2 Les différentes structures du PID..... 32

III.2.3 Avantages et inconvénients..... 33

III.2.4 Application de la commande PID sur le système CE105..... 34

III.3 Commande par logique floue..... 34

III.3.1 Différentes formes des fonctions d'appartenances..... 34

III.3.2 Opération sur l'ensemble flou..... 35

III.3.3 Notion de variable linguistique..... 36

III.3.4 Commande par logique floue..... 36

III.3.4.1 Base de connaissance..... 37

III.3.4.2 Fuzzification..... 37

III.3.4.3 Inférence..... 37

III.3.4.4 Défuzzification..... 37

III.4 Conclusion..... 38

Chapitre IV : Etude comparative

IV.1 Introduction..... 39

IV.2 Résultats de simulation..... 39

IV.2.1 Résultats de simulations par application de la commande PID..... 39

IV.2.2 Commentaires des résultats obtenus par la commande PID..... 41

IV.4 Résultats de simulation de la commande logique floue..... 41

IV.5 Commentaire des résultats obtenus avec commande floue..... 46

IV.6 Etude comparative..... 46

Sommaire

IV.7 Commentaire sur les résultats des tableaux.....	47
IV.8 Conclusion.....	47
Conclusion Générale.....	48
Bibliographie.....	49

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma bloc d'un système.....	02
Figure I.2: Système invariant... ..	03
Figure I.3: Schéma de principe de fonctionnement d'une régulation.....	05
Figure I.4 : Réponse indicielle d'un système stable.....	07
Figure I.5: Réponse indicielle d'un système instable.....	07
Figure I.6 : L'erreur statique en régime stable.....	08
Figure I.7 : Système très amortie.....	08
Figure I.8 : Système bien amortie.....	08
Figure I.9: Réponse oscillatoire amortie.....	09
Figure I.10 : Différent types de signaux.....	10
Figure I.11 : schéma d'un capteur.....	11
Figure I.12 : Niveau par plongeur à tube de torsion.....	13
Figure I.13 : Principe d'une sonde capacitive de niveau.....	13
Figure I.14 : Eléments internes d'une vanne.....	15
Figure I.15 : Pompe centrifuge.	16
Figure II.1: Un système de niveau de fluide à réservoir unique.....	17
Figure II.2 : Présentation du système hydraulique CE105 à réservoirs couplés.....	21
Figure II.3 : Système hydraulique CE105 à réservoirs couplés.....	22
Figure II.4: Modélisation des réservoirs couplés CE 105 en Simulink.....	27
Figure II.5: Bloc Simulink des réservoirs couplés CE 105 en boucle ouverte (sans contrôleur)...	27
Figure III.1 : Régulateur PID.....	29
Figure III.2 : L'effet de l'addition Kp (Ki , and Kd) est resté constant.....	30
Figure III.3 : L'effet de l'addition Ki (Kp , and Kd) est resté constant.....	31
Figure III.4 : L'effet de l'addition Kd (Kp , and Ki) est resté constant.....	32
Figure III.5 : La structure parallèle.....	32
Figure III.6 : La structure mixte.....	33
Figure III.7 : La structure série.....	33
Figure III.8 : Schéma bloc de la régulateur PID appliquée au système hydraulique CE105.....	34
Figure III.9 : Schéma synoptique d'un régulateur floue en boucle fermé.....	37
Figure IV.1 : Bloc Simulink des réservoirs couplés CE 105 avec contrôleur PID.....	39
Figure IV.2: Résultats de simulation de la commande PID.....	40
Figure IV.3 : Bloc Simulink des réservoirs couplés CE 105 avec la logique floue.....	41
Figure IV.4 : Identification des entrées et de sortie.....	42
Figure IV.5 : Fonction d'appartenance de l'erreur.....	42
Figure IV.6 : Fonction d'appartenance de la dérivé d'erreur.....	43
Figure IV.7 : Fonction d'appartenance de la commande.....	43

Liste des figures

Figure IV.8 : Implémentation des règles d'inférences.....	44
Figure IV.9 : Résultats de simulation de la commande Floue.....	46

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Capteurs passives.....	12
Tableau II.1 : Paramètres du système hydraulique.....	26
Tableau III.1 : Les formes les plus utilisées de la fonction d'appartenance.....	35
Tableau IV.1 : Table de règles.....	44
Tableau IV.2 : Etude comparative entre flou et PID lors de premier changement de consigne.....	46
Tableau IV.3 : Etude comparative entre flou et PID lors de deuxième changement de consigne.....	47

Symboles et variables

Symboles :

Q_e : le débit d'entrée génère 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_h : 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

(K_p, K_d) : Les gains de l'action proportionnelle et d'rivée

e : l'écart entre la sortie et la consigne

Δe : variation de l'erreur



Introduction Générale

Introduction générale

La régulation de niveau de liquide dans les systèmes hydrauliques à réservoirs couplés est un problème classique de la régulation industrielle. En général, de nombreuses applications industrielles sont concernées par la régulation de niveau telle que la colonne à distillation, les chaudières, et les raffineries de pétrole dans les industries pétrochimiques. De nos jours, les industries de transformation telles que les industries pétrochimiques, la fabrication du papier et le traitement des eaux exigent que les liquides soient pompés, stockés dans des réservoirs. La régulation du niveau du liquide dans les réservoirs et du débit entre les réservoirs est un problème fondamental dans les industries de transformation [WEL93], [BOU07].

La plupart des méthodes de synthèse de lois de commande se basent sur un modèle mathématique du système à commander. Certaines de ces techniques exigent une très bonne connaissance du modèle, sous peine de dégradation importante des performances, voire de perte de stabilité. Or, les systèmes réels ont très souvent un comportement différent des modèles mathématiques, à cause de variations de paramètres, de phénomènes physiques négligés, de perturbations extérieures, . . . Et même lorsque l'on a un très bon modèle à disposition, il arrive fréquemment qu'il soit trop complexe, et doive être simplifié pour pouvoir synthétiser une commande. Un remède consiste à calculer la loi de commande pour une famille de modèles à laquelle le système réel est censé appartenir.

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

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

Ce travail permet un contrôle de tous les résultats appliqués au système hydraulique réservoirs couplés CE105. Il est constitué de quatre chapitres organisés de la façon suivante :

Nous présentons dans le premier chapitre, des notions introductives au système hydraulique ainsi que la régulation de niveau et de température dans un réservoir de manière générale.

Dans le deuxième chapitre, on 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.

Nous présentons dans le troisième chapitre les différents types des régulateurs P, PI, PID, leur principe de fonctionnement, leurs avantages et inconvénients et l'application de la commande PID sur le système CE105 puis les aspects théoriques de la logique floue et ses applications sur le modèle de ce système.

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

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale dans laquelle nous donnerons les futures perspectives et les améliorations de ce travail.



CHAPITRE I

I.1 Introduction

Le socle élémentaire qui constitue la base de chaque processus industriel se subdivise en deux parties distinctes néanmoins largement liées : l'instrumentation et la régulation. Rien que l'instrumentation constitue un vaste domaine, elle regroupe principalement l'ensemble des appareils de mesure de certains paramètres physiques de la centrale : les pressions, le débit, les niveaux et la température notamment et qui fournissent un signal proportionnel à la valeur de cette mesure. Cependant, la majorité des processus industriels sont sensibles et nécessite une supervision constante, et c'est là qu'intervient la régulation.

La régulation regroupe l'ensemble des moyens matériels et techniques mis en œuvre pour maintenir une grandeur physique à régler, égale à une valeur désirée, appelé consigne. Ce chapitre est divisé en deux parties : une partie qui parle de la régulation et l'autre de l'instrumentation, donc nous allons discuter des notions fondamentales et générales de l'automatique comme les notions de système et de régulation ainsi que quelques généralités sur l'instrumentation industrielle avec quelques définitions des instruments de mesures.

I.2 Notion de système

Un système ou processus peut être défini comme un ensemble d'éléments exerçant collectivement une fonction déterminée. Un système communique avec l'extérieur par l'intermédiaire de grandeurs, fonctions du temps, appelées signaux. Un système peut être représenté schématiquement de la manière suivante :

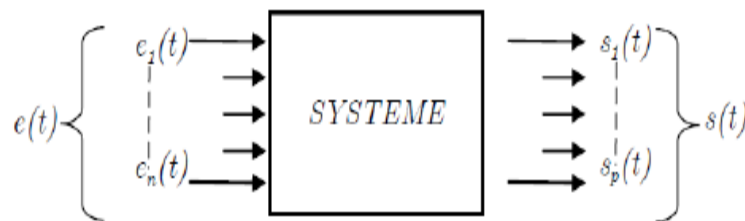


Figure I.1: Schéma bloc d'un système.

Où $e(t)$ est un ou plusieurs signaux d'entrée (excitation, cause ou sollicitation) et $s(t)$ est un ou plusieurs signaux de sortie (ou réponses), t étant la variable temps. En général, ces signaux (d'entrée et de sortie) ne sont pas de même nature. Les grandeurs d'entrée sont les grandeurs qui agissent sur le système. Il en existe deux types :

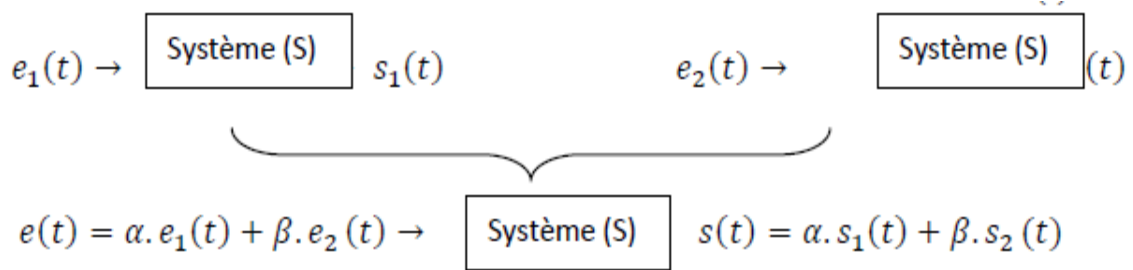
- Perturbations : Celles que l'on ne peut pas maîtriser.
- Commandes : Celles que l'on peut maîtriser.

Les signaux de sortie d'un système sont aussi appelés réponse du système.

Un système possédant une seule entrée est dit mono variable, si de plus il possède une seule sortie, il est dit scalaire. Pour observer les grandeurs de sortie, on utilise des capteurs. C'est l'information de ces capteurs qui va permettre d'élaborer la commande.

I.2.1 Système linéaire

Un système est dit linéaire si la réponse de ce système à une combinaison linéaire des signaux d'entrée est égale à la combinaison linéaire des signaux de sortie:
 $e(t) = \alpha.e_1(t) + \beta.e_2(t)$



Cette propriété est appelée aussi principe de superposition.

I.2.2 Système continu et système invariant

Un système est dit continu lorsque les variations des grandeurs physiques le caractérisant sont des fonctions du type $f(t)$, avec le temps t . On oppose les systèmes continus aux systèmes discrets (ou échantillonnés), par exemple les systèmes informatiques. Un système est dit invariant si la réponse du système à un signal $x(t)$ différé d'un temps t est la même que la réponse $y(t)$ du système mais différée de τ . Système invariant : On dit qu'un système est invariant lorsque les caractéristiques de comportement ne se modifient pas avec le temps [KAD13].

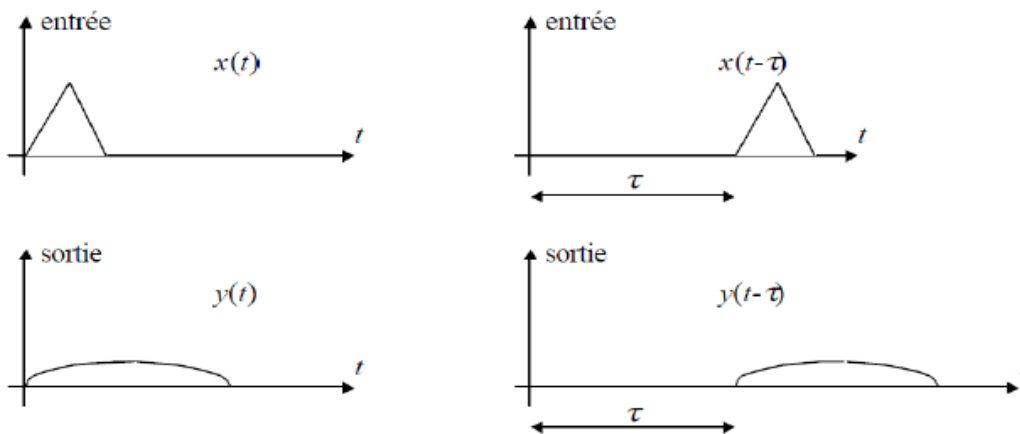


Figure I.2: Système invariant.

I.3 Contrôle industriel :

Pour garantir les qualités et les quantités du produit fabriqué, il est nécessaire de déployer des moyens d'observation, de réflexion et d'action sur le procédé ; c'est le rôle du contrôle industriel englobant les domaines de l'instrumentation et de la régulation.

I.3.1 Régulation

La régulation regroupe l'ensemble des techniques utilisées visant à contrôler une grandeur physique. Exemples de grandeur physique : Pression, température, débit, niveau.

- La grandeur réglée, c'est la grandeur physique que l'on désire contrôler. Elle donne son nom à la régulation. Exemple : une régulation de température.
- La consigne : C'est la valeur que doit prendre la grandeur réglée.
- La grandeur réglant est la grandeur physique qui a été choisie pour contrôler la grandeur réglée. Elle n'est généralement pas de même nature que la grandeur réglée.
- Les grandeurs perturbatrices sont les grandeurs physiques qui influencent la grandeur réglée. Elles ne sont généralement pas de même nature que la grandeur réglée.
- L'organe de réglage est l'élément qui agit sur la grandeur régnante [GAT19].

I. 3.1.1 Les types de régulation

Il existe deux types de régulation :

- Soit en boucle fermée, ou par rétroaction.
- Soit en boucle ouverte, ou en chaîne ouverte.

La régulation en boucle fermée est de loin la plus utilisée.

a) Régulation par rétroaction, à boucle fermée

Une boucle fermée de régulation par rétroaction, ou par feedback (ClosedLoop ou Feedback Control) est constituée suite d'éléments interalliés,

La variable à réguler, est mesurée d'une façon continue à l'aide d'un capteur et d'un transmetteur. Le signal correspondant transmis par le transmetteur est comparé par le régulateur au signal de consigne qui représente la valeur désirée au que la valeur à régler doit être maintenue. Le régulateur modifie le signal de correction ou de sortie en fonction de l'écart entre le signal de mesure et le signal de consigne.

Le signal de correction, en agissant sur le servomoteur modulateur de la pompe doseuse du réactif dosé. Modifie le débit de la grandeur régulant dans le sens qui tend à annuler l'écart.

Le système de régulation à boucle fermée se distingue par son signal de rétroaction, grâce auquel la valeur de la grandeur réglée est continuellement vérifiée.

Ce type de rétroaction, qu'on appelle « rétroaction négative », consiste donc à retourner le signal de mesure, représente la variable, vers le régulateur.

b) Régulation à boucle ouverte ou contrôle en chaîne ouverte

La régulation à boucle ouverte (Open Loop Control), ou plus correctement la commande en chaîne ouverte, est caractérisée par l'absence du signal de rétroaction. Ce type de contrôle est utilisé notamment dans la régulation par anticipation (Feedforward control). Dans l'exemple illustré à la figure, la chaîne ouverte représente une boucle auxiliaire greffée à la boucle principale fermée. Son but est d'éliminer, ou de minimiser, l'influence de l'une ou de l'autre des grandeurs perturbatrices sur la valeur à réguler.

Notons que la régulation en boucle fermée ou en chaîne ouverte toutes s'effectuer automatiquement ou manuellement. La boucle ouverte, ou chaîne ouverte, ne se caractérise donc nullement par la commande manuelle mais bien par l'absence de feedback, ou de rétroaction [BSA94].

I. 3.1.2 Principe de fonctionnement

Pour réguler un système physique, il faut :

- Mesurer la grandeur réglée avec un capteur.
- Réfléchir sur l'attitude à suivre : c'est la fonction du régulateur. Le régulateur compare la grandeur réglée avec la consigne et élabore le signal de commande.
- Agir sur la grandeur régnante par l'intermédiaire d'un organe de réglage. On peut représenter une régulation de la manière suivante : [GAT19]

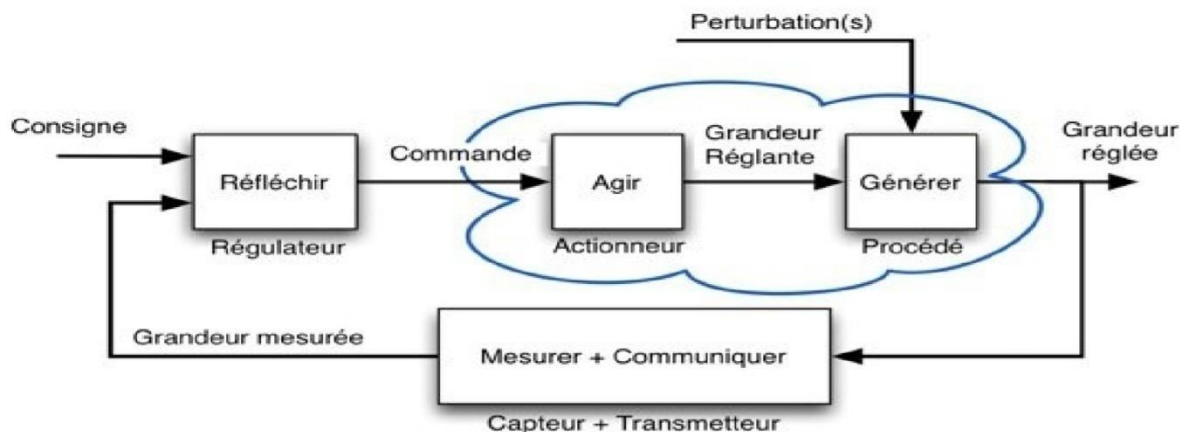


Figure I.3: Schéma de principe de fonctionnement d'une régulation.

I.3.1.3 Régulation en cascade

La régulation en cascade sert à améliorer la stabilité de la boucle fermée simple sur les procédés à grande inertie en diminuant les effets d'une ou plusieurs grandeurs perturbatrices qui agissent :

- Soit la grandeur régnante
- Soit sur une autre grandeur appelée grandeur intermédiaire.

Ceci est obtenu en rajoutant une boucle rapide, ce qui conduit généralement à deux boucles fermées imbriquées, l'une interne, l'autre externe.

Pour que la cascade soit justifiée, il faut que la boucle interne soit beaucoup plus rapide que la boucle externe sur ce type de régulation, on trouve en général deux points de mesure, deux régulateurs et un organe de réglage [PIG05].

I.3.1.4 Régulation en discontinu

Dans la régulation à action discontinue, encore appelée action par échelon, le signal de sortie du régulateur ne peut prendre qu'un nombre fini de valeurs, dans cette régulation à multipositions, le signal de commande de l'élément final ne peut pas prendre de valeurs intermédiaires entre certaines positions données fixées.

Parmi la régulation à multipositions, celle à deux positions est la plus utilisée. Les deux positions sont des positions extrêmes qui peuvent être :

- Plus ou moins où les deux valeurs sont de signes contraires ;
- Tout ou peu où la valeur extrême minimale n'est pas nulle.
- Tout ou rien où l'une des valeurs extrêmes est nulle.

Le dernier mode est, de loin, le plus utilisé.

a) Principe de régulation par tout ou rien, T ou R (ON-OFF)

L'intelligence, ou la faculté de « connaître », de ce type de régulation est limitée au sens de l'écart. En effet, le régulateur à tout ou rien ne perçoit que la position de la variable à réguler par rapport à la consigne ; il peut donc distinguer si la valeur de l'écart $e = (x-x_0)$ évasât positive ou négative :

- x : valeur de la variable du procédé
- x_0 : valeur de consigne
- e : écart $x-x_0$

Le signal de sortie du régulateur ne peut donc prendre que deux valeurs extrêmes, limites minimales ou maximales soient 0% ou 100% qui correspondent, dans le cas d'une vanne, à sa position fermée et à la position complètement ouverte ; on peut alors définir, dans le cas de l'action directe :

- 100% si $e > 0$
- 0% si $e < 0$

b) Caractéristiques du mode T ou R

- Avantage

- Simplicité et coût peu élevé.

- Inconvénient

Corrections extrêmes sans tenir compte de l'ampleur de l'écart de sa vitesse de variation :

- Mauvaise précision ;
- Oscillations.

I. 3.1.5 Régulation continue

La plupart des régulations industrielles sont effectuées par les modes d'action continue où, à chaque valeur de l'écart à l'intérieur de l'étendue de régulation, correspond une valeur déterminée et unique, du signal de sortie du régulateur.

Le signal de sorties ou de correction peut prendre tous les valeurs comprises entre la portée maximale et la portée minimale de son entendue. Le mode d'action continue, qui peut imposer au signal de sortie une variation continue entre deux limites déterminées, est aussi appelé progressif.

L'intelligence ou la perception des régulateurs à action continue va au-delà du seul signe de l'écart ($x-x_0$) et, selon cette perception, les modes en continu sont classés en trois catégories :

- L'action proportionnelle P ;
- L'action intégrale I ;
- L'action dérivée D [BSA94].

I.3.1.6 Critères de performance d'une régulation

a) Stabilité

Le système constitué du procédé et de la boucle de régulation est dit stable, si soumis à une variation de consigne, la mesure retrouve un état stable, dans le cas contraire le système est dit instable.

Pour un système stable, le temps écoulé pour retrouver la stabilité constitue le régime transitoire.

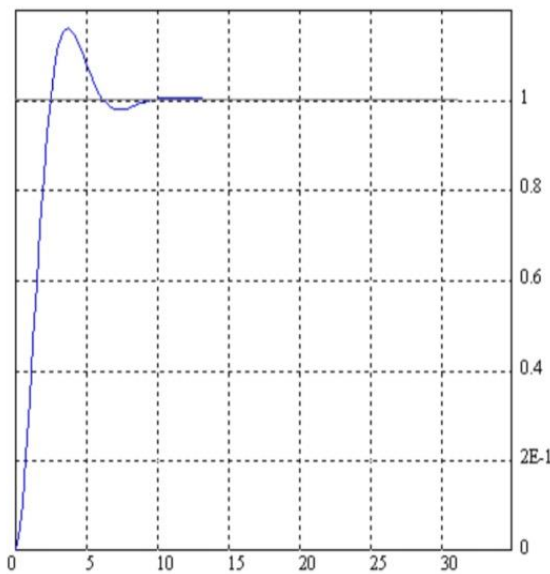


Figure I.4 : Réponse indicielle d'un système stable

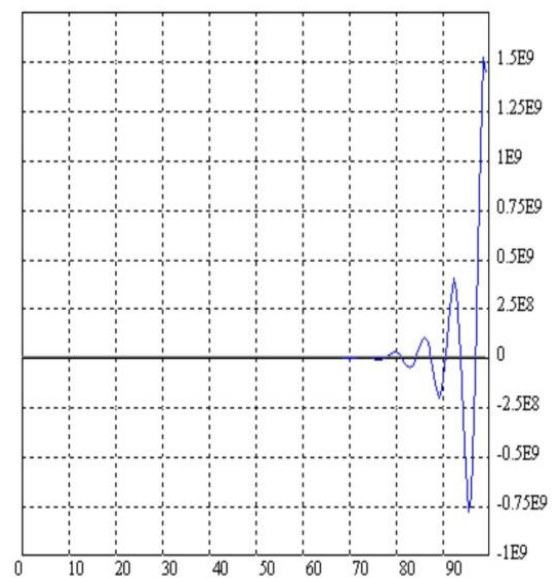


Figure I.5: Réponse indicielle d'un système instable

b) Paramètres de la réponse d'un système stable

- Précision

Elle est définie à partir de l'erreur statique ϵ en régime stable comme le montre la figure suivante :

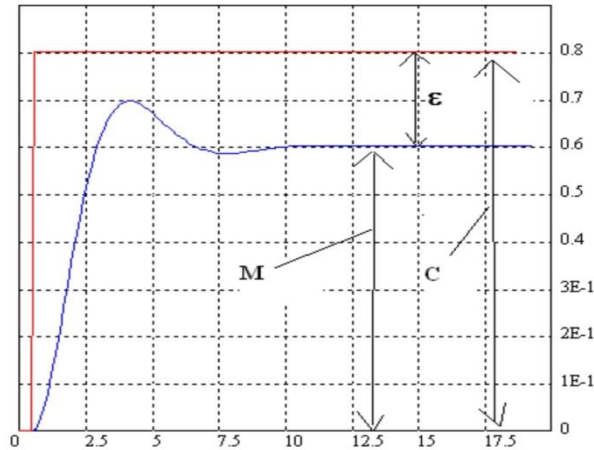


Figure I.6 : L'erreur statique en régime stable

-Amortissement

Il est défini par l'allure de la réponse. Les différents types de réponses sont représentés par les figures suivantes :

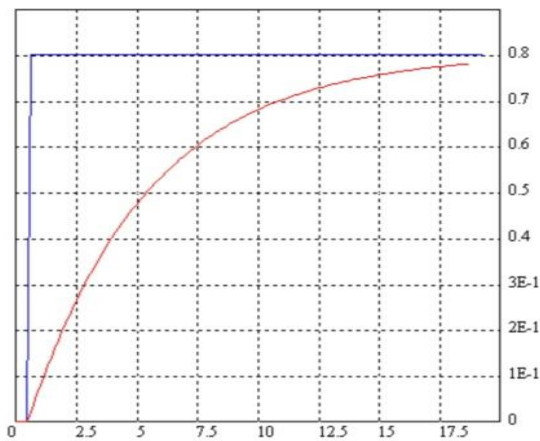


Figure I.7 : Système très amortie

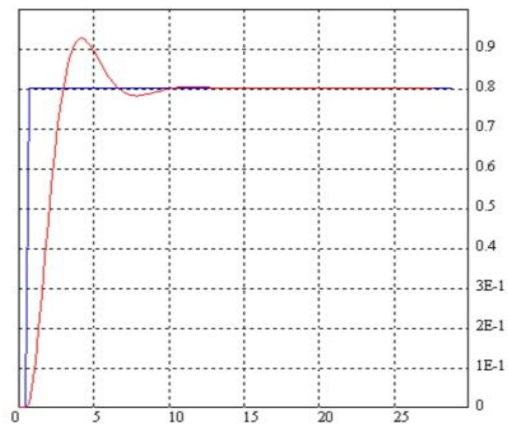


Figure I.8 : Système bien amortie

-Rapidité

Elle traduit pratiquement la durée transitoire. Plus précisément, elle s'exprime par le temps de réponse T_e ou temps d'établissement, qui est le temps mis par la mesure pour atteindre sa valeur définitive à $\pm 5\%$ de sa variation tout en se maintenant dans cette zone des $\pm 5\%$.

Rapidité = temps de réponse T_e [PIG05].

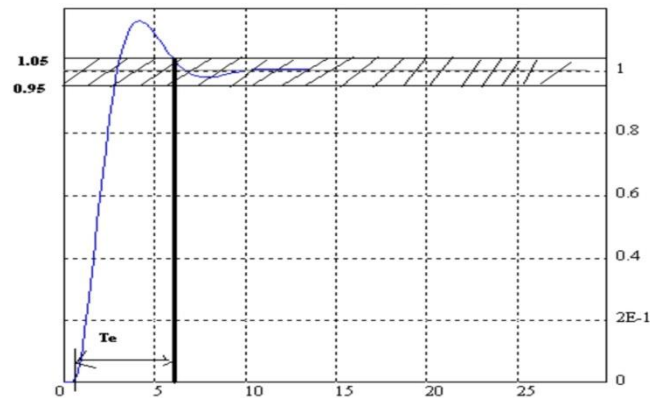


Figure I.9: Réponse oscillatoire amortie.

I. 3.1.7 Régulation ou Asservissement

Il s'agit d'asservissement lorsque la grandeur réglée suit une grandeur de référence variable. La grandeur réglée devra suivre rapidement les variations de la consigne (la poursuite par la sortie d'une consigne variable dans le temps).

But : suivre la consigne, quelles que soient ses variations (l'effet des perturbations est supposé nul). Exemples : table traçante, machine-outil usinant une pièce selon un profil donné, missile poursuivant une cible. . .

On parle de régulation quand la grandeur réglée s'aligne avec une grandeur de consigne (la consigne restant fixe).

But : la consigne étant fixe, la sortie doit compenser l'effet des perturbations. Exemples : régulateur de vitesse, thermostat, pilote automatique d'avion [KAD13].

I.3.2 Instrumentation

L'instrumentation est un domaine comprenant les méthodes d'implantation, de réglages et d'exploitation de tous les appareils de mesure, de calcul et d'action nécessaires à la maîtrise du processus industriel, y compris les aspects de protection et de sécurité.

L'instrumentation liée à l'observation est assurée par les capteurs, transmetteurs et indicateurs qui fournissent les mesures continues et les détecteurs délivrant une information binaire.

L'instrumentation permettant l'action concerne les organes de réglage tels que les vannes régulatrices, les ventilateurs, les pompes, les résistances de puissance électrique, et les pré-actionneurs comme les convertisseurs de signaux, les positionneurs, et les variateurs de vitesse.

Toutes les cartes d'entrées et de sorties des régulateurs et des automates programmables industriels (API) font partie de l'instrumentation [PRO09].

I.3.2.1 Signal de mesure

a) Signal analogique

Un signal analogique est un signal qui varie de façon continue au cours du temps. Par exemple, la température d'un lieu au cours d'un mois est une grandeur analogique. Lors d'une copie d'un signal analogique, le principe de l'analogique est de reproduire le signal à enregistrer (audio, vidéo...) le plus fidèlement possible sur un support (magnétique en général). Ainsi, lorsqu'on copie un signal analogique, l'amplitude électrique du signal analogique sera l'image plus ou moins fidèle du signal à enregistrer (audio, vidéo...). Un tel signal présente l'inconvénient d'être sensible à toute perturbation électromagnétique.

b) Signal numérique

Un signal numérique est un signal qui varie de façon discrète dans le temps. C'est une succession de 0 et de 1, appelés bits. On dit qu'il est binaire.

Le signal analogique à enregistrer est converti en signal numérique grâce à un convertisseur analogique/ numérique (CAN). Le CAN traduit le signal en une séquence de nombres binaires. Après cette conversion, le signal numérique n'est plus qu'une suite de 0 et de 1, au contraire de l'analogique, qui peut prendre une infinité de valeurs possibles.

L'aspect numérique du signal ne sert qu'au transport, au stockage et au traitement des données. Un signal numérique est beaucoup plus facile à reproduire qu'un signal analogique : la copie numérique produit un clone parfait de l'original. Il est aussi très facile à traiter avec l'informatique. De plus, un tel signal est insensible aux perturbations électromagnétiques, car les valeurs des tensions sont distinctes. Par contre, lors de la recombinaison, le signal recomposé n'est pas la copie conforme du signal analogique de départ : il présente des échelettes.

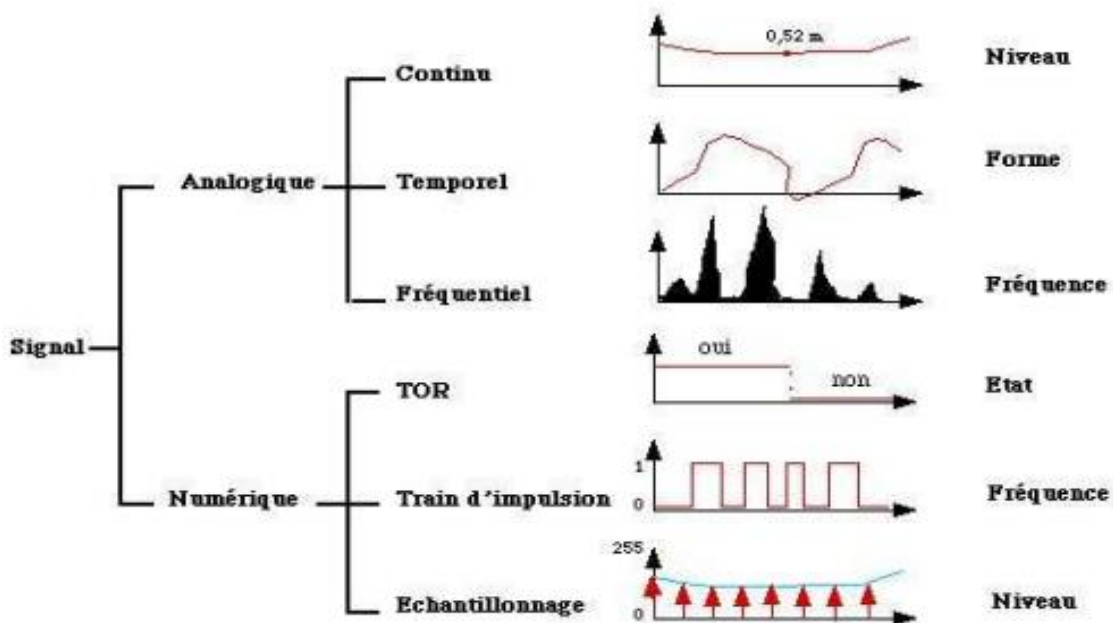


Figure I.10 : Différent types de signaux

I.3.2.2 Technologie général d'un capteur /transmetteur

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs ...), on a besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité, ...). Le capteur est l'élément indispensable à la mesure de ces grandeurs physiques.

a) Capteur

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande [BIS03].

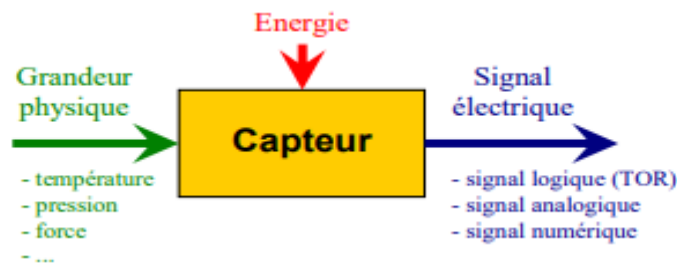


Figure I.11 : schéma d'un capteur

b) Les différentes familles de capteurs

- Les capteurs actifs

Ils se comportent comme des générateurs. Ils sont basés sur un effet physique qui permet de transformer l'énergie du mesurande (énergie mécanique, thermique ou de rayonnement), en énergie électrique. La réponse en sortie d'un capteur actif peut être un courant, une tension ou une charge. Parmi ces effets, les plus importants sont :

- Les capteurs passifs

Les capteurs passifs sont des impédances intégrées dans un circuit électrique (conditionneur), dont l'un des paramètres déterminants est sensible au mesurande.

La variation d'impédance résulte de l'effet de la grandeur à mesurer sur :

f Soit les caractéristiques géométriques ou dimensionnelles qui peuvent varier si le capteur comporte un élément mobile ou déformable.

Soit les propriétés électriques des matériaux (résistivité ρ , perméabilité magnétique μ , constante diélectrique ϵ), qui peuvent être sensibles à différentes grandeurs physiques (température, humidité, éclairage ...).

Si on fait varier une de ces grandeurs en maintenant les autres constantes, il s'établit une relation entre la valeur de cette grandeur et celle de l'impédance du capteur[GHA05].

Tableau I.1 : Capteurs passives.

Mesurande	Type de matériaux utilisés	Caractéristique électrique sensible
Température	Métaux, semi-conducteurs	Résistivité
Flux par rayonnement	Semi-conducteur	Résistivité
Déformation	Alliages de nickel	Résistivité
	Alliages ferromagnétiques	Perméabilité magnétique
Position	Matériaux magnéto-résistants	Résistivité
Humidité	Chlorure de Lithium	Résistivité
	Polymères	Constante diélectrique
Niveau	Liquides isolants	Constante diélectrique

I. 3.2.3 Transmetteur

D’après la norme NF C 46-303, un transmetteur est un appareil qui, recevant une vraie variable mesurée, produit un signal de sortie normalisé pouvant être transmis et ayant une relation continue et définie avec la valeur de la variable mesurée.

Pour élaborer un signal normalisé à partir du signal généré par le capteur, le transmetteur comprend globalement un amplificateur, un filtre, et un traitement du signal. Le transmetteur complète ainsi la chaîne de mesure du capteur[PRO09].

I.3.3 Instrument de mesure et de contrôle

I.3.3.1 Mesure et capteur de niveau

On appelle niveau d’un liquide dans un réservoir, la différence de hauteur entre un plan de référence et le plan d’interface liquide-gaz ou de deux liquides immiscibles.

Un niveau est aussi l’instrument donnant la valeur de cette hauteur de liquide.

Niveau, jaugeage

La mesure d’un niveau sert soit à réguler la hauteur du produit permettant le contrôle du procédé, soit à informer le service de gestion des stocks du volume manquant ou restant du réservoir. Le jaugeage d’un réservoir consiste à établir, avec une incertitude maîtrisée, la relation $V = f(h)$ liant le volume V du liquide contenu dans le réservoir à la position h du niveau de ce liquide, repérée sur un axe vertical défini à partir d’une origine de référence.

Types de capteurs de niveau

- **Capteur de niveau à plongeur**

Tout changement du niveau du liquide fait varier le poids apparent du plongeur soumis à la poussée d’Archimède, appliquant sur un tube de torsion une variation d’angle proportionnelle au changement du niveau du liquide. Cette rotation du bras de torsion modifie le champ magnétique mesuré par un capteur à effet Hall qui génère une tension proportionnelle au niveau. Le plongeur se soulève ou baisse de quelques millimètres mais ne flotte pas.



Figure I.12 : Niveau par plongeur à tube de torsion.

- **Sonde capacitive**

La mesure de niveau capacitive repose sur le changement de capacité d'un condensateur électrique formé par la sonde et la paroi de la cuve (matériau conducteur) lorsque le niveau varie, le produit étant le diélectrique du condensateur. Quand la sonde est dans l'air, ou le gaz, une capacité initiale est mesurée.

La capacité C mesure du condensateur augmente d'autant plus que la sonde est recouverte. La capacité finale est obtenue lorsque la sonde est recouverte; la variation C correspondant à la variation totale du niveau. La tension sinusoïdale appliquée entre la sonde et la paroi est d'une fréquence entre 20 kHz et 2 MHz.

À partir d'un seuil de conductivité, allant de 30 à 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ selon les modèles de sonde, la mesure est indépendante du coefficient diélectrique du liquide[PRO09].

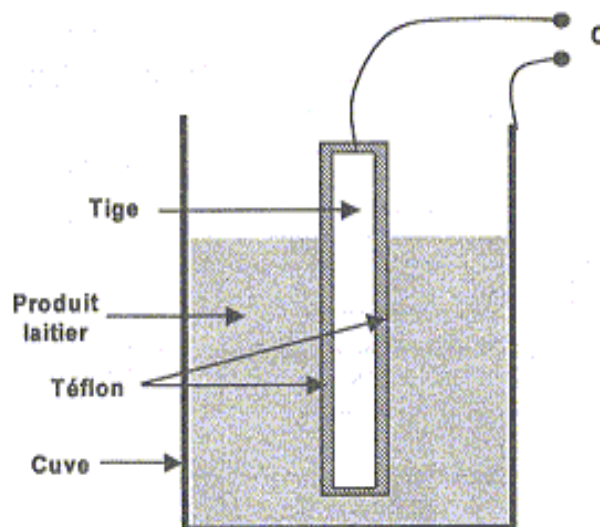


Figure I.13: Principe d'une sonde capacitive de niveau

I.3.3.2 Instruments de contrôle

Ce sont les outils qui reçoivent l'ordre de régulateur et le traduit en une réalisation en pourcentage d'action pour agir sur la variable replante et influencer le système dans le but de ramener la mesure à la consigne voulue ou désiré.

a) Vanne de régulation

Une vanne est un dispositif pour arrêter ou modifier le débit d'un fluide liquide, gazeux, pulvérulent ou multiphasique, en milieu libre (canal) ou en milieu fermé (canalisation).

La vanne de réglage devra être conçue et fabriquée de manière à fonctionner correctement et avec un minimum d'entretien, malgré un certain nombre de problèmes posés par le fluide et par son environnement.

La vanne peut se composer en deux parties :

- Le servomoteur : c'est l'élément qui assure la conversion du signal de commande en mouvement de la vanne.
- Le corps de vanne : c'est l'élément qui assure le réglage du débit.

Plus un certain nombre d'éléments auxiliaires comme :

- Un positionneur : il régule l'ouverture de la vanne en accord avec le signal de commande.

Il existe aussi différentes technologies de conception du corps de vanne :

- Clapet simple
- Clapet double
- Clapet à siège
- Clapet à papillon
- Corps à boule
- Clapet membrane

Sens d'action du servomoteur

- Le servomoteur est à action directe si l'action du ressort tend à faire monter la tige de vanne
- Le servomoteur est à action inverse si l'action du ressort tend à faire descendre la tige de vanne

Sens de montage du clapet

- Le clapet est à action directe si la descente de la tige de vanne fait fermer la vanne
- Le clapet est à action inverse si la descente de la tige de vanne fait ouvrir la vanne

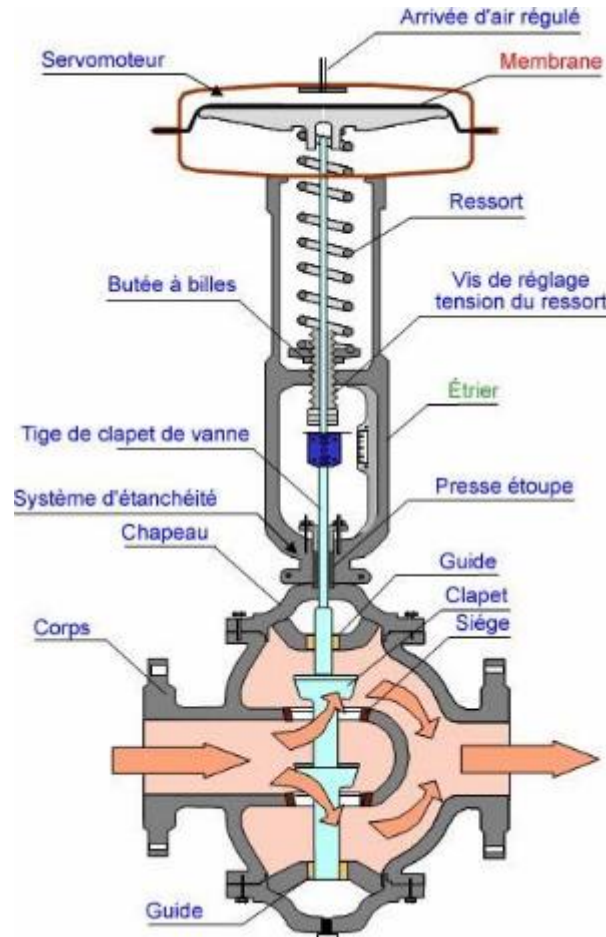


Figure I.14 : Eléments internes d'une vanne

b) Les pompes

Il existe deux grandes familles de systèmes de pompage qui diffèrent selon l'utilisation que l'on souhaite en faire, ce qui sera déterminé par les procédés fluides. Si l'on souhaite augmenter la pression d'un fluide, il faudra se tourner vers les pompes volumétriques dont l'écoulement résulte de la variation d'une capacité occupée par le liquide. Si l'on veut en augmenter le débit, on utilisera les pompes centrifuges. Là, le mouvement du liquide résulte de l'accroissement d'énergie qui lui est communiqué par la force centrifuge.

- **Le fonctionnement d'une pompe centrifuge**

Le processus se déroule en deux étapes : l'aspiration et l'accélération. Par l'effet de la rotation de l'impulseur, le fluide pompé est d'abord aspiré axialement dans la pompe, puis accéléré radialement.

Le liquide est aspiré au centre du rotor par une ouverture appelée « distributeur ». Son rôle est de conduire le fluide depuis la conduite d'aspiration jusqu'à l'entrée du rotor. La pompe est alors amorcée, une fois qu'elle est pleine de liquide. La vitesse du fluide qui entre dans la roue augmente ; par conséquent la pression diminue et engendre ainsi une aspiration et maintient l'amorçage.

Le rotor va transformer cette énergie mécanique appliquée à l'arbre en énergie cinétique. À la sortie du rotor, le fluide se trouve projeté dans la volute dont le but est de collecter le fluide et de le

ramener dans la section de sortie. La section offerte au liquide étant de plus en plus grande, son énergie cinétique se transforme en énergie de pression[web1].

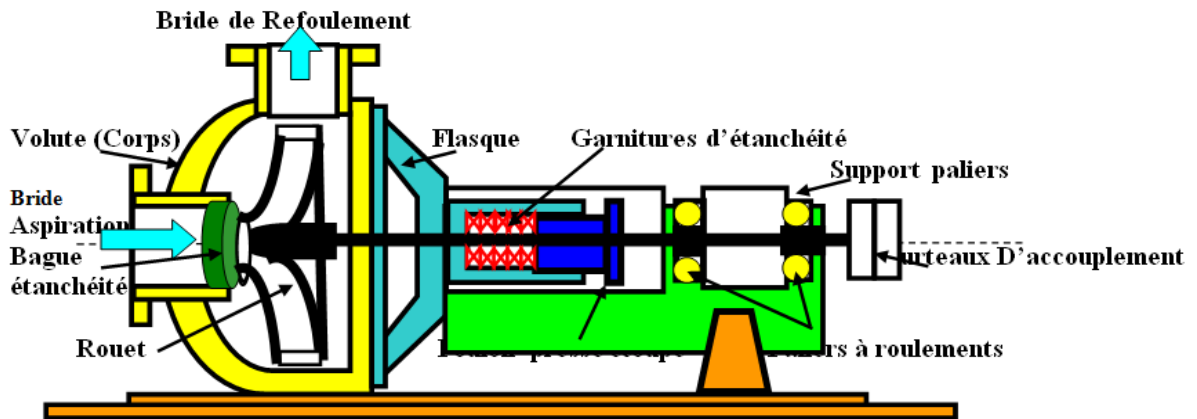


Figure I.15 : Pompe centrifuge.

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu quelques notions introductives de système et de commande, on a également vu des notions liées à la régulation, à la chaîne de régulation et ses constituants. On a parlé aussi des instruments de mesure et de contrôle des systèmes dans un système hydraulique.



CHAPITRE II

II.1 Introduction

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

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

II.2 L'hydraulique

Tout d'abord, il importe de bien définir ce qu'est l'hydraulique. La génération de forces et de mouvements par des liquides sous pression est une définition très juste de l'hydraulique moderne. Donc, le liquide est ici le fluide de transmission de l'énergie (comparativement à l'air comprimé en pneumatique). Le liquide est une huile synthétique spéciale dont la température de service doit être comprise entre 30 et 70°C. On retrouve l'hydraulique dans une panoplie fort impressionnante de domaines d'application [CAR72].

II.3 Modélisation

Pour commander correctement un système, il est nécessaire de définir un modèle mathématique qui représente la relation entre les signaux d'entrée et les signaux de sortie. À l'aide de ce modèle mathématique, il est possible de calculer la sortie du système étudié si on connaît l'entrée et les conditions initiales. L'ensemble des procédures permettant d'obtenir un modèle mathématique est la modélisation [ROS05].

II.4 Modèle à réservoir unique

Il est important de comprendre les mathématiques du comportement du système de réservoirs couplés. Il s'agit de la modélisation du système et c'est une partie très importante de l'analyse des systèmes de contrôle. On commence par un système de réservoir unique dans la figure II.1:

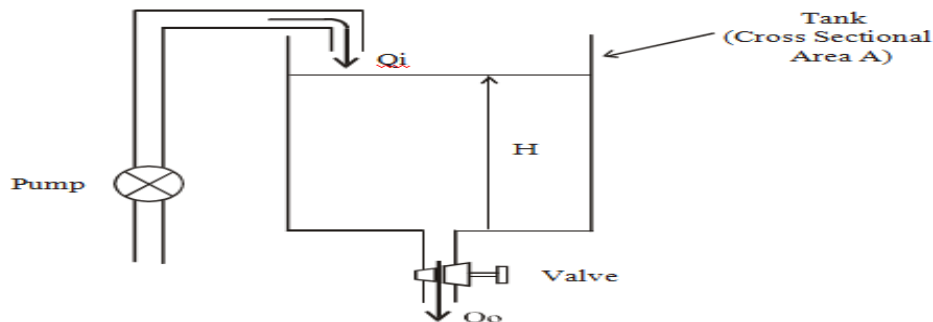


Figure II.1: Un système de niveau de fluide à réservoir unique.

Le modèle du système est déterminé en reliant le débit Q_i dans le réservoir au débit Q_o sortant à travers la vanne au fond du réservoir. En utilisant une équation d'équilibre des flux sur le réservoir, il est possible d'écrire :

$$Q_i - Q_o = A \frac{dH}{dt} \quad (\text{II.1})$$

Où, A est l'aire de la section transversale du réservoir, et H est la hauteur du fluide dans le réservoir. Si la soupape est supposée se comporter comme une idée d'orifice à arêtes vives, le débit à travers la soupape sera lié au niveau de fluide dans le réservoir, H, par l'expression,

$$Q_o = C_d a \sqrt{2g.H} \quad (\text{II.2})$$

Dans cette équation, a est la section transversale de l'orifice (en pratique, la section transversale sera donnée par les dimensions de la vanne et le canal d'écoulement dans lequel elle est montée). C_d est appelé coefficient de décharge de la valve. Ce coefficient prend en compte toutes les caractéristiques des fluides, les pertes et les irrégularités du système telles que les deux côtés de l'équation s'équilibrent. g constantes gravitationnelles= 980 cm / sec².

L'équation (II.2) suppose que C_d est une constante de sorte que Q_o a une relation non linéaire avec le niveau H pour toutes les conditions de fonctionnement possibles. Idéalement, la relation non linéaire est l'équation de la racine carrée 2, mais dans une valve pratique, il existe une équation non linéaire plus complexe. La combinaison des équations 1 et 2 donne,

$$A \frac{dH}{dt} + c.a \sqrt{2gH} = Q_i \quad (\text{II.3})$$

Cette équation est le modèle mathématique qui décrit le comportement du système, et encore une fois, nous voyons des choses non linéaires dans le modèle du système. Dans le problème du niveau du réservoir, la non-linéarité est lisse et peut être rendue linéaire à un niveau de fonctionnement particulier H en utilisant la pente de la non-linéarité en H. Cela a pour résultat important que le modèle de système linéaire possède des paramètres qui dépendent des conditions de fonctionnement. La dynamique du système changera à mesure que le niveau de fonctionnement normal change. Il est très important que le contrôleur de niveau de réservoir soit insensible aux changements de paramètres dans le modèle.

L'équation 3 est une équation différentielle de premier ordre reliant le débit d'entrée, Q_i , au niveau d'eau de sortie H. Pour concevoir un contrôleur linéaire pour le niveau du réservoir, nous devons linéariser l'équation en considérant les petites variations h sur le niveau de fonctionnement normal du fluide dans le réservoir. Laisser,

$$H = H^0 + h$$

Où, H^0 est le niveau de fonctionnement normal, et est une constante, h est un petit changement autour de ce niveau. Alors, pour de petites variations de h sur H^0 , on peut approximer la fonction non linéaire par la tangente à H^0 . Cela permet d'obtenir une équation différentielle linéaire :

$$T \frac{dh}{dt} + h = g.q_i \quad (\text{II.4})$$

Où q_i la variation du débit d'entrée Q_i , nécessaire pour maintenir la constante de niveau de fonctionnement normal T et le gain g sont en fonctions des paramètres du système et du niveau de fonctionnement H^0 .

II.4.1 Fonction de transfert :

On a l'équation différentielle suivante :

$$T \frac{dh}{dt} + h = g \cdot q_i$$

$$\frac{T}{g} \frac{dh}{dt} + \frac{1}{g} h = q_i$$

La Transformée de Laplace de l'équation précédente s'écrit :

$$\frac{T}{g} p H(p) + \frac{1}{g} H(p) = Q_i(p)$$

Donc la fonction de transfert est :

$$\frac{H(p)}{Q_i(p)} = \frac{g}{Tp + 1} \quad (\text{II.5})$$

II.4.2 Espace d'état :

Pour ce système, nous définissons le modèle d'état.

On a l'équation suivante :

$$q_o(t) = a \left(c_d \sqrt{2gh(t)} \right)$$

Afin de linéariser l'équation ci-dessus :

On dérive $q_o(t)$ par rapport $h(t)$:

$$\frac{dq_o(t)}{dh(t)} = \frac{d}{dh(t)} \left((c_d a \sqrt{2g}) \sqrt{h(t)} \right)$$

$$\frac{dq_o(t)}{dh(t)} = (c_d a \sqrt{2g}) \frac{1}{2\sqrt{h(t)}}$$

On remplace $h(t)$ par h_0 point de repos ;

$$\left. \frac{dq_o(t)}{dh(t)} \right|_{h(t)=h_0} = \frac{(c_d a \sqrt{2g})}{2\sqrt{h_0}}$$

Donc la pente K égale :

$$K = c_d a \sqrt{\frac{g}{2h_0}}$$

$$q_o(t) = \left(c_d a \sqrt{\frac{g}{2h_0}} \right) h(t) \quad (\text{II.6})$$

Donc $q_o(t)$ est linéaire

On a :

$$q(t) = \frac{h(t)}{R}$$

Par compensation, on trouve R :

$$R = \frac{1}{c_d a \sqrt{\frac{g}{2h_0}}}$$

$$q_i(t) - q_o(t) = c \dot{h}(t)$$

$$q_i(t) - \frac{h(t)}{R} = c \dot{h}(t)$$

$$\dot{h}(t) = -\frac{1}{cR} h(t) + \frac{1}{c} q_i(t) \quad (\text{II.7})$$

$$x(t) = h(t); \dot{x}(t) = \dot{h}(t)$$

$$y(t) = q_i(t)$$

$$\dot{x}(t) = -\frac{1}{cR} x(t) + \frac{1}{c} y(t)$$

$$y(t) = x(t)$$

La matrice d'état :

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{cR} \\ \frac{1}{c} \end{bmatrix} + x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ c \end{bmatrix} q_1(t)$$

Donc

$$A = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{cR} \\ \frac{1}{c} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ c \end{bmatrix}, C = [10], D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

II .5 Modélisation du système hydraulique CE105 à réservoirs couplés

II.5.1 Description du matériel

Le CE105 à réservoirs couplés est considéré comme un Benchmark pour l'étude et l'analyse des problèmes de commande des systèmes hydrauliques. Ce dispositif, est conçu par « TQ Education And Training » et, nous permet d'examiner la commande de niveau du liquide dans un ou deux réservoirs en variant le débit à partir d'une pompe. Cet appareil comporte deux réservoirs verticaux reliés par un canal d'écoulement.

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 [WEL93].

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

Un canal de débordement est inclus au-dessus de chaque réservoir. La sortie de la pompe est mesurée par un capteur de débit. Le problème à étudier est de maintenir le niveau désiré du liquide dans le deuxième réservoir lors du fonctionnement sous différentes conditions d'entrée/sortie[ZEG12].

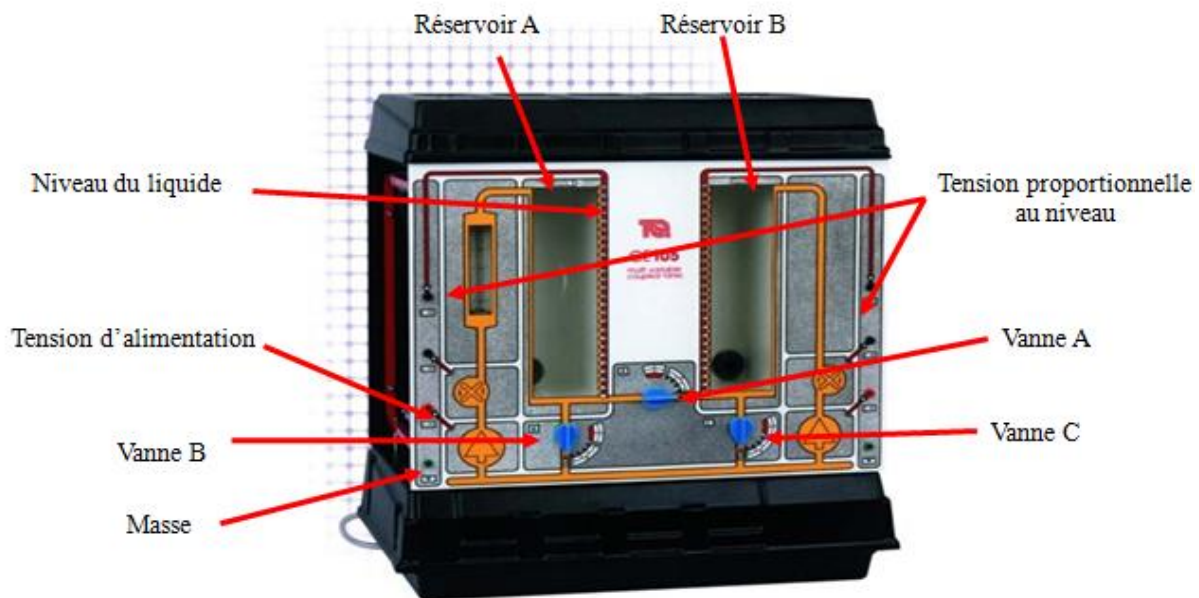


Figure II.2 : Présentation du système hydraulique CE105 à réservoirs couplés

II.5.2 Pourquoi les systèmes à double réservoirs ?

Le contrôle du niveau de fluide dans les réservoirs et du débit entre les réservoirs est un problème majeur dans les industries pratiques. Les industries de transformation exigent que le fluide soit pompé, stocké dans des réservoirs, puis pompé dans un autre réservoir. Souvent, les liquides sont traités par traitement chimique ou mélange dans des réservoirs, mais le niveau de liquide dans les réservoirs doit toujours être contrôlé et le débit entre les réservoirs doit être régulé. Les réservoirs sont souvent jumelés de sorte que les niveaux interagissent et doivent également être contrôlés. Le contrôle de niveau et de débit dans les réservoirs est au cœur de tous les systèmes de génie chimique. Mais les systèmes de génie chimique sont également au cœur de nos économies. Industries vitales où le niveau de liquide et le contrôle du débit sont nécessaires :

- Industries pétrochimiques.
- Industrie du papier.
- Industries de traitement de l'eau.

Notre vie est régie par des systèmes de contrôle de débit et de niveau. Par exemple, la physiologie médicale comprend de nombreux systèmes de contrôle biologique liquide. Il existe des systèmes vitaux dans notre corps pour contrôler le débit sanguin autour de notre corps. D'autres systèmes vitaux contrôlent la pression et les niveaux d'humidité et de produits chimiques dans notre corps.

Les systèmes de contrôle du niveau des réservoirs sont partout. Toutes nos industries de processus, le corps humain et les systèmes de traitement des fluides reposent sur des systèmes de contrôle de niveau de réservoir. Il est nécessaire que les ingénieurs des systèmes de contrôle comprennent comment fonctionnent les systèmes de contrôle des réservoirs et comment le problème de contrôle de niveau est résolu.

II.5.3 Modélisation du CE105

Comme il est illustré sur la figure (II.3), le CE105 contient deux réservoirs, et caractérisé par Deux états h_1 (le niveau dans le premier réservoir) et h_2 (le niveau dans le deuxième réservoir) et 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 C. Deux états h_1 (le niveau dans le premier réservoir) et h_2 (le niveau dans le deuxième réservoir)

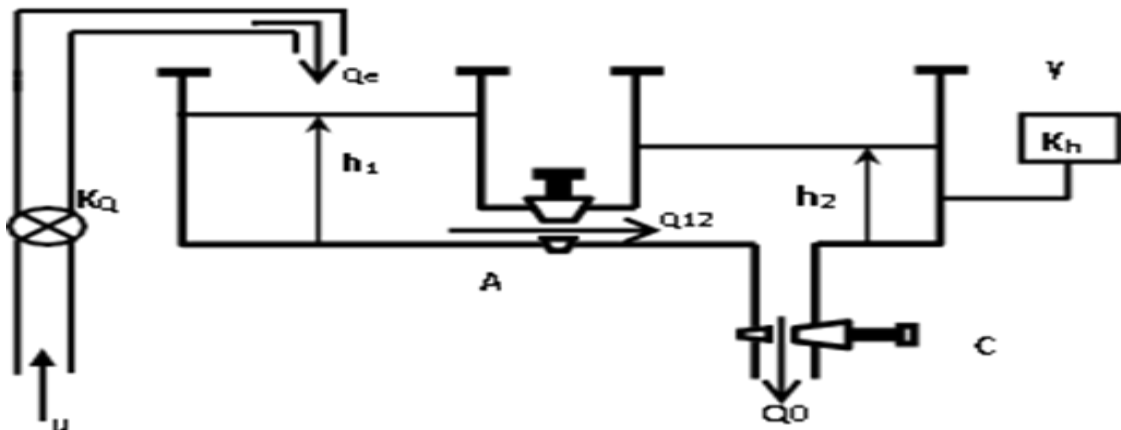


Figure II.3 : Système hydraulique CE105 à réservoirs couplés

En utilisant le principe de conservation de masse ou l'équation de continuité, le volume du liquide $V_1 = Ah_1$ dans le premier réservoir est donné par :

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{d(Ah_1)}{dt} = Q_e - Q_{12} \Rightarrow A \frac{dh_1}{dt} = Q_e - Q_{12} \quad (\text{II.8})$$

$$\dot{h}_1 = \frac{1}{A} (Q_e - Q_{12}) \quad (\text{II.9})$$

Pour le deuxième réservoir, le volume du liquide $V_2 = Ah_2$, il est régi par :

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{d(Ah_2)}{dt} = Q_{12} - Q_0 \Rightarrow A \frac{dh_2}{dt} = Q_{12} - Q_0 \quad (\text{II.10})$$

$$\dot{h}_2 = \frac{1}{A} (Q_{12} - Q_0) \quad (\text{II.11})$$

Donc le système peut être représenté par :

$$\begin{cases} \dot{h}_1(t) = \frac{1}{A} (Q_e(t) - Q_{12}(t)) \\ \dot{h}_2(t) = \frac{1}{A} (Q_{12}(t) - Q_0(t)) \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Avec

A : La section du réservoir, h_1 le niveau du liquide dans le réservoir 1,

Q_e : Le débit d'entrée généré par la pompe

Q_{12} : Est le débit entre les deux réservoirs au niveau de la valve A qui est donné par :

$$Q_{12} = s_n a_{12} v_A \quad (\text{II.13})$$

Où : s_n c'est la section maximale de passage du liquide dans la valve A

a_{12} : Est le coefficient de décharge de la valve A

v_A : La vitesse d'écoulement au niveau de l'orifice de la valve A.

Pour déterminer la vitesse Av on utilise la relation de Bernoulli qui nous permet d'écrire pour un point situé à la surface du liquide dans le premier réservoir et un point situé à la sortie de la valve A l'équation suivante :

$$P_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} + \rho g Z_1 = P_A + \rho \frac{v_A^2}{2} + \rho g Z_A \quad (\text{II.14})$$

Le coefficient ρ c'est la masse volumique de l'eau et g est la constante de gravitation. Etant donné que la section des réservoirs est très grande par rapport à la section de la valve, on peut alors supposer que la vitesse de l'écoulement à la surface du liquide dans les réservoirs est quasiment nulle, ainsi on peut avoir :

$$P_1 + \rho g Z_1 = P_A + \rho \frac{v_A^2}{2} + \rho g Z_A \quad (\text{II.15})$$

Si on considère que $Z_A = 0$ alors $Z_1 = h_1$. De plus, la pression $P_1 = P_{atm}$ (pression atmosphérique) et la pression P_A peut être donnée par :

$$P_A = \rho g h_2 + P_{atm} \quad (\text{II.16})$$

Ainsi, on obtient :

$$P_{atm} + \rho g h_1 = \rho \frac{v_A^2}{2} + \rho g h_2 + P_{atm} \quad (\text{II.17})$$

$$\rho \frac{v_A^2}{2} = \rho g (h_1 - h_2) \quad (\text{II.18})$$

C'est à dire :

$$v_A = \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (\text{II.19})$$

Donc, il vient :

$$Q_{12} = s_n a_{12} v_A = s_n a_{12} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (\text{II.20})$$

Le débit de sortie Q_0 au niveau de la valve C est donné par :

$$Q_0 = s_n a_0 v_c \quad (\text{II.21})$$

Où : s_n c'est la section maximale de passage du liquide dans la valve C, a_0 est le coefficient de décharge de la valve C et v_c la vitesse d'écoulement au niveau de l'orifice de la valve A.

Pour déterminer la vitesse Cv on utilise la relation de Bernoulli qui nous permet d'écrire pour un point situé à la surface du liquide dans le deuxième réservoir et un point situé à la sortie de la valve C l'équation suivante :

$$P_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} + \rho g Z_2 = P_c + \rho \frac{v_c^2}{2} + \rho g Z_c \quad (\text{II.22})$$

Le coefficient ρ c'est la masse volumique de l'eau et g est la constante de gravitation. Etant donné que la section des réservoirs est très grande par rapport à la section de la valve, on peut alors supposer que la vitesse de l'écoulement à la surface du liquide dans les réservoirs est quasiment nulle, ainsi on peut avoir :

$$P_1 + \rho g Z_1 = P_A + \rho \frac{v_A^2}{2} + \rho g Z_A \quad (\text{II.23})$$

Si on considère que : $Z_c = 0$, alors $Z_2 = h_2$. De plus, la pression $P_2 = P_{atm}$ (pression atmosphérique) et la pression $P_c = P_{atm}$. Ainsi, on obtient :

$$P_{atm} + \rho g h_2 = \rho \frac{v_c^2}{2} + P_{atm} \quad (\text{II.24})$$

$$\rho \frac{v_c^2}{2} = \rho g h_2 \quad (\text{II.25})$$

C'est à dire :

$$v_c = \sqrt{2gh_2} \quad (\text{II.26})$$

Il vient alors :

$$Q_0 = s_n a_0 \sqrt{2gh_2} \quad (\text{II.27})$$

En résumé, on obtient :

$$\begin{cases} Q_{12} = s_n a_{12} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \\ Q_0 = s_n a_0 \sqrt{2gh_2} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Avec :

Q_{12} : Le débit entre les deux réservoirs

Q_0 : Le débit de sortie.

s_n : La section maximale 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} et a_0 : Représentent les coefficients de décharge des valves A et C.

g : La constante de gravité, avec $g = 9.80 \text{ m/s}^2$.

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

$$\begin{cases} \frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{A} (Q_e - s_n a_{12} \sqrt{2g(h_1 - h_2)}) \\ \frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A} (s_n a_{12} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} - s_n a_0 \sqrt{2gh_2}) \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

La vitesse de la pompe peut être ajustée pour remplir le premier réservoir, la relation entre la tension d'alimentation de la pompe u et le débit d'entrée Q_e peut s'écrire comme suit :

$$Q_e = k_Q u \quad (\text{II.30})$$

Où k_p le gain de la pompe.

La relation entre le niveau h_2 , et la tension de sortie y indiquée par le capteur de niveau est donnée par :

$$y = k_h h_2 \quad (\text{II.31})$$

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

$$\begin{cases} \frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{A} (K_Q u - s_n a_{12} \sqrt{2g(h_1 - h_2)}) \\ \frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A} (s_n a_{12} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} - s_n a_0 \sqrt{2gh_2}) \\ y = k_h h_2 \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

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

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x) \\ \dot{x}_2 = f_2(x) + k_u u \\ y = K_h x_1 \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

On a :

$$x_1 = h_2 \Rightarrow \dot{x}_1 = \dot{h}_2 = \frac{1}{A} (s_n a_{12} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} - s_n a_0 \sqrt{2gh_2}) \quad (\text{II.34})$$

$$x_2 = h_1 \Rightarrow \dot{x}_2 = \dot{h}_1 = \frac{1}{A} (-s_n a_{12} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} - K_Q u) \quad (\text{II.35})$$

Donc :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{A} (S_n \cdot a_{12} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} - S_n \cdot a_0 \sqrt{2g \cdot h_2}) \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{A} (-S_n \cdot a_{12} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} + k_Q u) \\ y = K_h x_1 \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

On obtient :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{s_n a_{12} \sqrt{2g}}{A} \sqrt{x_2 - x_1} - \frac{s_n a_0 \sqrt{2g}}{A} \sqrt{x_1} \\ \dot{x}_2 = \frac{s_n a_{12} \sqrt{2g}}{A} \sqrt{x_2 - x_1} + \frac{k_Q}{A} \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

En posant :

$$\beta_1 = \frac{s_n \cdot a_{12} \sqrt{2g}}{A}$$

$$\beta_2 = \frac{s_n \cdot a_0 \sqrt{2g}}{A}$$

$$K_u = \frac{k_Q}{A}$$

Le modèle dynamique peut s'écrire alors sous la forme compacte suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \beta_1 \sqrt{(x_2 - x_1)} - \beta_2 \sqrt{x_1} \\ \dot{x}_2 = -\beta_2 \sqrt{(x_2 - x_1)} + k_u \cdot u \\ y = K_h \cdot x_1 \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

Les paramètres du système sont donnés par le Tableau II.1 [BOU07].

Tableau II.1 : Paramètres du système hydraulique

Définition	Symbole	Valeur
Section du chaque réservoir	A	9350 10 ⁻⁶ m ²
Section de l'ouverture variable de chaque valve	s ₁	78.5 10 ⁻⁶ m ²
	s ₂	78.5 10 ⁻⁶ m ²
Coefficient de décharge	a ₁₂	1
	a ₀	0.6
Gain de la pompe	K _Q	450. 10 ⁻⁶ m ³ /sV
Gain du capteur de niveau	k _h	41 v/m
Constante de gravité	g	9.8 m /s ²

II.5.4 Contrôle du niveau des réservoirs couplés

Il existe de très nombreuses théories de conception de contrôleurs alternatives qui peuvent être utilisées pour contrôler le niveau de fluide dans les réservoirs, il est important de savoir que les paramètres des modèles de systèmes de contrôle de niveau peuvent être difficiles à mesurer avec précision. Le modèle de racine carrée du débit à travers la vanne est également une approximation.

En raison de ces incertitudes, les ingénieurs préfèrent mesurer expérimentalement les constantes de temps du système lors de la conception et utiliser des lois de contrôle simples qui ont deux propriétés importantes :

- Les techniciens peuvent régler le système de contrôle avec peu de formation.
- La loi de commande fonctionne de manière acceptable même lorsque les paramètres du système changent.

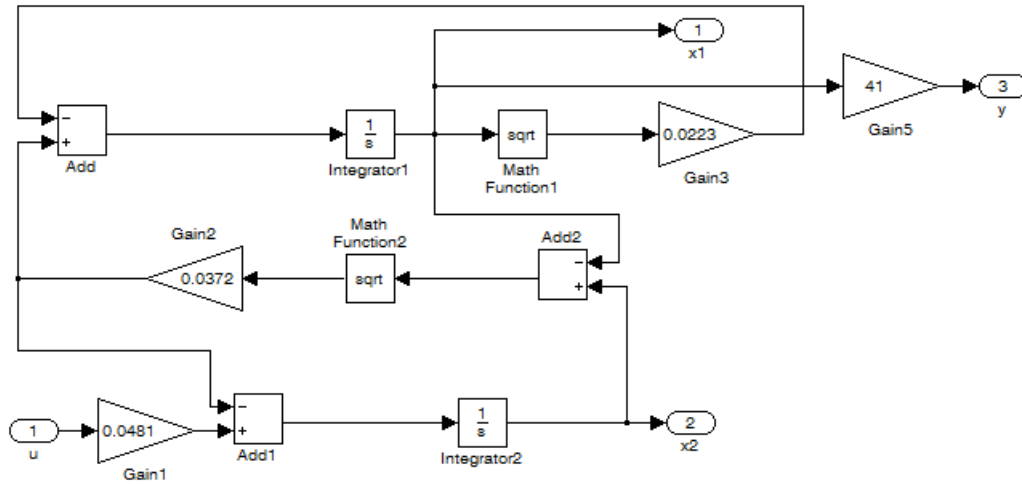


Figure II.4: Modélisation des réservoirs couplés CE 105 en Simulink

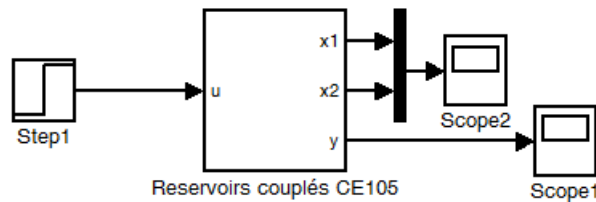


Figure II.5: Bloc Simulink des réservoirs couplés CE 105 en boucle ouverte (sans contrôleur)

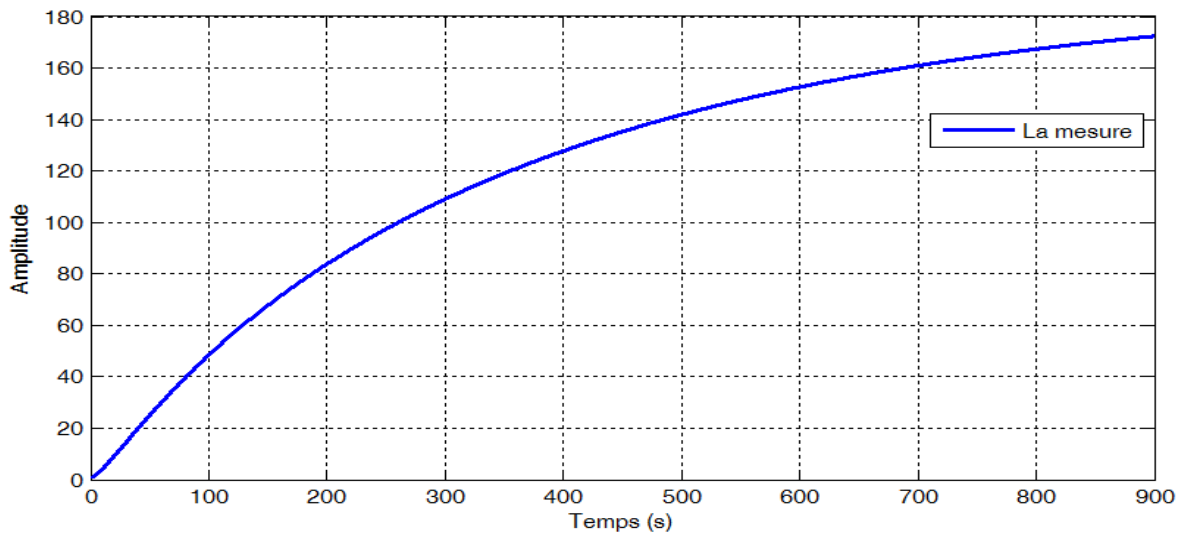


Figure II.6: Résultat de simulation des réservoirs couplés CE105 en boucle ouverte

II.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre des notions générales sur le réservoir couplé CE105, la description du système et sa modélisation dynamique. Le système hydraulique est constitué de deux réservoirs couplés et son modèle dynamique est un modèle non linéaire, ce système est utilisé dans les domaines industriels et dans les réservoirs des avions. Un test de simulation en boucle ouverte est présenté pour illustrer le comportement du système.



CHAPITRE III

III.1 Introduction

Dans la conception d'un système de régulation, on utilise généralement un modèle mathématique complexe obtenu à partir de la physique. Il existe de nombreuses stratégies et méthodes de régulation et de commande du niveau de liquide dans les systèmes à réservoirs couplés, parmi lesquelles on peut citer : commande par régulateurs PID, la commande par logique floue [OUB07], [WEL93].

III.2 Commande PID

Un système de contrôle permettant d'améliorer les performances d'un asservissement en boucle fermée.

Le régulateur PID est le plus utilisé dans l'industrie où ses qualités de correction s'appliquent à de multiples grandeurs physiques.

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

- **Matériel**

Grâce à la découverte de l'amplificateur opérationnel, le premier P.I.D. est commercialisé en 1930 ; puis dans les années 1940 beaucoup d'installations P.I.D. pneumatiques voient le jour ; à partir des années 1970 l'arrivée des circuits intégrés permet la commande numérique beaucoup moins restrictive que le P.I.D [ZAM96].

- **Culturel**

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

III.2.1 Principe

On distingue trois actions dans un régulateur PID :

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

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

D : action dérivée permet d'améliorer la réponse transitoire grâce à l'effet d'anticipation [WEB1].

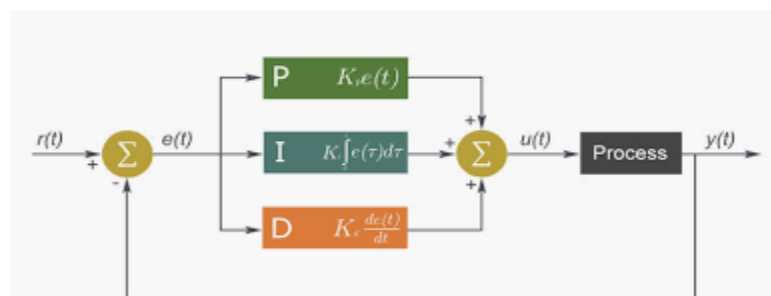


Figure III.1 : Régulateur PID.

➤ **Terme proportionnel**

Le terme proportionnel produit une valeur de sortie qui est proportionnelle à la valeur d'erreur actuelle. La réponse proportionnelle peut être ajustée en multipliant l'erreur par une constante K_p , appelée constante de gain proportionnel. Le terme proportionnel est donné par :

$$P_{out} = k_p e(t) \quad (III.1)$$

Un gain proportionnel élevé entraîne une variation importante de la sortie pour une variation donnée de l'erreur. Si le gain proportionnel est trop élevé, le système peut devenir instable. En revanche, un petit gain se traduit par une petite réponse de sortie à une grande erreur d'entrée et un contrôleur moins réactif ou moins sensible. Si le gain proportionnel est trop faible, l'action de contrôle peut être trop faible en réponse aux perturbations du système. La théorie de l'accord et la pratique industrielle indiquent que le terme proportionnel devrait contribuer à l'essentiel du changement de production.

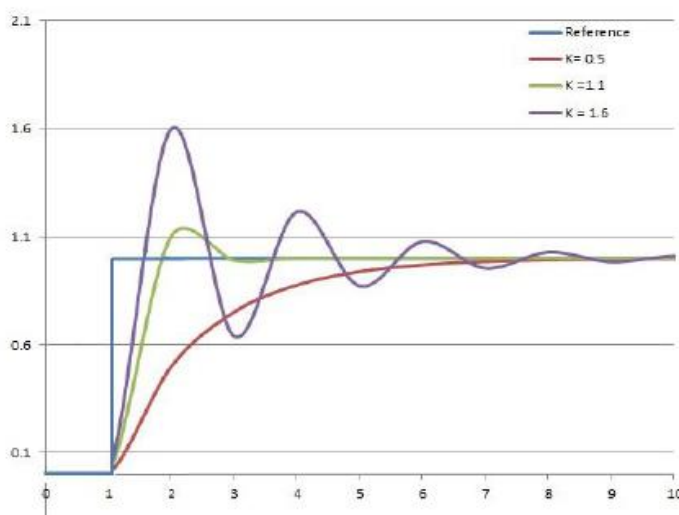


Figure III.2 : L'effet de l'ajout K_p (K_i , and K_d) est resté constant.

➤ **Terme intégral**

La contribution du terme intégral est proportionnelle à la fois à l'ampleur de l'erreur et à la durée de l'erreur. L'intégrale dans un contrôleur PID est la somme de l'erreur instantanée dans le temps et donne le décalage accumulé qui aurait dû être corrigé précédemment. L'erreur accumulée est ensuite multipliée par le gain intégral K_i et ajoutée à la sortie du contrôleur.

$$I_{out} = k_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (III.2)$$

Le terme intégral accélère le mouvement du processus vers le point de consigne et élimine l'erreur résiduelle en régime permanent qui se produit avec un contrôleur proportionnel pur.

Cependant, étant donné que le terme intégral répond aux erreurs accumulées du passé, il peut entraîner un dépassement de la valeur de consigne par la valeur actuelle.

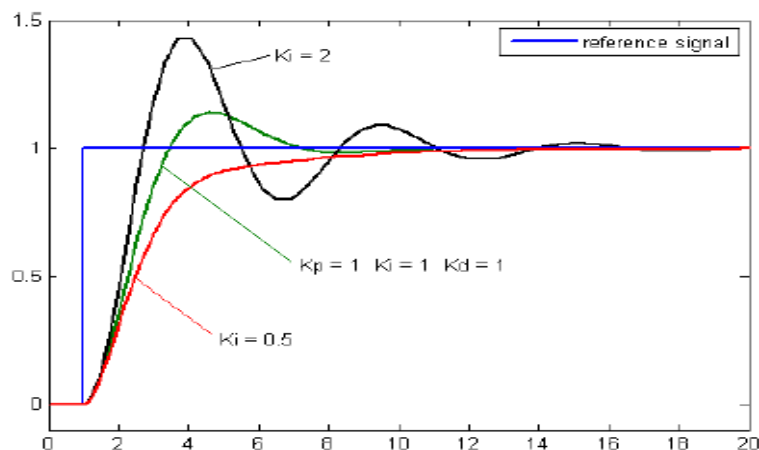


Figure III.3 : L'effet de l'addition K_i (K_p and K_d) est resté constant

➤ **Terme dérivé :**

La dérivée de l'erreur de processus est calculée en déterminant la pente de l'erreur dans le temps et en multipliant ce taux de variation par le gain dérivé K_d . L'ampleur de la contribution du terme dérivé à l'action de contrôle globale est appelée gain dérivé, K_d . Le terme dérivé est donné par :

$$D_{out} = k_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (III.3)$$

L'action dérivée prédit le comportement du système et améliore ainsi le temps de stabilisation et la stabilité du système. Une dérivée idéale n'est pas causale, de sorte que les implémentations des contrôleurs PID incluent un filtrage passe-bas supplémentaire pour le terme dérivé, afin de limiter le gain haut fréquence et le bruit.

Cependant, l'action dérivée est rarement utilisée dans la pratique selon une estimation dans seulement 20% des contrôleurs déployés en raison de son impact variable sur la stabilité du système dans les applications du monde réel.

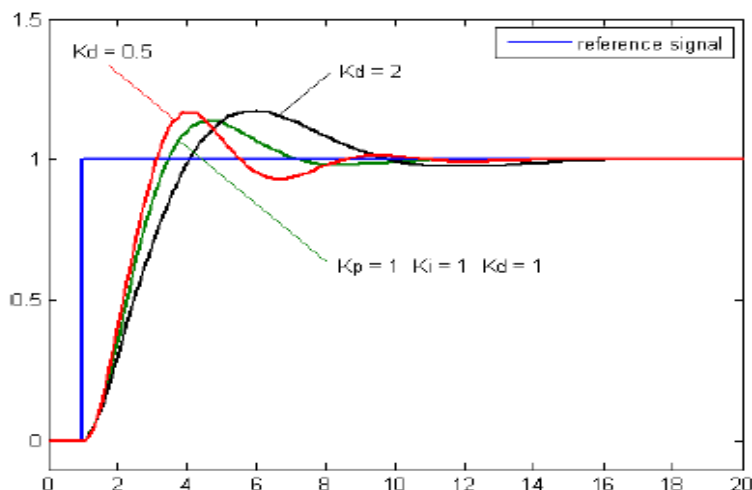


Figure III.4 : L'effet de l'addition Kd (K_p , and K_i) est resté constant

III.2.2 Les différentes structures du PID

Différentes possibilités d'associations des modules P, I et D existent. Ces structures sont fonctionnellement équivalentes, et il est facile de convertir les coefficients utilisés dans l'une pour obtenir ceux d'une autre. Les trois configurations les plus utilisées sont :

➤ La structure parallèle

La loi de commande est de la forme :

$$C(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (III.4)$$

Soit d'après la transformée de Laplace :

$$C(p) = k_p e(p) + k_i \frac{e(p)}{p} + k_d \cdot p \cdot e(p) \quad (III.5)$$

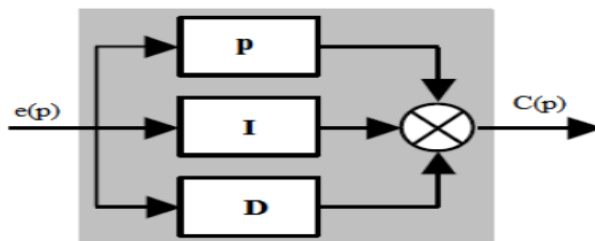


Figure III.5 : La structure parallèle

➤ La structure mixte

Soit d'après la transformée de Laplace, La loi de commande est de la forme :

$$C(p) = k_p e(p) \cdot \left[k_i \cdot \frac{1}{p} + k_d \cdot p \right] \quad (\text{III.6})$$

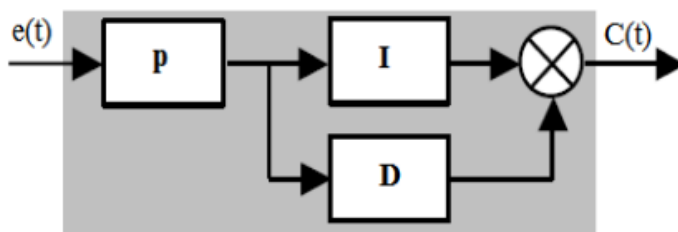


Figure III.6 : La structure mixte

➤ **La structure série**

La transformée de Laplace de la loi de commande est de la forme : [BEN6]

$$C(p) = e(p) \cdot k_p \cdot \left[k_i \cdot \frac{1}{p} \right] \cdot [k_d \cdot p]$$

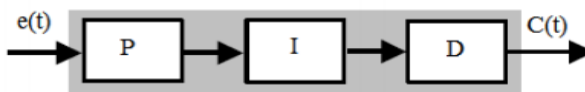


Figure III.7 : La structure série.

III.2.3 Avantages et inconvénients

➤ **Avantage**

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

➤ **Inconvénients**

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

$$\frac{t_m}{t_r + t_d} < 4$$

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

$$\frac{t_m}{t_r + t_d} > 10 \quad \text{Action P}$$

$$\frac{t_m}{t_r + t_d} > 7.5 \quad \text{Action PI}$$

$$\frac{t_m}{t_r + t_d} > 4 \quad \text{Action PID}$$

- Jamais utilisable pour les systèmes fortement non linéaires ou pour les systèmes multi variables (non découplés) [ZAM96].

Remarque :

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

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

III.2.4 Application de la commande PID sur le système CE105 :

Le schéma bloc de la commande est donné par la figure III.8 :

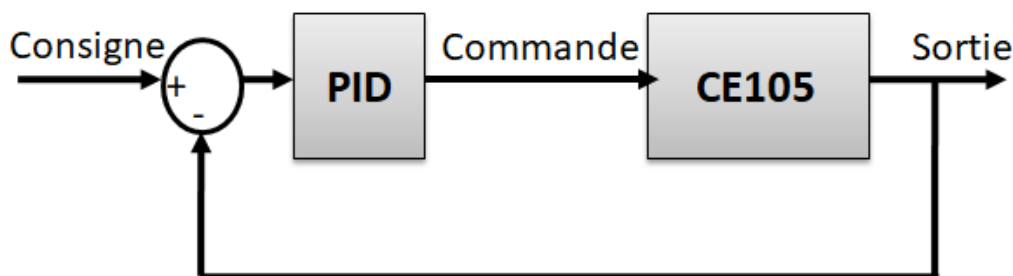


Figure III.8 : Schéma bloc de la régulateur PID appliquée au système hydraulique CE105

III.3 Commande par logique floue

La logique floue est une extension de la logique booléenne créée par Lotfi Zadeh en 1965 en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles floue, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. En introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition, permettant ainsi à une condition d'être dans un autre état que vrai ou faux, la logique floue confère une flexibilité très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes.

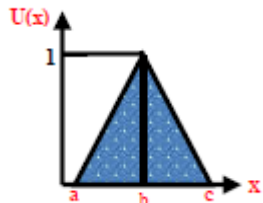
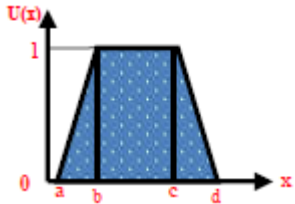
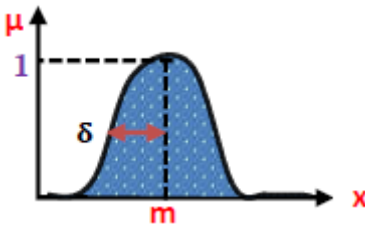
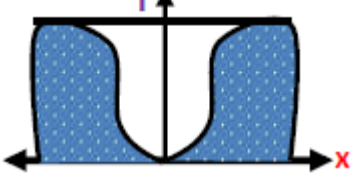
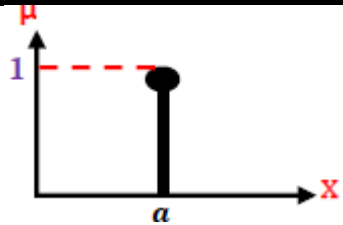
Un des intérêts de la logique floue pour formaliser le raisonnement humain est que les règles sont énoncées en langage naturel [DER11].

III.3.1 Différentes formes des fonctions d'appartenances

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

Dans ce contexte, est attribuée à chaque valeur de la variable linguistique une fonction d'appartenance, dont la valeur varie entre 0 et 1. Le plus souvent, nous utilisons des fonctions d'appartenance de type triangulaire ou trapézoïdale[MER07].

Tableau III.1 :Les formes les plus utilisées de la fonction d'appartenance

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

III.3.2 Opération sur l'ensemble flou

Comme dans la théorie des ensembles classiques, on définit l'intersection, l'union des ensembles flous ainsi que le complémentaire d'un ensemble flou. Ces relations sont traduites par les opérateurs « ET », « OU » et « NON ». Les figures représentent la réalisation des opérateurs ET, OU et NON des ensembles flous A et B utilisant des fonctions d'appartenance triangulaires et sont comparés aux opérateurs booléens correspondants. Soit $\mu_A(x), \mu_B(x)$ les degrés d'appartenance de l'élément x dans L'univers de discours X (dénommé par $x \in X$) [CHE09], [MLI16], [CHA05].

- **L'intersection (ET) :**

Le degré de vérité (degré d'appartenance) de la proposition « A ET B » est le minimum des degrés d'appartenance d'A et de B :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (\text{III.7})$$

Est la plus grand d'ensembles flous à la fois dans A et dans B

- **L'union (OU) :**

Le degré de vérité (degré d'appartenance) de la proposition « A OU B » est le maximum des degrés d'appartenance d'A et de B :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (\text{III.8})$$

Est le plus petit ensemble flou contenant à la fois A et B

- **Complément :**

\bar{A} et A (ou négation) :

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{III.9})$$

III.3.3 Notion de variable linguistique

Les systèmes basés sur la logique floue utilisent généralement la connaissance humaine sous forme de règles du type (Si ... Alors ...) La prémisse de la règle (l'antécédent) est constituée des conditions qu'il faut satisfaire afin de réaliser la conclusion de la règle (la conséquence).

II.3.4 Commande par logique floue

La commande par la logique floue est en pleine expansion. En effet, cette méthode permet d'obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire des modélisations approfondies. Par opposition à un régulateur standard ou à un régulateur à contre-réaction d'état, le régulateur par logique floue ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences avec plusieurs règles, se basant sur des variables linguistiques. Par des inférences avec plusieurs règles, il est possible de tenir compte des expériences acquises par les opérateurs d'un processus technique. Généralement le traitement d'un problème par la logique floue se fait en quatre étapes : [BOU10], [ELB09].

- Base de connaissance
- La quantification floue des entrées, appelée aussi la Fuzzification. Elle permet la conversion des variables des entrées qui sont des grandeurs physiques, en grandeurs floues, ou variables linguistiques.
- L'établissement des règles liant les sorties aux entrées, appelé l'Inférence floue.
- La Défuzzification qui est l'opération inverse de la fuzzification. Elle consiste à transformer les variables linguistiques en variables réelles ou numériques.

Le schéma bloc d'un contrôleur flou est illustré par la figure suivante :

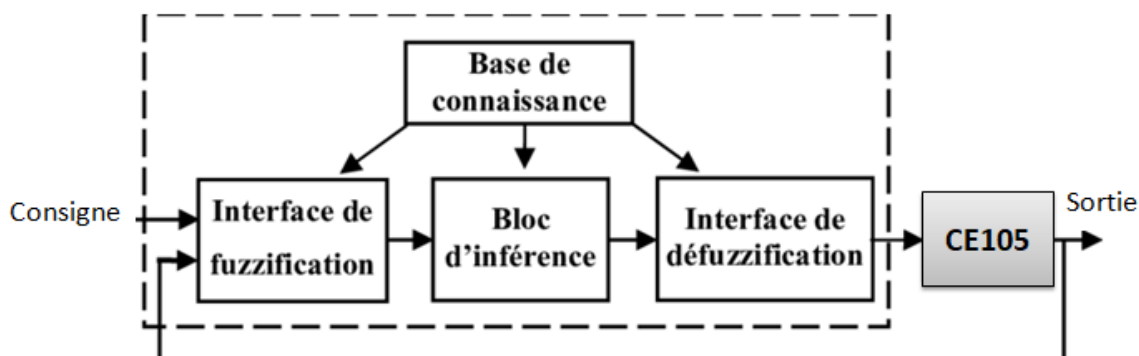


Figure III.9 : Schéma synoptique d'un régulateur flou appliquée au système hydraulique CE105

Le contrôleur flou comporte essentiellement quatre parties ; une interface de fuzzification, une base des règles, un mécanisme d'inférence et une interface de défuzzification.

III.3.4.1 Base de connaissance

La base de connaissance est composée de deux blocs :

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

III.3.4.2 Fuzzification

Elle représente le passage des grandeurs réelles aux valeurs floues et cela, en déterminant les différents univers de discours correspondant aux domaines de variation des variables d'entrée et sortie. Ensuite, on définit pour chacune des variables ses sous-ensembles flous ainsi que leurs fonctions d'appartenance associée [REZ08] [BOU15].

III.3.4.3 Inférence

Dans ce bloc, les valeurs des variables linguistiques d'entrée et sortie sont liées par une table de règles qui doivent tenir compte du comportement statique et dynamique du système à contrôler. C'est un mécanisme de décision qui, en manipulant les règles floues, établit une décision. Il existe plusieurs méthodes d'inférence : Maximum-Minimum, Max-Produit, Somme-Produit.

Le nom de la méthode désigne les opérateurs utilisés respectivement pour l'agrégation des règles floues et l'implication floue [PAS98].

III.3.4.4 Défuzzification

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

d'inférences. L'opération de défuzzification permet de calculer à partir de la fonction d'appartenance résultante, la valeur réelle de la variable de sortie à appliquer au processus. Il existe plusieurs méthodes de défuzzification : méthode du maxima, méthode du centre de gravité, méthode de la moyenne des maxima. Il est toutefois reconnu que la méthode du centre de gravité donne les meilleurs résultats. Notons que des blocs de normalisation et de dénormalisation sont ajoutés respectivement en entrée et sortie du contrôleur flou afin qu'il soit transportable et adaptable même avec des paramètres différents [CHE98].

III.4 Conclusion

L'objet de ce chapitre était de présenter la commande à base de régulateur PID et la commande logique floue et leur contexte ainsi que certaines méthodologies pouvant être utilisées pour les régler. La notion de logique floue et de PID a été présentée ainsi que les blocs de simulations sont mises en œuvre.



CHAPITRE IV

IV.1 Introduction

Pour examiner les différentes lois de commande, développées pour le système hydraulique à réservoirs couplés, nous avons opté pour une étude comparative entre ces différentes commandes.

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

IV.2 Résultats de simulation

Les résultats de simulations des réponses temporelles en boucle fermée seront présentés avec des changements de consignes :

Une consigne de 1mm est appliquée à l'instant t=0 second, une variation de consigne de 1 à 4 mm est appliquée à l'instant t=400 second.

IV.2.1 Résultats de simulations par application de la commande PID

Tout d'abord, on va utiliser le modèle mathématique du système hydraulique CE105 à réservoirs couplés avec la commande PID en boucle fermée.

En utilisant les paramètres du contrôleur PID suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} K_p = 0.163. \\ K_i = 0.0089. \\ K_d = 0.0124 \end{array} \right.$$

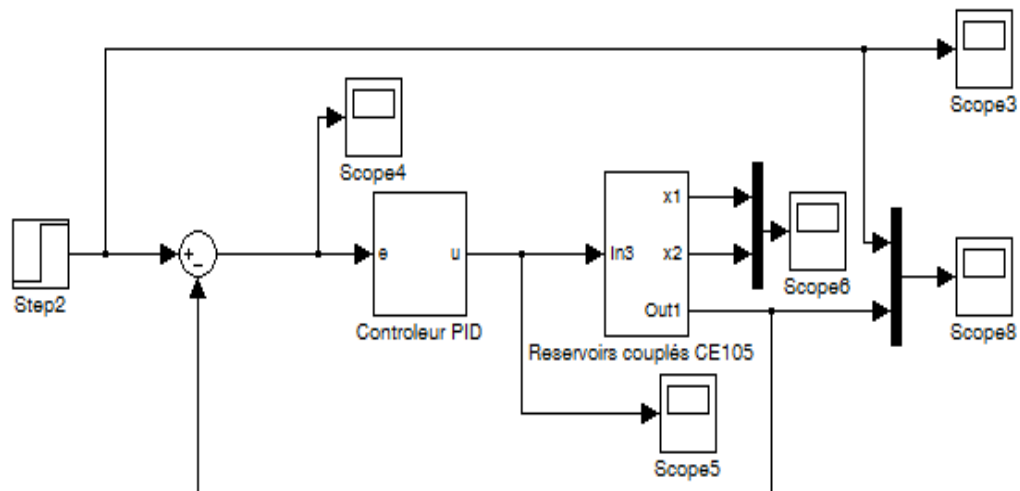
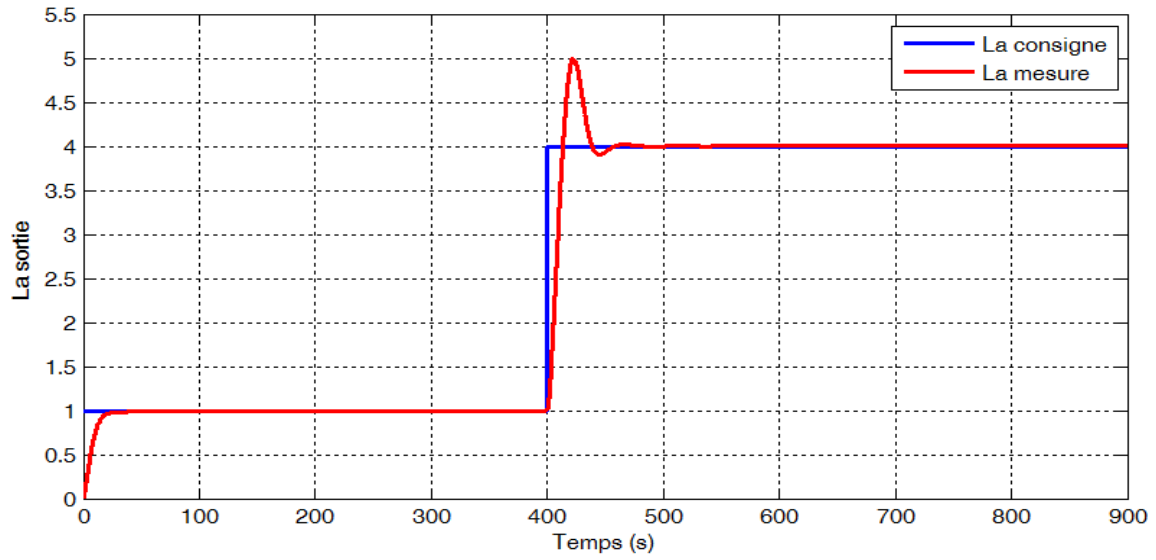
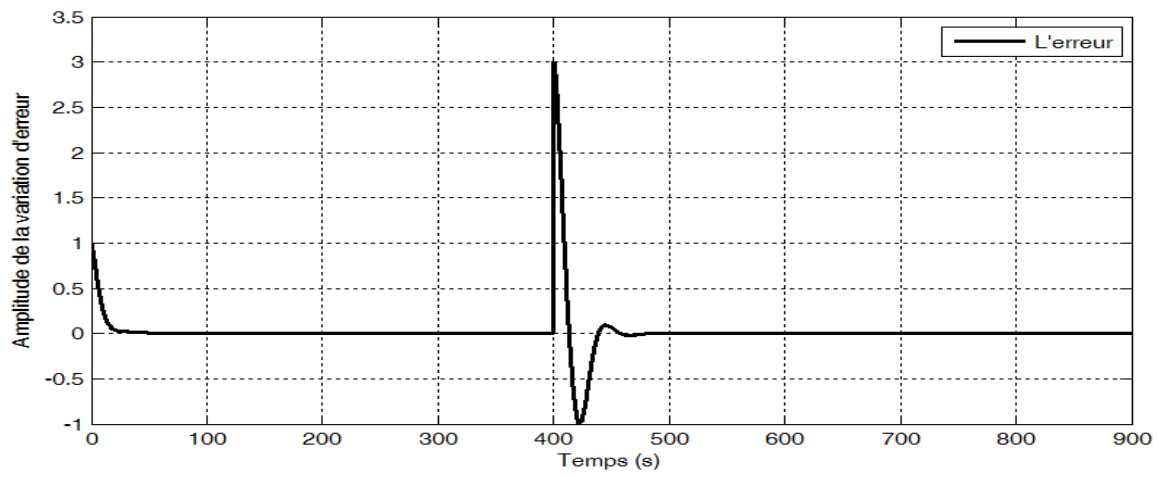


Figure IV.1 : Bloc Simulink des réservoirs couplés CE 105 avec contrôleur PID

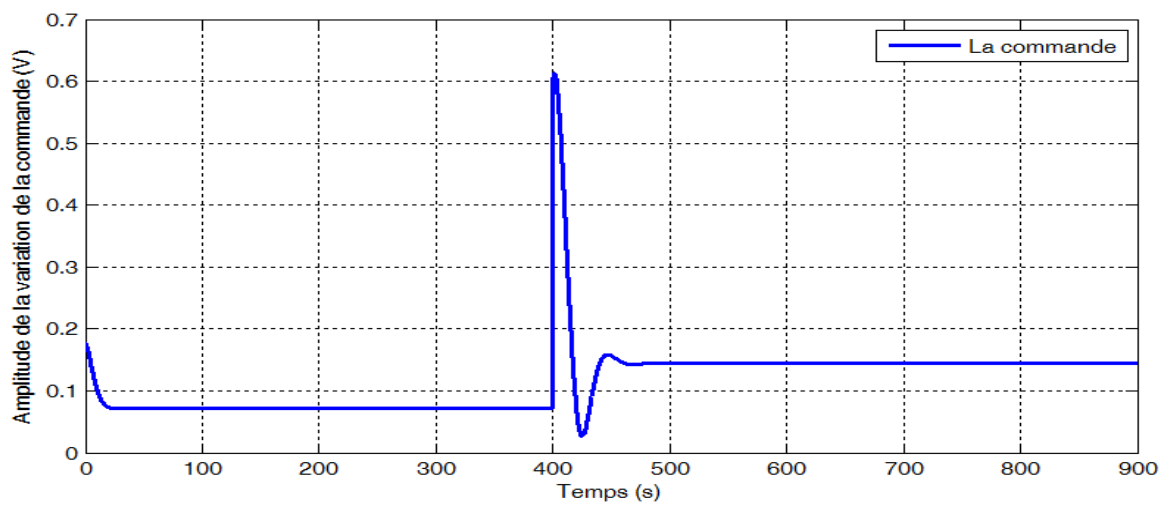
Les résultats de cette simulation obtenus sont illustrés dans la figure IV.2



(a)



(b)



(c)

Figure IV.2: Résultats de simulation de la commande PID

(a) la sortie (b) l'erreur (c) : la commande

IV.2.2 Commentaires des résultats obtenus par la commande PID

Dans cette partie, nous simulons le comportement dynamique de système hydraulique CE 105 à réservoirs couplés avec régulateur PID. Nous remarquons des résultats satisfaisants, avec un petit dépassement après le changement de la consigne a l'instant 422,6sec et un temps de réponse environ de 452secs, ce qui est acceptable par rapport à la nature des systèmes hydrauliques. Des pics sont apparus au niveau de la commande à cause de changement brusque de la consigne.

IV.2.3 Résultats de simulation de la commande logique floue

On utilise le modèle mathématique du système hydraulique CE105 à réservoirs couplés avec la commande floue en boucle fermée.

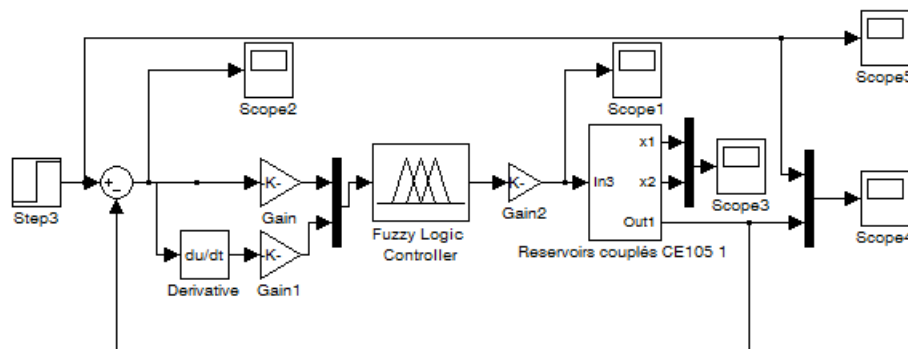


Figure IV.3 : Bloc Simulink des réservoirs couplés CE 105 avec la logique floue.

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

On commence par taper fuzzy à l'invite de la fenêtre de commande de Matlab ce qui lance l'éditeur de contrôleur flou : Fis Editor.

Dans cette partie on va réaliser un régulateur flou avec deux entrées est une sortie (commande). On commence tout d'abord par définir les entrées et les sorties et par la suite on va essayer de lier les fonctions d'appartenances d'une façon logique.

➤ **Étape 1**

La commande Edit permettra de choisir le nombre d'entrées-sorties (2 entrées et 1 sortie dans Notre application). On pourra renommer à loisir ces différentes variables.

➤ **Étape 2**

Double-cliquer sur chaque variable d'entrée ou de sortie pour définir les valeurs linguistiques et la forme des fonctions d'appartenances. Pour cela il faut utiliser dans le nouveau menu Edit la commande Add MFs, ce qui signifie ajouter des fonctions d'appartenances. On pourra choisir des fonctions triangulaires [trimf], trapézoïdales [trapmf], etc...

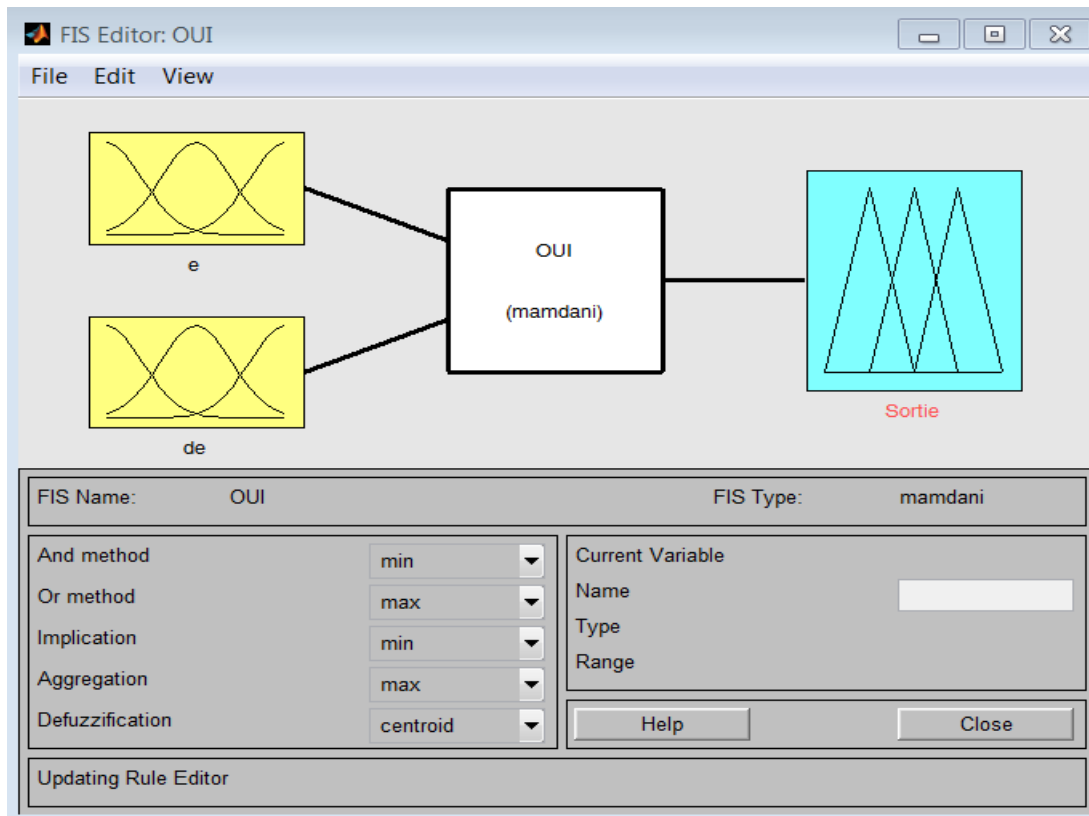


Figure IV.4 : Identification des entrées et de sortie

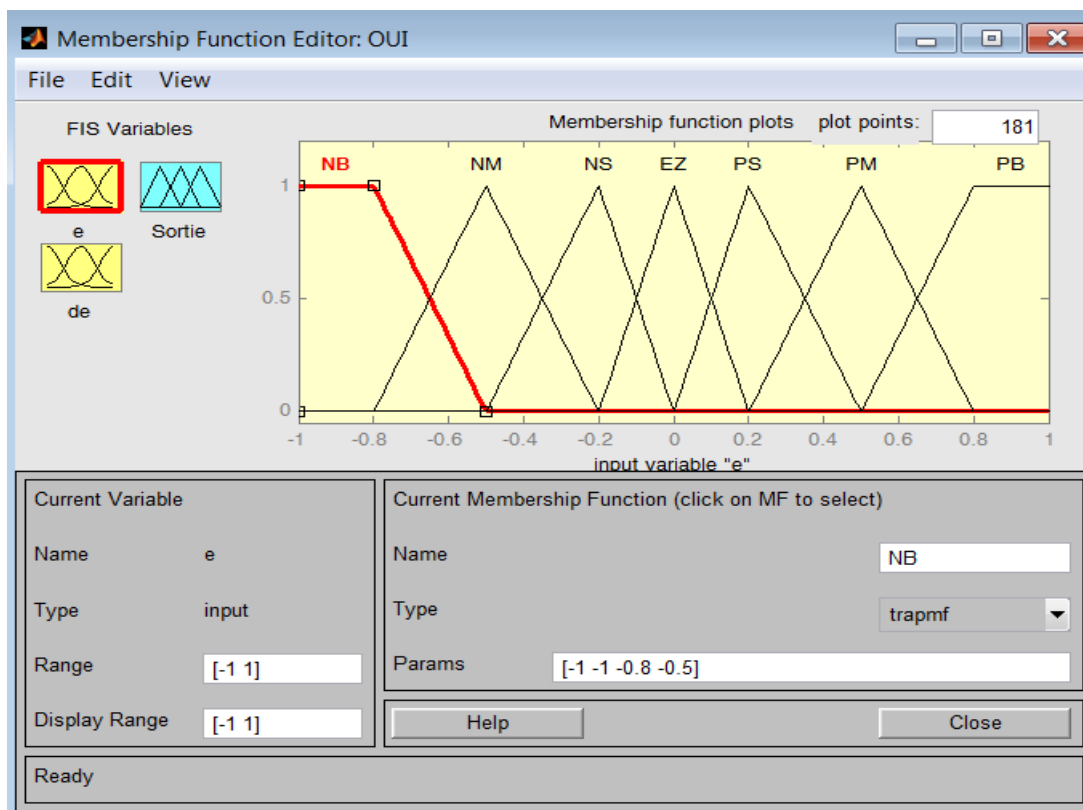


Figure IV.5 : Fonction d'appartenance de l'erreur.

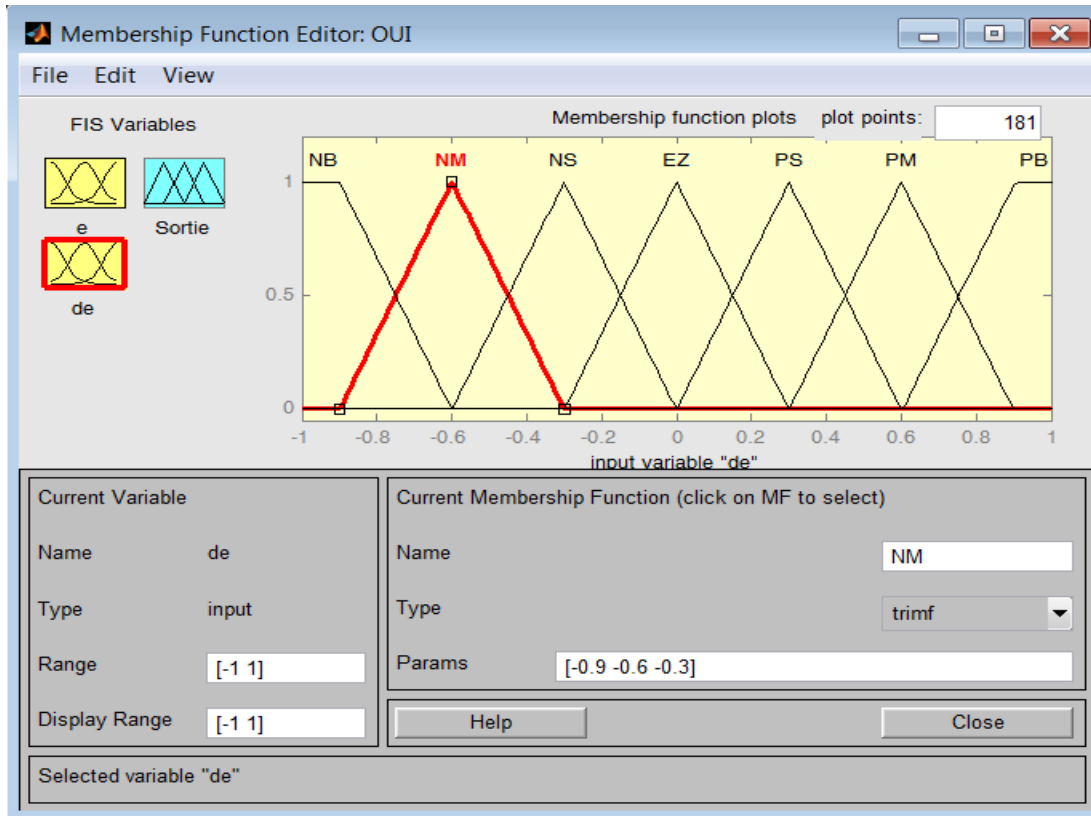


Figure IV.6 : Fonction d'appartenance de la dérivé d'erreur.

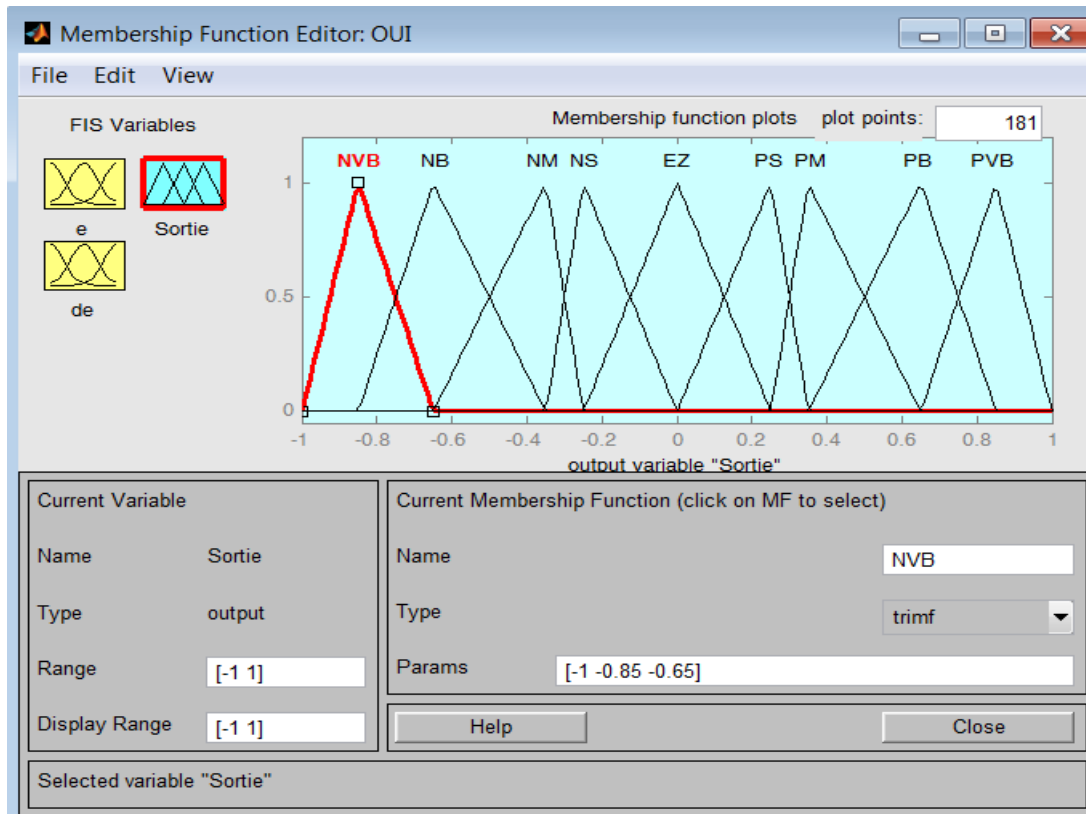


Figure IV.7 : Fonction d'appartenance de la commande.

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

Base de Règle

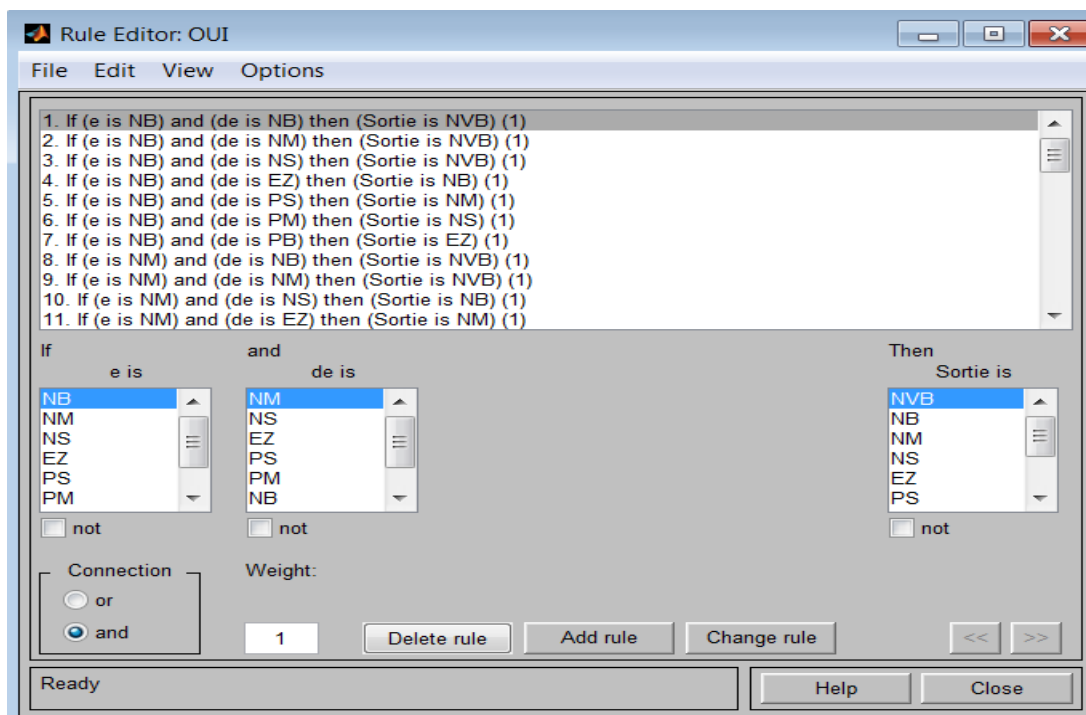
Après avoir complété le paramétrage des blocs d'entrées et de sortie, on procède par l'élaboration des règles logiques qui répondent au cahier des charges, en les implémentant dans le bloc inférence.

Tableau IV.1 : Table de règles.

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

➤ **Étape 3**

Double-cliquer sur le bloc central (Mandani) pour entrer les règles d'inférences choisies.

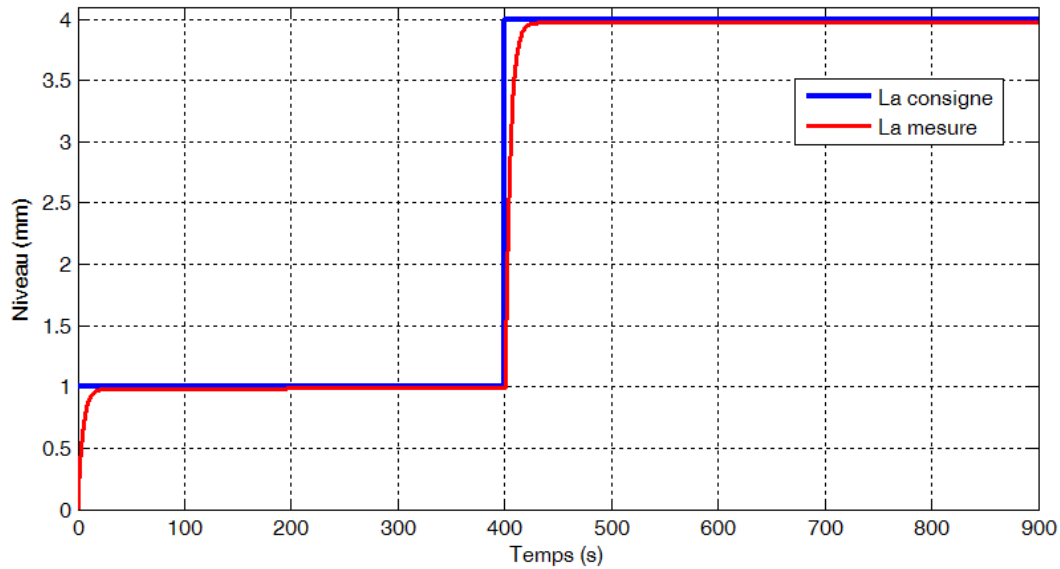


FigureIV.8 : Implémentation des règles d'inférences

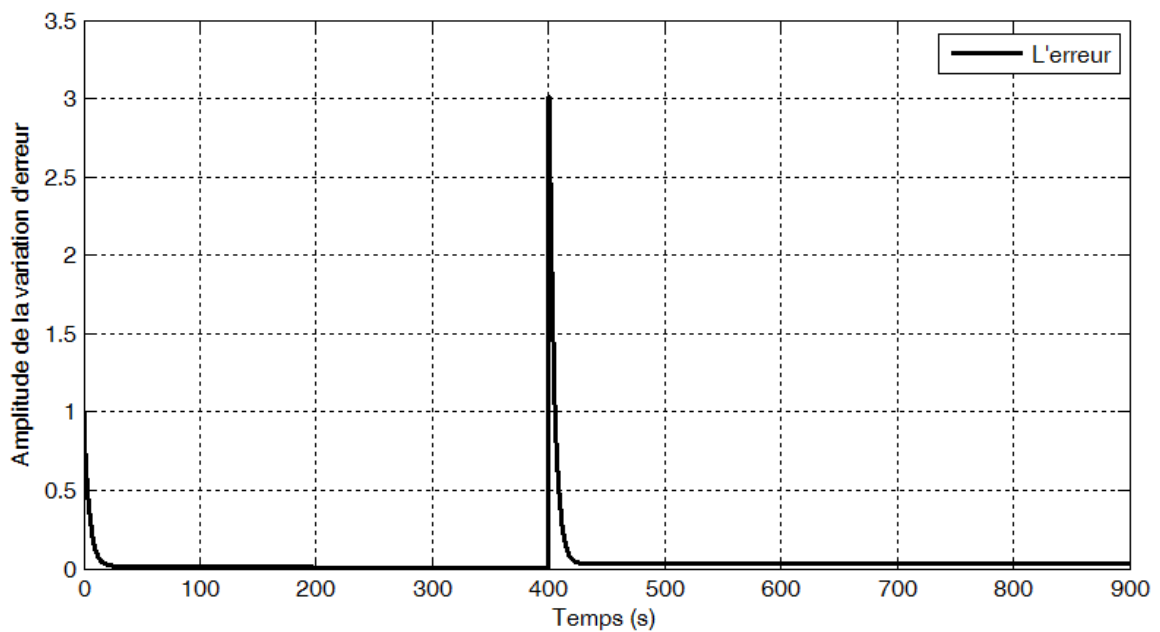
➤ **Étape 4**

Pour visualiser le comportement du contrôleur ainsi créé, on pourra utiliser dans le menu View, la commande View rules. Il est alors possible de fixer les valeurs des variables d'entrées, de voir quelles sont les règles d'inférences activées et de lire la valeur de la tension de commande correspondante.

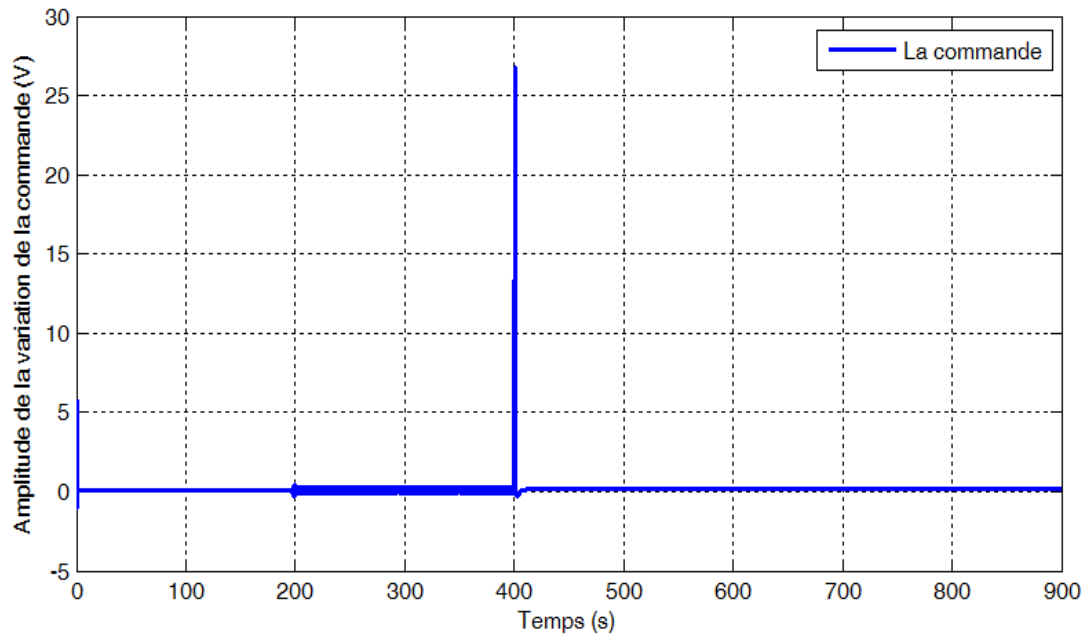
Les résultats de cette simulation obtenus sont illustrés dans la figure ci-dessus



(a)



(b)



(c)

Figure IV.9 : Résultats de simulation de la commande Floue.

(b) la sortie (b) l'erreur (c) : la commande

IV.2.4 Commentaire des résultats obtenus avec commande floue

A travers les résultats de simulations montrés dans la figures IV.9,on peut dire que l'application commande floue nous donne des très bonnes performances citant par exemple le temps de d'établissement qui est 15,9 sec et 423 sec lors de changements de consignes, ce qui est normal par rapport à la dynamique lente qui caractérise les systèmes hydrauliques.

IV.3 Etude comparative

Notre étude concerne à la comparaison entre le régulateur flou et le régulateur PID, dans cette partie en va relever les mesures nécessaires pour cette comparaison.

On obtient les mesures ci-dessous, Ces mesures nous montrent la performance du régulateur flou par rapport au régulateur PID, avec dépassement, temps de montée, temps d'établissement, écart statique pour les deux consignes :

Tableau IV.2: Etude comparative entre flou et PID lors de premier changement de consigne

commande	Dépassement (D%)	Temps de monté (sec)	Temps d'établissement (sec)	Ecart statique
PID	0	13.6	19.4	0.001
Logique flou	0	10.8	15.6	0.003

Tableau IV.3: Etude comparative entre flou et PID lors de deuxième changement de consigne

commande	Dépassement (D%)	Temps de montée (sec)	Temps d'établissement (sec)	Ecart statique
PID	33	409.6	452	0
Logique flou	0	410.5	423	0.028

IV.4 Commentaire sur les résultats des tableaux :

Notre étude concerne à la comparaison entre le régulateur floue et le régulateur PID, dans cette partie en vas prendre les mesures nécessaires pour cette comparaison. On remarque que l'erreur de régulateur PID est inférieure par rapport à l'erreur de régulateur floue, donc le régulateur PID est plus précis.

Le temps de réponse de régulateur floue est inférieure par rapport à le temps de réponse de régulateur PID, donc le régulateur floue est le plus rapide

IV.5 Conclusion

L'objet de ce chapitre était de présenter la commande par régulateur PID pour ce système non linéaire. La simulation effectuée sur le système hydraulique CE105, permet de conclure que les erreurs de poursuites sont relativement faibles.

La commande à base de logique floue et son contexte ainsi que certaines méthodologies pouvant être utilisées pour les régler. Les résultats obtenus en utilisant un contrôleur flou appliqué au système hydraulique permettent de conclure que :

La régulation par logique floue donne de bonnes performances pour ce qui est de la qualité des réponses dynamiques du système.



Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce travail de mémoire, nous sommes intéressés au problème de l'application des commandes non linéaire sur le modèle d'un système hydraulique CE105. Une première partie présente les concepts de base de modélisation du système hydraulique CE105 et outils mathématiques de synthèse et d'analyse nécessaires pour la conception des structures de commande développées dans ce mémoire on peut résumer le travail effectué 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.

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

Le procédé est tout d'abord décrit par des équations non linéaires en se basant sur les équations de bilan de débit. La première technique utilisée est la commande par régulateur PID.

La deuxième technique utilisée est la commande par logique floue. Les outils fournis par la logique floue type « Mamdani » permettent une modélisation des phénomènes pouvant en un certain sens s'approcher du raisonnement humain. Le fait de dépasser le tout ou rien des ordinateurs introduit une souplesse faisant la puissance des outils flous dans de nombreux domaines.

Cette étude nous a permis de formuler les remarques suivantes :

- La commande à régulateur PID classique garde ses avantages, de simple calcul, ne permet pas de faire un calcul mathématique.
- Il est possible de remédier aux problèmes du système hydraulique CE105, via les outils de la commande intelligente. Telle que, la logique floue. Néanmoins, comme ses outils peuvent améliorer les performances de la commande, ils peuvent avoir un effet de dégradation dans certains cas, sur la robustesse de la commande.

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

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

Références bibliographiques

- [BOU07] : A. Boubakir, Méthodes de commande par mode de glissement appliquées au bras manipulateur et au système hydraulique CE105 à réservoirs couplés, Mémoire de magistère, Ecole Militaire Polytechnique, 2007.
- [WEL93] : Wellstead, TecQuipment CE105 Coupled Tanks Apparatus, Control Systems Centre, Manchester, U.K, 1993.
- [KAD13] : Y. Kadri, « cours régulation automatique », Université Kasdi Merbah– Ouargla, 2013-2014.
- [BSA94] : A. Bsata, « instrumentation et automation dans le contrôle des procédés », 2ème édition, 1994.
- [PIG05] : B. Pigeron, H. Mullot, A. Chaix, L. Félix, Y. Aubert, « boucle de régulation étude et mise au point », 4ème édition, 2005.
- [GAT19] : P. Gatt, « régulation industrielle », Bts CIRA 1 – Lycée Rouvière, édition 2019.
- [PRO09] : P. Prouvost, « Instrumentation et Régulation en 30 fiches »,2009.
- [BIS03] : C. Bissieres, Cours thème I, « Acquisition d'une grandeur physique (capteur) »,2003.
- [GHA05] : L. Gharbi, Ecole Nationale d'Ingénieur de TUNIS, « cours de mesure et instrumentation » ,2005.
- [WEB1]: <http://www.legarrec.com/entreprise/differentes-pompes-industrielles/>
- [MS12] : M. Sahraoui « capteur de température et capteur de niveau », Université de Mohamed Khidder Biskra 2012/2013.
- [IAP17] : Formation a Institut Algérien de Pétrole Arzew « Instrumentation pétrolière », Mars 2017.
- [CAR72] : M. CARLIER ; « Hydraulique générale et appliquée » ; Editions Eyrolles 1972.
- [ROS05] : T. Rosario « Commande et diagnostic des systèmes dynamiques » ; Elipses ; 2005
- [ZEG12] : S. Zeglache, « TP de 2 eme année Master (commande du système non linéaire) », Master automatique Université de M'sila, 2011/2012.
- [ZAM96] : I. Zambettakis, « la régulation PID « Lille, juillet 1996.
- [BEN16] : O. Ben kherif, étude comparative en simulation entre un régulateur PID classique et un régulateur PID intelligent, master en électronique, Université Mohamed Boudiaf de Msila, 2016.
- [DER11] : F. Dernoncourt, Introduction à La Logique Floue ; Paris, Avril 2011.

Références bibliographiques

- [MER07] : MERADI, Samir (2007) Estimation des paramètres et des états de la machine asynchrone en vue du diagnostic des défauts rotoriques. Masters Thesis, Université Mohamed Khider – Biskra.
- [CHE09] : S. Chekroun, « commande neuraux-floue sans capteur de vitesse d'une machine asynchrone triphasé », mémoire magister, (E.N.S.T. d'Oran), 2009.
- [CHA05]: Y. Chabane, « commande hybride floue-algorithmes génétique pour l'amortissement dans la réseaux électrique » mémoire de magister, (E.N.P), 2005.
- [MLI16] : F. Mlika, Laghouag Ibrahim, « commande adaptative par logique floue de la MAS » mémoire de magister, univ. M'sila, 2016.
- [BOU10] : BOUBAYAN ; " Commandes non Linéaires d'un Palier Magnétique Actif " Mémoire de Magister Ecole Nationale Polytechnique 2010.
- [ELB09] : ELBIA.Y; "Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté" Université de Batna ; Mémoire « Ingénieur d'Etat en Electrotechnique », 2009.
- [REZ08] : H. Rezzine : « Introduction à la Logique Floue & à la Commande Floue ». Cours 3A, Ing Contrôle des Systèmes. Ecole Militaire Polytechnique (EMP), Alger (Algérie), 2008.
- [BOU15] : A. Bouguerra. « Commande Tolérante aux Défauts d'un Appareil à Vol Vertical », Thèse de doctorat, Université de M'sila, Algérie, 2015.
- [PAS98] : K. M. Passino et S. Yurkovich. «Fuzzy Control». Addison-Wesley. The Ohio State University, 1998.
- [CHE98] : F. Chevrie, F. Guely. « La logique floue ». Cahier Technique n° 191. Groupe Schneider. Mars, 1998.
- [ZAD65]: L.A. ZADEH; "Fuzzy Sets, Information and Control", Vol. 08, pp. 29 - 44, 1965.