

الجامعة الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الدكتور الطاهر مولاي سعيدة -

Université Saida Dr Tahar Moulay –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Automatique

Spécialité : Automatique et Systèmes

Par : AKKAL Abderrahim et ABID El Hadj

Sujet

Conception et analyse des performances d'un contrôleur flou pour un système de régulation de niveau d'eau dans un réservoir industriel

Soutenue publiquement en **29/06/2022** devant le jury composé de :

Mr. Sekour M'hamed	MCA	Univ. Saida	Président
Mr. BENMAHDJOUB Mohammed Amin	MAB	Univ. Saida	Rapporteur
Mr. BOUROUINA Abdelkader	MAA	Univ. Saida	Examinateur

Année universitaire 2021/2022

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout premièrement dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Dr.Mohammed Amin BENMAHDJOUB pour avoir d'abord proposée ce thème,

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants et le chef de département Dr. Amara mohamed qui a contribué à notre formation par ailleurs, Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral.



Dédicaces

*A mes très chers parents et
ma grande famille.*

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers frères et mes sœurs.

A tous mes amis.

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

ABDERRAHIM



Dédicaces

*Ce travail est dédié particulièrement à
mes parents qui m'ont soutenu tout au long
de ma vie scolaire et universitaire.*

A mes très chers frères et mes très chères sœurs.

A mes oncles et mes tantes.

A tous mes amis.

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou loin pour
la réalisation de ce modeste travail.*

*A tous mes camarades de la promotion Master II
et tous les autres sans exception.*

EL HADJ

Table des matières

Remerciement	
Dédicace -1	
Dédicace -2	
Table des matières.....	i
Introduction générale	1

Chapitre I : Les éléments constituant un circuit hydraulique

I.1	Introduction	4
I.2	Composantes de l'installation d'un système hydraulique	4
I.3	Réservoir.....	5
I.3.1	Fonctions des réservoirs.....	5
I.3.2	Emplacement des réservoirs:	6
I.3.3	Classification des réservoirs	7
I.3.4	Equipements du réservoir	7
I.3.4.1	Conduite d'arrivée ou d'alimentation	7
I.3.4.2	Conduite de départ ou de distribution.....	8
I.4	Pompes et principe de fonctionnement:.....	8
I.4.1	Pompes centrifuges :	9
I.4.2	Les pompes volumétriques	12
I.4.3	Pompes volumétrique à mouvement alternatif	14
I.5	Electrovannes.....	14
I.5.1	Principes de fonctionnement de l'électrovanne :	14
I.6	Capteur de niveau	16
I.6.1	Méthodes de mesure de niveau	16
I.6.1.1	Méthodes hydrostatiques	16
I.6.1.2	Différents types de capteurs à mesure hydrostatique	18
I.6.1.3	Différents types de capteurs à mesure par onde	19
I.6.1.4	Différents types de capteurs à mesure électrique	20
I.7	Relais électromécanique	23
I.7.1.1	Principe de fonctionnement.....	23
I.8	Conclusion.....	25

Chapitre II : Modélisation d'un système hydraulique à un et à deux réservoirs

II.1	Introduction	25
II.2	Système hydraulique à un et réservoir.....	26
II.2.1	Description du système hydraulique à réservoir unique	26
II.2.2	Modélisation du système hydraulique à un réservoir.....	27
II.2.3	Simulation et discussion.....	29
II.2.3.1	Variation de la section du tube de sortie	29
II.2.3.2	Variation du débit d'entrée	30
II.3	Système hydraulique à deux réservoirs	31
II.3.1	Description du système hydraulique à deux réservoirs couplés.....	31
II.3.2	Modélisation du système hydraulique.....	32
II.3.3	Résultat et discussion	39
II.4	Conclusion	41

Chapitre III : Modélisation en vue de la commande d'un système hydraulique deux réservoirs couplés

III.1	Introduction	42
III.1.1	Outils mathématiques.....	43
III.1.2	Linéarisation entrée/sortie	44
III.1.2.1	Principe de la commande par linéarisation entrée/sortie	44
III.1.2.2	Systèmes mono variables	45
III.1.2.3	Degré relatif	45
III.1.2.4	Loi de commande linéaire.....	48
III.2	La logique floue.....	49
III.2.1	Les opérations des ensembles flous	49
III.2.1.1	Notions d'ensemble flou	49
III.2.1.2	Les opérations et les normes	50
III.2.1.3	Les propositions floues et les variables linguistiques	51
III.2.1.4	Implication floue (règle Si /Alors):.....	51
III.2.2	Système d'inférence floue	52

III.2.2.1	Fuzzyfication (quantification floue)	53
III.2.3	Inférence floue.....	54
III.2.4	Défuzzification ou concrétisation.....	56
III.2.4.1	Défuzzification par le centre de gravité	56
III.2.4.2	Calcul du centre de gravité lors de la méthode d'inférence SOM / PROD	57
III.2.4.3	Méthode par valeur maximum	57
III.2.5	Les applications de la logique floue	58
III.2.5.1	Commande floue.....	58
III.2.5.2	Diagnostic industriel	59
III.3	Conclusion	60

Chapitre IV : Commande d'un système hydraulique à deux réservoirs couplés

IV.1.	Introduction	62
IV.2.	Commande par linéarisation entrée/sortie	62
IV.2.1.	Linéarisation autour d'un point de fonctionnement	62
IV.2.2.	Commande du système hydraulique a deux réservoirs	64
IV.2.3.	Résultats et discussion.....	66
IV.3.	Commande par la logique floue	68
IV.3.1.	Etape du fuzzification.....	69
IV.3.2.	Etape des règles linguistiques	70
IV.3.3.	Défuzzification:	71
IV.3.4.	Résultats et discussion.....	71
IV.4.	Supervision du système hydraulique	73
IV.5.	Conclusion	75

Introduction générale

On entend par système automatisé dans le domaine hydraulique l'ensemble des moyens (matériels et logiciels) constituant la partie automatisme, communication et conduite de l'installation. Il assure l'acquisition de l'information fournie par les capteurs, en fait le traitement et élabore la commande des actionneurs. Les actionneurs (électrovannes, pompes), pré-actionneur (relais) sont des outils dans les processus hydrauliques.

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 tel 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.

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 : linéarisation entrée/sortie, la logique floue.

L'objectif de ce travail consiste à présenter et évaluer des techniques de commande appliquées à un système hydraulique à deux réservoirs couplés, en l'occurrence, la commande par linéarisation entrée/sortie et la commande par la logique floue.

Ce manuscrit est organisé de manière à assurer le suivi du plan de travail utilisé en vue d'atteindre les objectifs de cette mémoire. À cette fin, le manuscrit est divisé en quatre chapitres. Dans le premier chapitre de ce travail, nous présenterons les éléments constituant un système hydraulique et le principe de son fonctionnement. Dans le deuxième chapitre, on présente la description et la modélisation d'un système hydraulique à un réservoir et à deux réservoirs. Le deuxième chapitre présente également le modèle d'état du système étudié et les résultats de simulation en boucle ouverte. Dans le troisième chapitre, nous présenterons le

Introduction générale

principe de la commande par linéarisation entrée/sortie et son application au système hydraulique. De plus, nous allons présenter une introduction sur la commande floue, en illustrant les principes de base de la commande par logique floue. Dans le dernier chapitre, nous présenterons l'application des lois de commande, par linéarisation des entrées et des sorties et par logique floue, synthétisées dans le troisième chapitre. Dans ce chapitre, nous allons présenter également des simulations réalisées en boucle fermée afin de faire une comparaison entre les deux régulateurs.

Les éléments constituant un circuit hydraulique

I.1	Introduction	4
I.2	Composantes de l'installation d'un système hydraulique	4
I.3	Réservoir.....	5
I.3.1	Fonctions des réservoirs.....	5
I.3.2	Emplacement des réservoirs:	6
I.3.3	Classification des réservoirs	7
I.3.4	Equipements du réservoir	7
I.3.4.1	Conduite d'arrivée ou d'alimentation	7
I.3.4.2	Conduite de départ ou de distribution.....	8
I.4	Pompes et principe de fonctionnement:.....	8
I.4.1	Pompes centrifuges :	9
I.4.2	Les pompes volumétriques	12
I.4.3	Pompes volumétrique à mouvement alternatif	14
I.5	Electrovannes.....	14
I.5.1	Principes de fonctionnement de l'électrovanne :	14
I.6	Capteur de niveau [10]	16
I.6.1	Méthodes de mesure de niveau	16
I.6.1.1	Méthodes hydrostatiques	16
I.6.1.2	Différents types de capteurs à mesure hydrostatique	18
I.6.1.3	Différents types de capteurs à mesure par onde	19
I.6.1.4	Différents types de capteurs à mesure électrique	20
I.7	Relais électromécanique	23
I.7.1.1	Principe de fonctionnement.....	23
I.8	Conclusion.....	25

I.1 Introduction

L'hydraulique est un domaine très vaste, l'automatisation d'un système hydraulique est un assemblage des composants hydraulique, mécanique, électronique et même informatique qui fonctionnent de manière élémentaire et complémentaire. Alors on a consacré ce chapitre à étudier les éléments participants à la réalisation de notre petit réseau hydraulique qu'on va l'automatiser.

I.2 Composantes de l'installation d'un système hydraulique

De nombreux processus techniques nécessitent la transmission d'une puissance mécanique entre générateur et récepteur, pour cela le mouvement contrôlé de pièces ou l'application contrôlée de la force est une exigence courante dans les industries. Ces opérations sont principalement effectuées à l'aide de machines électriques ou de moteurs diesel à essence et à vapeur. Ces moteurs peuvent fournir divers mouvements aux objets, en utilisant des attachements mécaniques tels que les vérins. Il y a d'autres systèmes qui contrôlent le mouvement de pièces telles que le système hydraulique.

Le système hydraulique est un assemblage de composants fonctionnant de manière unitaire et souvent en interaction, afin d'utiliser un fluide incompressible c'est d'huile comme moyen de transmission pour effectuer un travail mécanique. Tout dispositif actionné par des fluides hydrauliques peut être appelé un dispositif hydraulique, mais une distinction doit être faite entre les dispositifs qui utilisent la force d'un mouvement et ceux à opérer par pression, cela nous amène à la catégorisation ultérieure du domaine de l'hydraulique en :

- Hydrodynamique
- Hydrostatique

L'hydrodynamique est l'étude des propriétés physiques d'un fluide en mouvement, ce fluide a un impact sur un objet et libère une partie de son énergie pour effectuer un travail utile. L'hydrostatique traite l'énergie potentielle du fluide incompressible où la pression qu'exerce sur ce fluide est établie par moyen extérieur comme une pompe, cette forme d'énergie hydrostatique est utilisée dans les systèmes hydrauliques qui fonctionnent sur le principe de la loi de pascal.

Dans la suite du chapitre, les composantes de l'installation d'un système hydraulique seront détaillées.

I.3 Réservoir

Dans le cadre de notre projet d'automatisation, les réservoirs de stockage ainsi le réservoir puits représentent des éléments qui seront gérés par l'automate.

I.3.1 Fonctions des réservoirs

Les fonctions générales assurées par les réservoirs d'eau potable sont multiples de nature technique et économique [1].

➤ Fonction technique

- Le réservoir est un ouvrage régulateur de débit qui permet d'adapter la production à la consommation.
- Le réservoir assure une fonction de sécurité d'approvisionnement dans l'éventualité d'un incident sur les équipements d'alimentation du réseau de distribution : pollution de l'eau brute alimentant la station de traitement, défaillances d'origine diverses des installations, rupture d'une canalisation d'adduction, interruption de l'alimentation en énergie,...
- La troisième fonction technique est une fonction de régulation de pression.
- Enfin, les réservoirs disposés à l'aval immédiat d'une station de traitement jouent un rôle de réacteur participant au traitement en assurant un temps de contact suffisant entre l'agent désinfectant et l'eau, garantissant ainsi une désinfection adéquate de celle-ci avant distribution.

➤ Fonction économique

- Les réservoirs peuvent conduire à des économies significatives sur les investissements réalisés sur le réseau de distribution, en réduisant le diamètre des canalisations maîtresses (réservoirs dits d'équilibre desservant les extrémités de réseaux, cas des refoulements – distributions,...).
- Par ailleurs lorsque la distribution est alimentée à partir d'un pompage, l'existence d'un réservoir en charge sur le réseau de distribution conduit à des économies au niveau de divers aspects énergétiques : réduction de la puissance installée et de la puissance souscrite en pointe pour la station de pompage, coûts des consommations d'énergie proprement dites puisque par l'existence des divers tarifs horaires de

l'énergie, les réservoirs permettent de privilégier le pompage pendant les heures de plus faible coût de l'énergie.

Ces fonctions sont résumées par le tableau I. 1 :

Fonctions techniques	Fonctions économiques
- Régulation du débit	- Réduction des investissements sur les ouvrages de production
- Sécurité d'approvisionnement	- Réduction des investissements sur le réseau de distribution
- Régulation de la pression	- Réduction des dépenses d'énergie
- Simplification de l'exploitation	
- Réacteur participant au traitement	

Tableau I .1. Fonctions d'un réservoir.

I.3.2 Emplacement des réservoirs:

L'emplacement des réservoirs est déterminé pour assurer le bon fonctionnement et avoir une pression suffisante chez le consommateur [2].



Figure I .1. Photo du Réservoir [2].

L'emplacement du réservoir pose souvent un problème délicat à résoudre. Il faut tenir compte des certaines considérations à savoir :

- Pour des raisons d'économie, il est préférable que son remplissage se fasse par gravité, ce qui implique qu'on puisse le placer à un niveau bas par rapport à la prise d'eau.
- l'alimentation du réseau de distribution doit se faire par gravité, le réservoir doit être construit à un niveau supérieur à celui de l'agglomération.
- lorsque plusieurs réservoirs sont nécessaires, on doit les planter de préférence soit en extrémité du réseau, soit à proximité du centre important de consommation directement lié à l'emplacement de la station de pompage

I.3.3 Classification des réservoirs

On peut classer les réservoirs en plusieurs catégories [3] :

- **D'après la nature des matériaux de construction, on distingue :**
 - Les réservoirs en maçonnerie,
 - Les réservoirs en béton armé ou ordinaire,
- **D'après la situation des lieux, ils peuvent être :**
 - Enterrées
 - Semi-enterrés
 - Surélèves
- **D'après leurs formes :**
 - Circulaires
 - Rectangulaires
 - Carrés

I.3.4 Equipements du réservoir

Le réservoir doit être équipé [3] :

I.3.4.1 Conduite d'arrivée ou d'alimentation

La conduite d'adduction a son débouché dans le réservoir et doit pouvoir s'obturer quand l'eau atteint dans la cuve son niveau maximal, Obturation par robinet-fLOTTEUR si l'adduction est gravitaire ou dispositif permettant l'arrêt du moteur si l'adduction s'effectue par refoulement.

Cette conduite peut être installée de plusieurs manières:

❖ **Par Le haut**

Soit avec chute libre soit en plongeant la conduite de façon à ce que son extrémité soit Toujours noyée, le premier cas provoque une oxygénation de l'eau mais il libère facilement le gaz carbonique dissous et par suite il favorise l'entartrage du réservoir et des conduites.

❖ **Par Le bas**

Soit par le bas à travers les parois du réservoir soit par le fond à travers le radier.

I.3.4.2 Conduite de départ ou de distribution

Cette conduite est placée à l'opposé de la conduite d'arrivée à quelque centimètre au-dessus du radier (15 à 20cm) pour éviter l'entrée de matières en suspension. L'extrémité est munie d'une crépine courbée pour éviter le phénomène de vortex (Pénétration d'air dans la conduite). Cette conduite est équipée d'une vanne à survitesse permettant la fermeture rapide en cas de rupture au niveau de cette conduite.

❖ **Conduite de trop-plein :**

La conduite du trop-plein est destinée à empêcher l'eau de dépasser le niveau maximal, elle se termine par un système simple bout à emboîtement.

L'extrémité de cette conduite doit être en forme de siphon afin d'éviter l'introduction de certains corps nocifs dans la cuve.

❖ **Conduite de vidange :**

La conduite de vidange doit partir du point le plus bas du radier. Elle permet la vidange du réservoir en cas de nettoyage ou de réparation. Elle est munie d'un robinet vanne, et se raccorde généralement à la conduite de trop-plein. Le robinet vanne doit être nettoyé après chaque vidange pour éviter les dépôts de sable.

❖ **Conduite by-pass :**

Elle relie la conduite d'adduction à celle de distribution. Elle assure la distribution pendant le nettoyage du réservoir son fonctionnement est le suivant :

Normale 1 et 2 sont ouverts le 3 est fermé, En BY-PASS : 1 et 2 sont fermés le 3 est ouvert

I.4 Pompes et principe de fonctionnement:

Devant la grande diversité de situations possibles, on trouve un grande nombre de machines que l'on peut classer en deux groupes : Les pompes volumétrique comprenant les pompes alternatives (a' piston, a 'diaphragme,...) et les pompes rotatives (a' vis, a 'engrenage, a' palettes, hélicoïdales, péristaltiques....).

Les turbopompes sont toutes rotatives ; elles regroupent les pompes centrifuges, a 'hélico-centrifuges. Dans le domaine de pompage de l'eau (alimentation en eau potable, traitement et évacuation des eaux usées). Les pompes les plus fréquemment utilisées sont les pompes centrifuges. [4]

Il existe un très grand nombre de type de pompes. Ces différents types se divisent en deux grandes familles : turbopompes (centrifuges), pompes volumétrique.

L'utilisation d'un type de pompes ou d'un autre dépend des conditions d'écoulement du fluide. De manière générale, si on augmente la vitesse d'un fluide on utilisera plutôt les pompes volumétriques, tandis que si on veut augmenter le débit on utilisera plutôt les pompes centrifuges.

❖ **les pompes centrifuges :**

Le mouvement du liquide résulte de l'accroissement d'énergie qui lui est communiquée par la force centrifuge.

❖ **les pompes volumétriques :**

L'écoulement résulte de la variation d'une capacité occupée par le liquide.

I.4.1 Pompes centrifuges :

➤ **Principe de fonctionnement**

Une pompe centrifuge est constituée par:

- Une roue à aubes tournant autour de son axe.
- Un distributeur dans l'axe de la roue.
- Un collecteur de section croissante, en forme de spirale appelée volute.

Le liquide arrive dans l'axe de l'appareil par le distributeur et la force centrifuge le projette vers l'extérieur de la turbine. Il acquiert une grande énergie cinétique qui se transforme en énergie de pression dans le collecteur où la section est croissante.

L'utilisation d'un diffuseur (roue à aubes fixe) à la périphérie de la roue mobile permet une diminution de la perte d'énergie [5].

On peut décomposer le fonctionnement en deux étapes :

- ❖ L'aspiration : Le liquide est aspiré au centre de roue par une ouverture appelée distributeur dont le rôle est de conduire le fluide depuis la conduite d'aspiration jusqu'à la section d'entrée de la roue. La pompe étant amorcée, c'est à dire liquide, la vitesse du fluide qui entre dans la roue augmente et par conséquent la pression dans l'ouïe diminue et engendre ainsi une aspiration et maintient l'amorçage.
- ❖ Le refoulement : la roue transforme l'énergie mécanique appliquée à l'arbre de

Machine en énergie cinétique A la sortie de la roue, 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. [4]

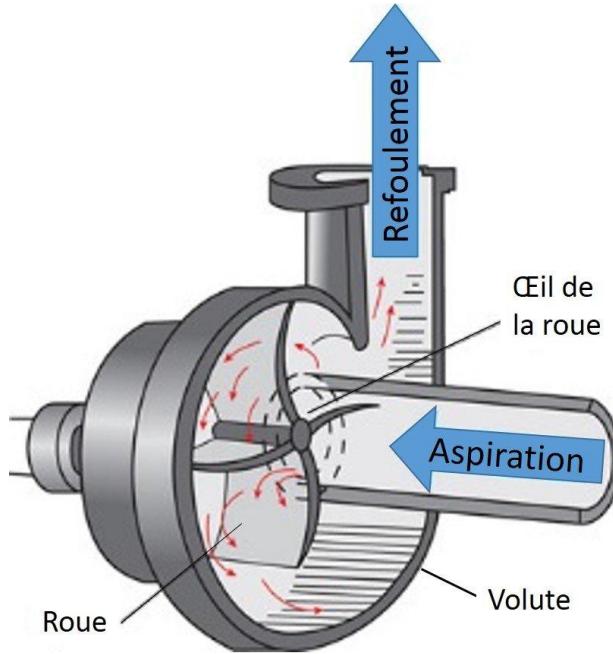


Figure I.2. Pompe centrifuge.

➤ **Classification des pompes centrifuges :**

Les pompes centrifuges sont classées suivant la forme de la roue, la forme du corps de la pompe, le nombre des roues et là l'axe de la pompe.

❖ **Forme de la roue :** Il existe essentiellement trois types de pompes :

- Les pompes centrifuges (a' écoulement radial).
- Pompes hélico centrifuges (a' écoulement diagonal).
- Pompes axiales ou à hélices (a' écoulement axiales).

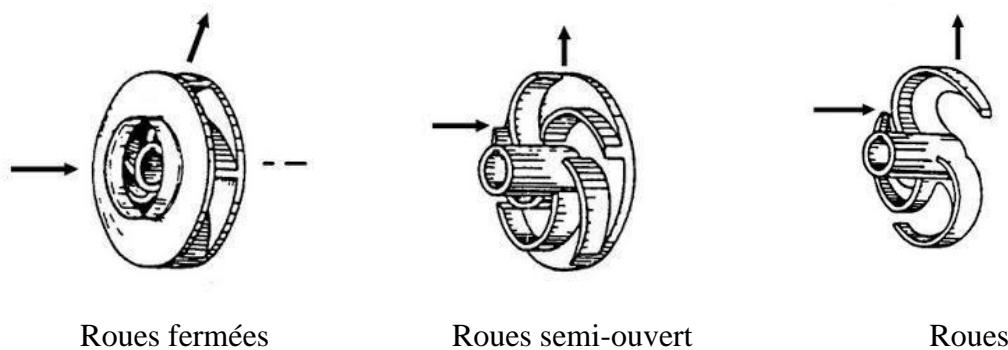


Figure I.3. Les types des roues.

- ❖ **Forme du corps de pompe** : Ils existent essentiellement les types de pompes suivants :
 - a) **Pompes à volute ou colimaçon** : Corps de pompe dessiné de façon à maintenir les vitesses égales autour de et à réduire la vitesse de l'eau dans le passage à la section de sortie.
 - b) **Pompes à diffuseur circulaire ou du type turbine** : Corps de pompe à section constante et concentrique à la roue qui dans ce cas est entourée d'aubes fixes qui dirigent l'écoulement et réduisent la vitesse de l'eau, ainsi transformant l'énergie cinétique en énergie de pression.
 - ❖ **Forme de roues** : On peut diviser les pompes en catégories :
 - a) **Pompes à un seul étage,(pompes monocellulaire)** :Quand la pompe ne comporte qu' une seule cellule, elle est monocellulaire. Elle se compose d'une roue et d'une volute ou corps de pompe, qui joue le rôle du diffuseur de la pompe. On peut atteindre des pressions de 1.5 à 8 bars (soit 15 à 80 m d'eau).
 - b) **Pompes multicellulaires** : Elles sont utilisées lorsque la pression exigée au refoulement est importante, donc il serait théoriquement possible d'utiliser une pompe équipée d'une roue de grand diamètre, mais il est général très rentable d'utiliser des pompes multicellulaires (plusieurs étages) constituées de monocellulaires montées en série sur un même arbre de commande. On peut atteindre des pressions très importantes de 8 à 30 bar (soit 80 à 300 m d'eau) [6].



Figure I.4. Pompe multicellulaire à arbre horizontal.

- ❖ **La position de l'axe :** Les pompes sont classées en pompes à axe horizontal, à axe vertical et à axe incliné.
 - a) **Pompes à axe horizontal :** (figure I. 4) Cette disposition est la plus classique, elle est adoptée généralement pour les pompes de surface .L'entretien et le démontage de la pompe sont simplifiés.
 - b) **Pompes à axe vertical :** Ces pompes verticales sont submergées ou immergées, elles sont spécialement conçues pour l'équipement des puits profonds.

I.4.2 Les pompes volumétriques

➤ **Principe de fonctionnement et généralités :**

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos l'intérieur duquel se déplace un élément mobile rigoureusement ajusté. Leur fonctionnement repose sur le principe suivant:

- exécution d'un mouvement cyclique
- pendant un cycle, un volume déterminé de liquide pénètre dans un compartiment avant d'être refoulé à la fin.

Ce mouvement permet le déplacement du liquide entre l'orifice d'aspiration et l'orifice de refoulement. On distingue généralement:

- ❖ **les pompes volumétriques rotatives :** Ces pompes sont constituées par une pièce mobile animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe, qui tourne dans le

corps de pompe et crée le mouvement du liquide pompé par déplacement d'un volume depuis l'aspiration jusqu'au refoulement.

- ❖ **les pompes volumétriques alternatives:** la pièce mobile est animée d'un mouvement alternatif. Les pompes volumétriques sont généralement auto-amorçasses. Dès leur mise en route elles provoquent une diminution de pression en amont qui permet l'aspiration du liquide. Il est nécessaire néanmoins d'examiner la notice du fabricant.

Les pompes volumétriques permettent d'obtenir des hauteurs manométriques totales beaucoup plus élevées que les pompes centrifuges. La pression au refoulement est ainsi plus importante. Le débit est par contre généralement plus faible mais il ne dépend pratiquement pas des caractéristiques du réseau. [5]

- ❖ **Pompes volumétrique rotative**

- a) **Pompes à palettes libres Fonctionnement :** un corps cylindrique fixe communique avec les orifices d'aspiration et de refoulement. A l'intérieur se trouve un cylindre plein, le rotor, tangent intérieurement au corps de la pompe et dont l'axe est excentré par rapport à celui du corps. Le rotor est muni de 2 à 8 fentes diamétralement opposées deux à deux, dans lesquelles glissent des palettes que des ressorts appuient sur la paroi interne du stator. Le mouvement du rotor fait varier de façon continue les différentes capacités comprises entre les cylindres et les palettes en créant ainsi une aspiration du liquide d'un côté et un refoulement de l'autre. [7]
- b) **Pompes à engrenage :** Une pompe à engrenage a deux ou trois roues engrenées tournant dans un carter. La roue d'entraînement est attachée à un arbre d'entraînement qui est connecté à une source d'énergie externe. Pompe à engrenage: elles sont très répandues et peu coûteuses parce qu'elles sont simples et économiques à utiliser Support de Formation: EXP-PR-EQ020-FR
Dernière Révision: 01/06/2007
- c) **pompe à vis :** Une vis centrale motrice entraînant deux vis satellites. Elles ont un fonctionnement silencieux et un écoulement stable, et engendrent des pressions élevées [7].

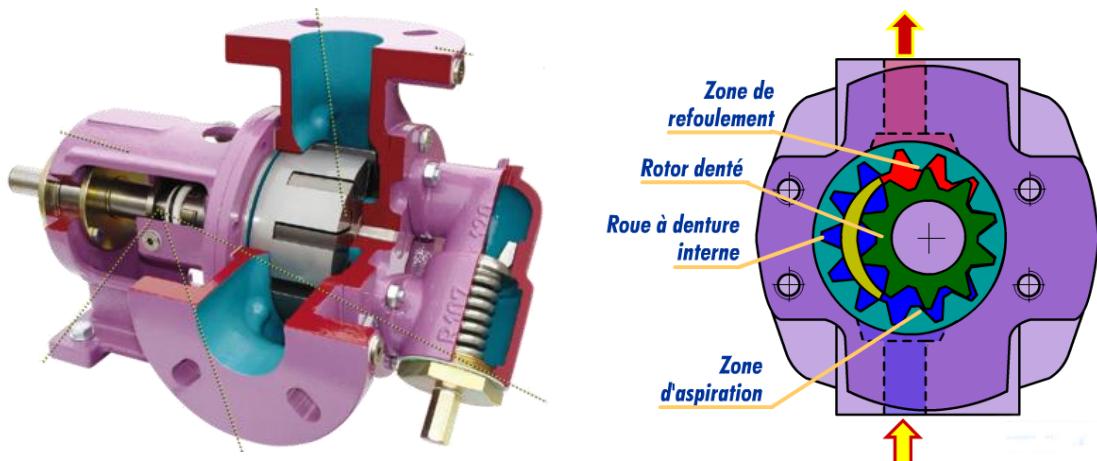


Figure I.5. Pompe à engrenage externe [7].

I.4.3 Pompes volumétrique à mouvement alternatif

Ces pompes sont caractérisées par le fait que la pièce mobile est animée d'un mouvement alternatif. Les principaux types de pompes sont les suivant : à membrane ou à piston.

- a) **Pompes à membranes, ou à soufflets** : Le déplacement du piston est remplacé par les déformations alternatives d'une membrane en matériau élastique (caoutchouc, élastomère, Néoprène, Virton, etc.). Ces déformations produisent les phases d'aspiration et de refoulement que l'on retrouve dans toute pompe alternative. [8]
- b) **Pompes à piston** : Son principe est d'utiliser la variation de volume occasionnée par le déplacement d'un piston dans un cylindre. Ces déplacements alternatifs dans un sens ou dans l'autre produisent des phases d'aspiration et de refoulement. Quand le piston réouvre le clapet de refoulement. Le Fonctionnement est inverse lors de l'aspiration du liquide dans la pompe [7].

I.5 Electrovannes

I.5.1 Principes de fonctionnement de l'électrovanne :

Elle fonctionne en « tout ou rien » : elle a donc deux états « stables » suivant qu'elle est ou non alimentée électriquement [9] (il n'est pas possible de doser l'ouverture de cette vanne).

- ❖ **Eléments principaux :**
- a) **en bleu** : Le noyau métallique mobile réalisant l'aiguillage du liquide
- b) **en orange** : Le ressort maintenant en position le noyau en l'absence d'alimentation électrique
- c) **en rouge** : Le bobinage (vu en coupe) éventuellement alimenté électriquement

1. entrée du liquide (haute pression)
2. sortie du liquide en direction de l'élément hydraulique à alimenter
3. retour du liquide vers le réservoir (basse pression)

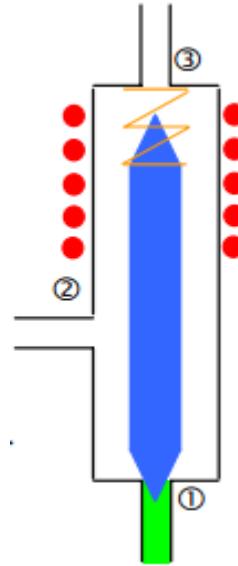


Figure I.6. Schéma de constitution de l'électrovanne.

➤ **Etat « fermé » (pas d'alimentation électrique) :**

En l'absence d'alimentation électrique le noyau est maintenu par le ressort en appui sur le trou 1, qui se trouve donc bouché. Les trous 2 et 3 communiquent.

La liquide haute pression est bloqué par la vanne et n'atteint pas l'élément hydraulique à commander. L'élément hydraulique connecté en 2 renvoie la pression résiduelle (et ses fuites hydrauliques internes) vers le réservoir connecté en 3.

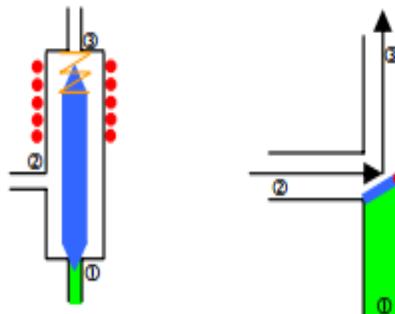


Figure I.7. Etat fermé d'électrovanne.

➤ **Etat « ouvert » (vanne alimentée électriquement) :**

La bobine est alimentée en courant électrique et produit donc un champ magnétique attirant le noyau (le ressort est comprimé) vers le trou 3 qui se trouve alors bouché. Les

trous 2 et 1 communiquent Le liquide haute pression est transmis à l'élément hydraulique à commander connecté en 2 Le retour réservoir connecté en 3 est isolé.

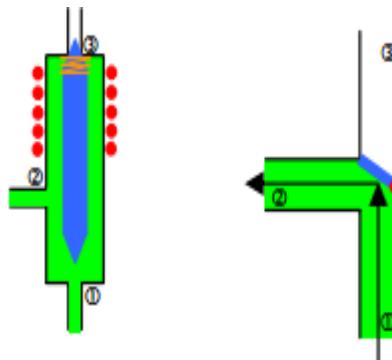


Figure I.8. Etat ouvert d'électrovanne.

I.6 Capteur de niveau [10]

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.

Le mot "niveau" a de nombreux sens dans la langue française. En physique, le niveau correspond à la distance entre la surface d'un liquide et le fond du réservoir le contenant.

I.6.1 Méthodes de mesure de niveau

I.6.1.1 Méthodes hydrostatiques

Pour un liquide homogène donné, la pression relative en fond de réservoir est proportionnelle au niveau de celui-ci. La mesure de cette pression nous informe directement sur le niveau de liquide, mais dépend de la masse volumique du liquide (figure I.9).



Figure I.9. Mesure de niveau.

➤ Mesure par pression

Un capteur de pression mesure la pression relative au fond du réservoir. Cette pression est l'image du niveau L du liquide (fig.I.10).

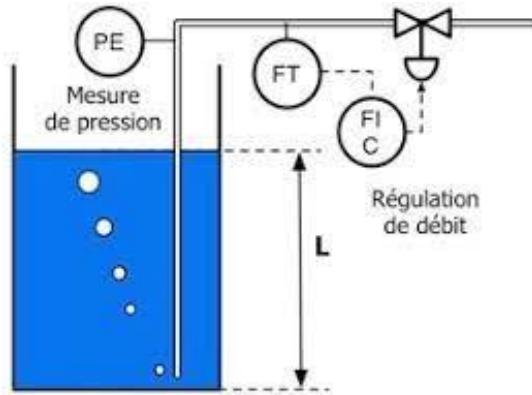
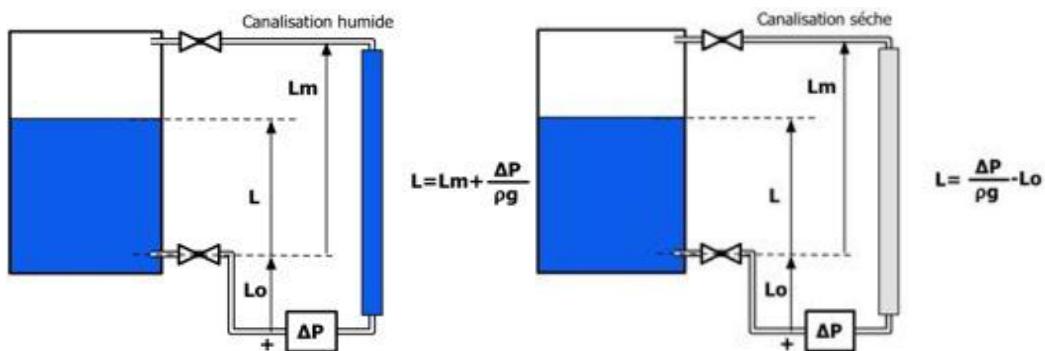


Figure I.10. Principe mesure de niveau par capteur de pression.

Figure I.11. Capteur de pression.

➤ Mesure en réservoir fermée

Si le réservoir est fermé, on utilise un capteur de pression différentielle. Il existe alors deux montages différents. Si l'atmosphère est sans condensation, on utilisera un montage avec une canalisation sèche. Si l'atmosphère est avec condensation, le montage utilisera une canalisation humide.



Atmosphère avec condensation - $\Delta P < 0$

Atmosphère sans condensation - $\Delta P > 0$

Figure I.12. Mesure de niveau dans un réservoir.

I.6.1.2 Différents types de capteurs à mesure hydrostatique

➤ Capteur de type flotteur

Le flotteur se maintient à la surface du liquide. Il est solidaire d'un capteur de position qui délivre un signal électrique correspondant au niveau. Sa position est peu dépendante de la masse volumique de liquide.

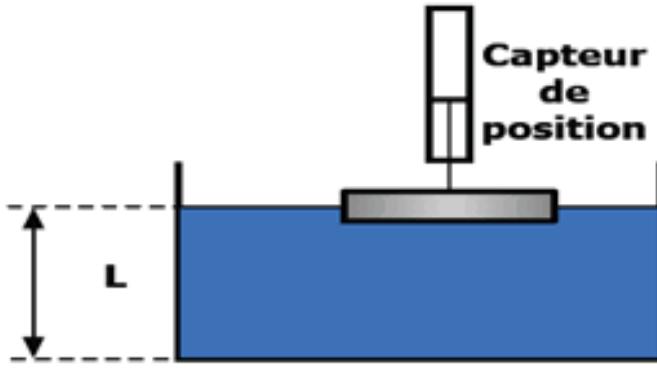


Figure I.13. Principe mesure de niveau par flotteur



Figure I.14. Flotteur.

➤ Capteur de type plongeur

Le plongeur est un cylindre immergé (fig.14) dont la hauteur est au moins égale à la hauteur maximale du liquide dans le réservoir. Il est suspendu à un capteur dynamométrique qui se trouve soumis à une force F (le poids apparent), fonction de la hauteur L du liquide :

Avec P le poids du plongeur, s sa section et $p \times g \times s \times L$ la poussée d'Archimède s'exerçant sur le volume immergé du plongeur (p : masse volumique du liquide, g : Accélération de la pesanteur).

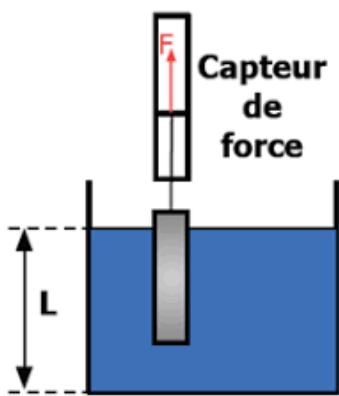


Figure I.15. Principe mesure de niveau par plongeur.



Figure I.16. Capteur de niveau de type plongeur

I.6.1.3 Différents types de capteurs à mesure par onde

➤ Capteur de type acoustique

En mesure continue, on utilise un transducteur fonctionnant successivement en émetteur et en récepteur. Ce transducteur (Figure.I.17) placé au sommet du réservoir émet, dans un cône de faible ouverture, des trains d'onde acoustiques qui après réflexion sur la surface du liquide retournent vers le transducteur qui les convertit en signal électrique.

L'intervalle de temps Δt séparant l'émission de la réception du train d'ondes réfléchi est proportionnelle à la distance du transducteur à la surface du liquide : il est donc fonction du niveau. Δt est inversement proportionnelle à la célérité du son qui dépend de la température: celle-ci doit donc être mesurée afin que puisse être effectuée la correction nécessaire. Le transducteur est une céramique piézo-électrique pour les ondes ultrasonores (40 kHz par exemple), il est de type électrodynamique pour les infrasonores (10 kHz par exemple). Les ondes sonores qui sont moins atténuées par la propagation trouvent application pour la mesure de distances importantes (de 10 à 30 m) alors que les ondes ultrasonores procurent aux distances plus courtes une meilleure précision.

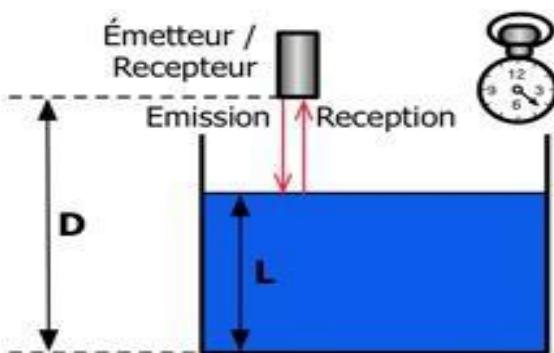


Figure I.17. Principe de mesure par ondes.



Figure I.18. Capteur de niveau acoustique.

➤ Capteur de type Radar

Le principe de fonctionnement est le même que celui des ondes acoustiques, celle-ci sont remplacée par des ondes électromagnétiques.

La vitesse des ondes électromagnétique est indépendante de :

- La composition du gaz.
- La température.
- La pression.
- Densité.
- Les tribulations.

I.6.1.4 Différents types de capteurs à mesure électrique

Ce sont des méthodes employant des capteurs spécifiques, c'est à dire traduisant directement le niveau en signal électrique. Leur intérêt réside dans la simplicité des dispositifs et la facilité de leur mise en œuvre.

➤ Capteurs capacitifs

Lorsque le liquide est isolant, un condensateur est réalisé soit par deux électrodes cylindriques, soit par une électrode et la paroi du réservoir si celui-ci est métallique. Le diélectrique est le liquide dans la partie immergée, l'air en dehors. L'implantation des électrodes pour mesure en continu ou en détection s'effectue comme pour le capteur conductimétrique.

La mesure ou la détection de niveau se ramène à la mise en variation de capacité qui est d'autant plus importante que la constante diélectrique ϵ_r du liquide est supérieure à celle de l'air ; on prend généralement comme condition d'emploi de la méthode $\epsilon_r > 2$. Dans le cas d'un liquide conducteur, on utilise une seule électrode recouverte d'un isolant qui constitue le diélectrique du condensateur dont l'autre est formée par le contact du liquide conducteur.

➤ Capteurs conductimétriques

La sonde est formée de deux électrodes cylindriques, le rôle de l'une d'elles pouvant être assuré par le réservoir lorsqu'il est métallique (figure. I.19). La sonde est alimentée par une faible tension (10 V) alternative afin d'éviter la polarisation des électrodes.

En mesure continue, la sonde est placée verticalement et sa longueur s'étend sur toute la plage de variation de niveau. Le courant électrique qui circule est d'amplitude

proportionnelle à la longueur d'électrode immergée, mais sa valeur dépend de la conductivité du liquide.

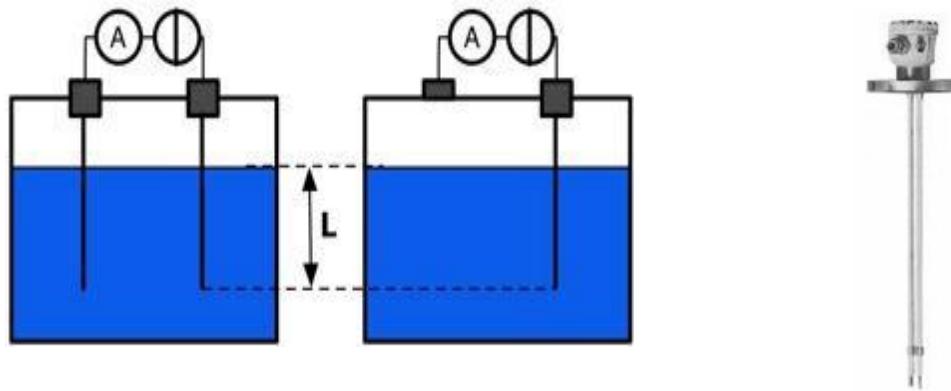


Figure I.19. Principe mesure de niveau par capteur de pression.

Figure I.20. Capteur de niveau électrique.

➤ Détection

En détection, on peut, par exemple, placer une sonde courte horizontalement au niveau seuil. Un courant électrique d'amplitude constante apparaît dès que le liquide atteint la sonde (figure I.21).

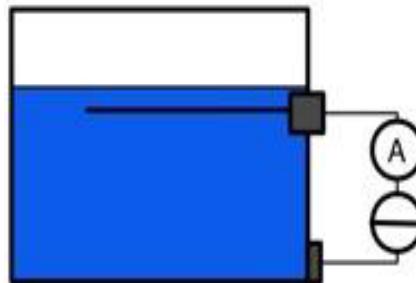


Figure I.21. Détection de niveau électrique.

Il est utilisable uniquement avec des liquides conducteurs (conductance minimale de l'ordre de 50 S), non corrosifs et n'ayant pas en suspension une phase isolante (huile par exemple). La pression est comprise entre le vide et 160 bar et une température comprise entre -200°C et 250°C.

➤ Capteur de type flotteur (tout ou rien TOR)

Il s'agit d'un interrupteur à flotteur, en nylon, totalement étanche et neutre. Le flotteur est constitué d'un cylindre, qui coulisse librement le long de la tige principale. La position de ce cylindre permet d'ouvrir ou de fermer le circuit électrique enfermé dans la tige principale.



Figure I.22. Photo du capteur flotteur

En butée contre la tête du capteur, le courant passe. Dès que le flotteur s'éloigne de la tête, le courant ne passe plus.

Ce type de capteur s'installe verticalement, de manière fixe, dans la cuve que l'on souhaite piloter. La position « tête en haut » ou « tête en bas », permet de choisir le mode de fonctionnement « normalement ouvert » ou « normalement fermé ».

Nous avons donc l'ingrédient de base : l'interrupteur électrique, piloté en fonction du niveau d'eau.

➤ Capteur détecteur d'eau (TOR)

Il fonctionne en « tout ou rien » : il a donc deux états « stables » suivant que la sonde détecte ou pas l'eau. Il donne l'information où la sonde du capteur est implantée à un certain niveau voulu dans le réservoir par conséquent la détection se fait sur ce niveau seulement.

C'est un capteur le moins couteux puisque on a réalisé par nous-même selon la nature physique de la conduction d'électricité dans l'eau. Le principe est très simple, comme nous le savons l'eau est un bon conducteur de l'électricité, il suffit de plonger une sonde construit à base de conducteur non corrosifs ensuite faire sortir les câbles vers un étage amplificateur pour amplifier le courant qui passe par cette sonde. Cette sonde doit être placé et fixer dans un niveau bien déterminé dans le réservoir. Ce type de capteur a le même principe que le type flotteur à contact électrique.

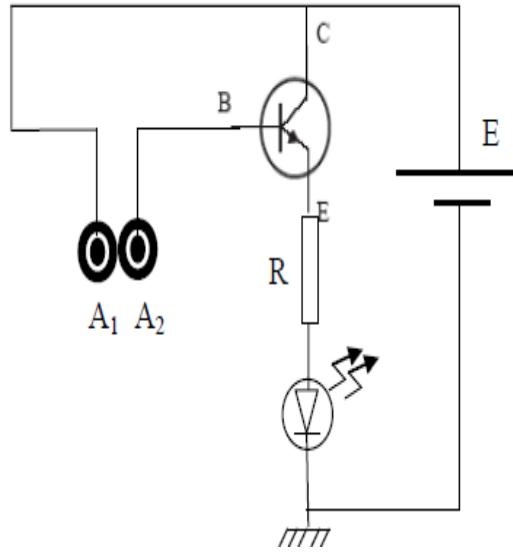


Figure I.23. Principe mesure de niveau par capteur détecteur d'eau (TOR).

La présence d'une goutte d'eau entre les deux files A1 et A2 (sonde) laisse passer un faible courant entrant dans la base du transistor.

Alors que le rôle du transistor, monté en émetteur commun (figure(b)), est d'amplifier le courant de la base du transistor par la formule suivante :

$$I_C = B I_B \text{ Avec } B \text{ gain du courant.}$$

Automatiquement la LED s'allume est indiqué que l'eau est présent dans la sonde.

I.7 Relais électromécanique

Le relais est un accessoire électrique contenant un petit électro-aimant. Lorsqu'on lui envoie un courant électrique d'une faible intensité, cet électro-aimant actionne une sorte de petit interrupteur de meilleure qualité et de plus grande capacité que l'interrupteur d'origine. Le premier circuit se nomme "circuit de commande", le second "circuit de puissance". L'intérêt principal de la chose est que le courant électrique qui passe par l'interrupteur original est bien moins important que dans le montage "en direct". Il permet également de raccourcir la partie du câblage électrique qui conduit un courant électrique de forte intensité [11].

I.7.1.1 Principe de fonctionnement

Le principe de base est simple: il s'agit d'un interrupteur, piloté par une tension de commande.

Le but est de commander le passage d'un courant fort, à partir d'une faible tension.

Ce type de relais a une entrée de commande en 5 V de tension continue, et permet de piloter un appareil électrique en 220 V jusqu'à 300 W de puissance.

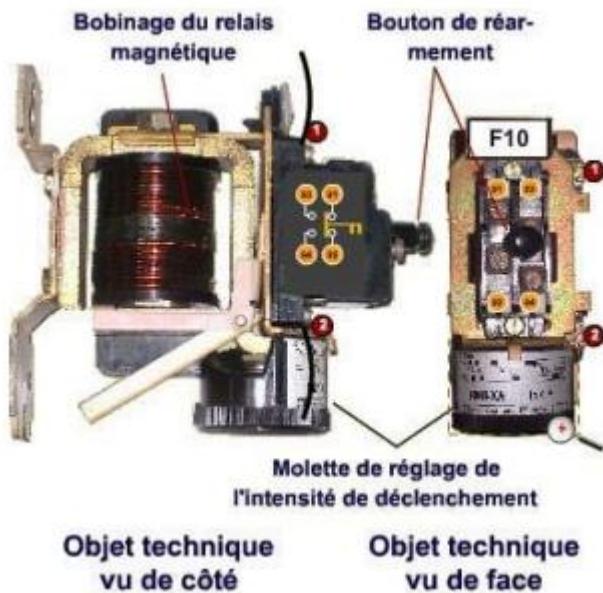


Figure I.24. Relais électromécanique.

➤ Constitution

Un relais est un pré actionneur constitué au moins :

- d'un électroaimant (bobine + circuit ferromagnétique).
- d'une palette mobile supportant 1 contact mobile.
- ainsi qu'un contact fixe.
- d'un ressort de rappel du contact mobile.

En alimentant la bobine, le contact mobile est déplacé fermant ainsi le contact électrique. En l'absence de courant dans la bobine le ressort de rappel maintient le contact ouvert.

a) La partie puissance:

C'est elle qui fait office d'interrupteur et c'est elle qui va alimenter l'appareil quisera branché en sortie, (moteur de ventilation, phare, (pompe à essence....) Elle fournit la puissance électrique C'est un bras en acier sur lequel est placé un contacteur en acier spécial.

Lorsque les contacts se touchent, le circuit est dit fermé, Le contact est établi entre l'entrée et la sortie puissance, et le courant peut alors circuler d'une borne à l'autre.

b) La partie commande:

Elle est "le doigt" qui va presser sur l'interrupteur, elle se compose d'une petite bobine, et d'un axe qui se trouve en son centre. Lorsque la bobine est parcourue par un courant, l'axe qui se trouve en son centre devient un aimant. Cet aimant va pousser ou tirer sur le bras du contacteur. Ceci aura pour effet de fermer le circuit (relais classique).

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré les éléments constituant l'installation de notre circuit hydraulique qui transporte l'eau. Il sera constitué principalement par : une pompe, un réservoir de stockage (citerne, château d'eau, ...), deux autres réservoirs qui constituent le réseau hydraulique à contrôler, les capteurs de niveaux particulièrement le type détecteur d'eau à mesure électrique, les relais et les électrovannes. Ces différents éléments sont utiles à la conception de notre projet.

Modélisation d'un système hydraulique à un et à deux réservoirs

II.1	Introduction	26
II.2	Système hydraulique à un et réservoir.....	26
II.2.1	Description du système hydraulique à réservoir unique	26
II.2.2	Modélisation du système hydraulique à un réservoir.....	27
II.2.3	Simulation et discussion.....	29
II.2.3.1	Variation de la section du tube de sortie	29
II.2.3.2	Variation du débit d'entrée	30
II.3	Système hydraulique à deux réservoirs	31
II.3.1	Description du système hydraulique à deux réservoirs couplés.....	31
II.3.2	Modélisation du système hydraulique.....	32
II.3.3	Résultat et discussion	39
II.4	Conclusion.....	41

II.1 Introduction

Le comportement dynamique d'un système quelconque ne peut être étudié que s'il est possible de le représenter par un modèle mathématique souvent donné par un système d'équations différentielles ordinaires. L'élaboration d'un modèle dynamique ou la modélisation consiste à utiliser des lois de la physique et/ou des règles de calcul empiriques afin de construire.

Un modèle dynamique relativement simple et satisfaisant compte tenu des objectifs poursuivis et des moyens disponibles. Alors, l'étape de modélisation est un passage indispensable pour concevoir des systèmes de commande performants.

Le contrôle non linéaire du niveau de liquide d'un système hydraulique composé de plusieurs réservoirs connectés est un problème de contrôle non linéaire typique dans le domaine du contrôle des processus industriels.

De nombreux chercheurs du monde entier ont essayé de concevoir et de mettre en œuvre le contrôleur de niveau du système de deux réservoirs.

II.2 Système hydraulique à un et réservoir

II.2.1 Description du système hydraulique à réservoir unique

Le système à réservoir unique composé du réservoir supérieur est illustré dans Figure (II.1) contient une hauteur h de fluide, comme l'illustre la Figure (II.1). Ce réservoir peut être alimenté par une pompe, imposant un débit volumique de sortie constant Q_e , et une électrovanne, imposant un débit volumique d'entrée variable $Q(t)$. Le débit volumique d'entrée $Q(t)$ sera contrôlé par l'ouverture de la vanne par un coefficient compris entre 0 (vanne fermée) et 1 (vanne ouverte à 100%). Le réservoir possède un tube de fuite, de diamètre a_0 et de débit Q_0 .

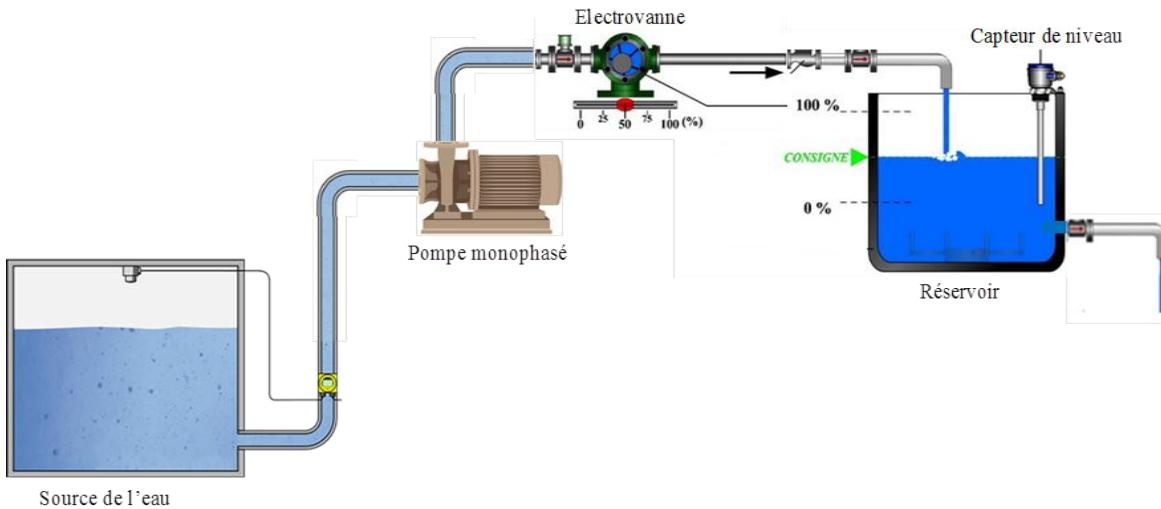


Figure II.1 : Schéma de principe de la régulation de niveau d'eau dans un réservoir.

II.2.2 Modélisation du système hydraulique à un réservoir

Le niveau de l'eau dans le système hydraulique à un réservoir présenté sur la Figure II.1 peut s'écrire comme suit:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{d(Ah)}{dt} = Q_e - Q_0 \Rightarrow A \frac{dh}{dt} = Q_e - Q_0 \quad (\text{II.1})$$

Avec :

Q_e : Débit volumique de la pompe.

Q_0 : Débit de sortie.

A : Surface du réservoir.

Le débit volumique de la fuite peut s'écrire comme suit :

$$Q_0 = a_0 v_0 \quad (\text{II.2})$$

Avec :

Q_0 : Débit de sortie.

v_0 : vitesse de sortie de l'eau dans la fuite du réservoir.

a_0 : La section transversale de sortie.

La vitesse de sortie de l'eau dans la fuite du réservoir, en utilisant l'équation de Bernoulli, peut être définie comme suit :

$$\begin{cases} P \times V = \frac{1}{2} m v_0^2 \Rightarrow p = f \times g \times h \\ f \times g \times h \times V = \frac{1}{2} m v_0^2 \Rightarrow m = f \times V \\ m \times g \times h = \frac{1}{2} m v_0^2 \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Donc :

$$v_0 = \sqrt{2 \times g \times h} \quad (\text{II.4})$$

La section transversale du sortie du réservoir est donnée par :

$$a_0 = \frac{1}{4} \pi D_0^2 \quad (\text{II.5})$$

En remplaçant l'équation (2.4) dans (2.2) Le débit de sortie du réservoir 1 devient :

$$Q_0 = a_0 \sqrt{2 \times g \times h} \quad (\text{II.6})$$

De plus, en utilisant le principe du bilan massique du réservoir, on obtient l'équation différentielle du premier ordre suivante :

$$a_0 \left(\frac{dh}{dt} \right) = Q_e(t) - Q_0(t) \quad (\text{II.7})$$

Avec : a_0 la section transversale interne du réservoir.

En remplaçant les équations (II.1) et (II.2) dans l'équation (II.8) nous obtenons :

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = \frac{\alpha Q_e - a_0 \sqrt{2gh}}{a_0} \\ \frac{dh}{dt} = \alpha \frac{Q_e}{a_0} - \sqrt{2gh} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

α représente le coefficient d'ouverture de la vanne.

II.2.3 Simulation et discussion

Le modèle du système hydraulique à réservoir unique sous logiciel MATLAB/SUMILINK est donné par la figure suivante :

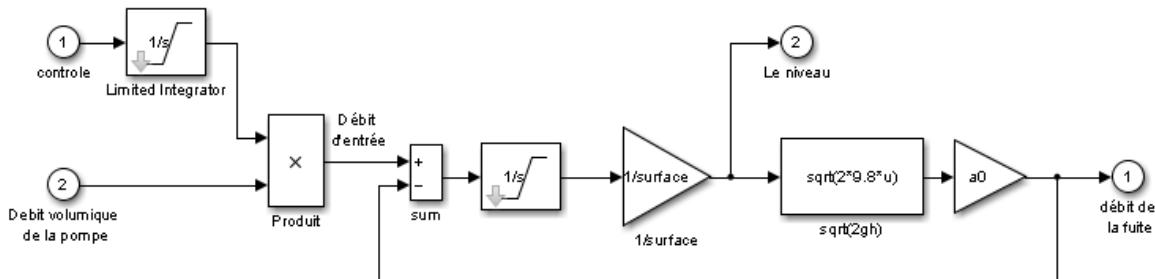


Figure II.2: Modèle Simulink d'un système hydraulique à un réservoir.

L'intérêt de cette simulation est de justifier le modèle du système hydraulique à un réservoir établit ci-dessus. Dans ce contexte, On va voir la réponse du système hydraulique, en variant la section transversale du tube de fuite et le débit d'entrée.

II.2.3.1 Variation de la section du tube de sortie

Dans cette partie, le modèle du système hydraulique a été examiné pour :

$$a_0 = 0.01 \text{ m}^2; a_0 = 0.05 \text{ m}^2; a_0 = 0.5 \text{ m}^2; a_0 = 1 \text{ m}^2$$

Les résultats de simulation sont illustrés sur les figures II.3 et II.4. Les résultats montrent que le système d'un seul réservoir est instable car la réponse diverge vers l'infini. De plus, l'augmentation du diamètre du tube de fuite a permis de réduire le temps de remplissage du réservoir et d'augmenter le débit de fuite. Par conséquent, les deux résultats obtenus peuvent confirmer que le modèle construit est correct et nous allons encore justifier notre modèle par la variation le débit d'entrée.

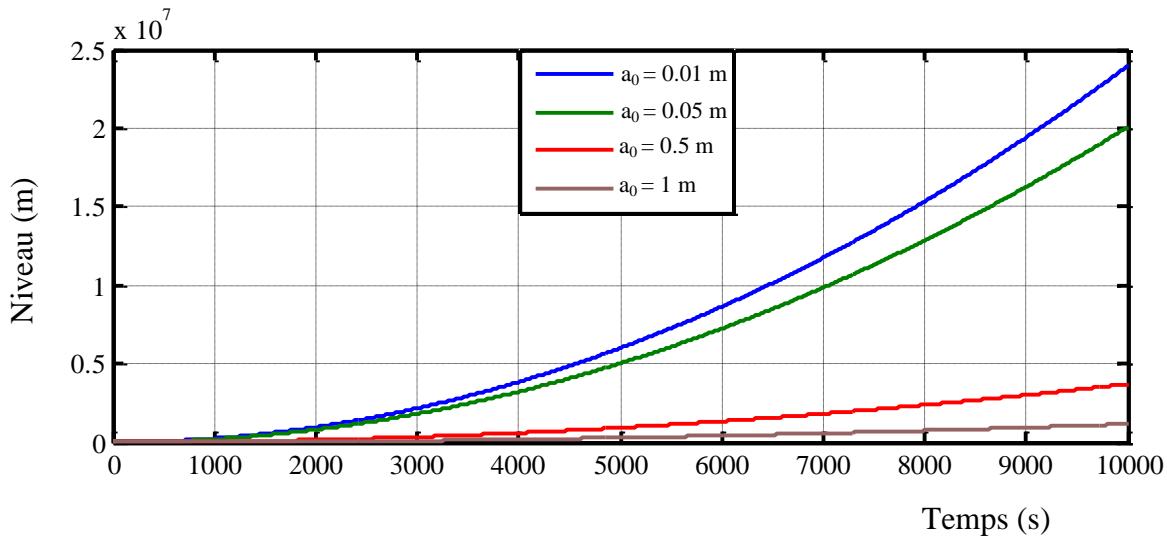


Figure II.3: Niveau de l'eau dans le réservoir en boucle ouverte, en variant la section du tube de sortie.

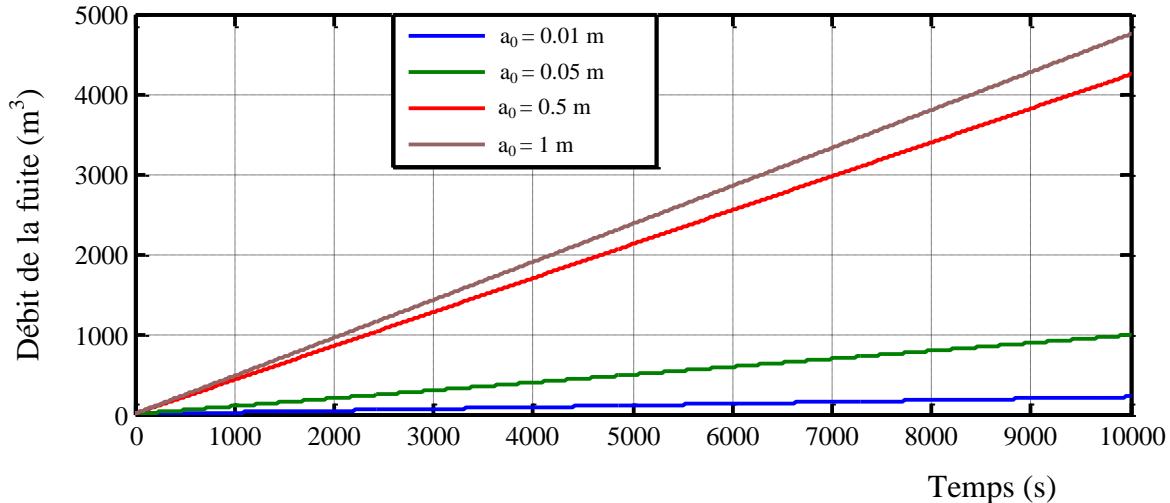


Figure II.4: Débit de la fuite en boucle ouverte, en variant la section du tube de sortie

II.2.3.2 Variation du débit d'entrée

Dans cette partie, le modèle du système hydraulique a été examiné par la variation du débit d'entrée, en changeant le coefficient d'ouverture de la vanne comme suit:

$$\alpha = 0.01; \alpha = 0.25; \alpha = 0.5; \alpha = 0.75$$

Les résultats de simulation pour cette partie sont illustrés sur les figures II.5 et II.6. Les résultats illustrent que le système hydraulique à un réservoir est instable et l'augmentation du débit d'entrée a permis d'augmenter le temps de remplissage du réservoir et le débit de la fuite. Par conséquent, les deux résultats obtenus peuvent reconfirmer que le modèle établi est plus correct.

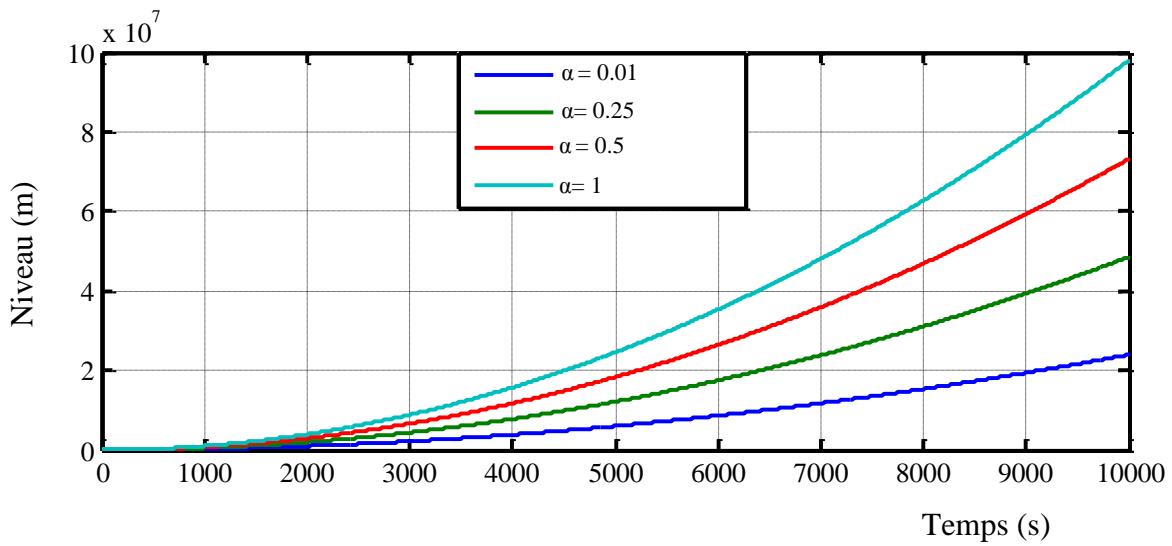


Figure II.5: Niveau de l'eau dans le réservoir en boucle ouverte, en variant le débit d'entrée.

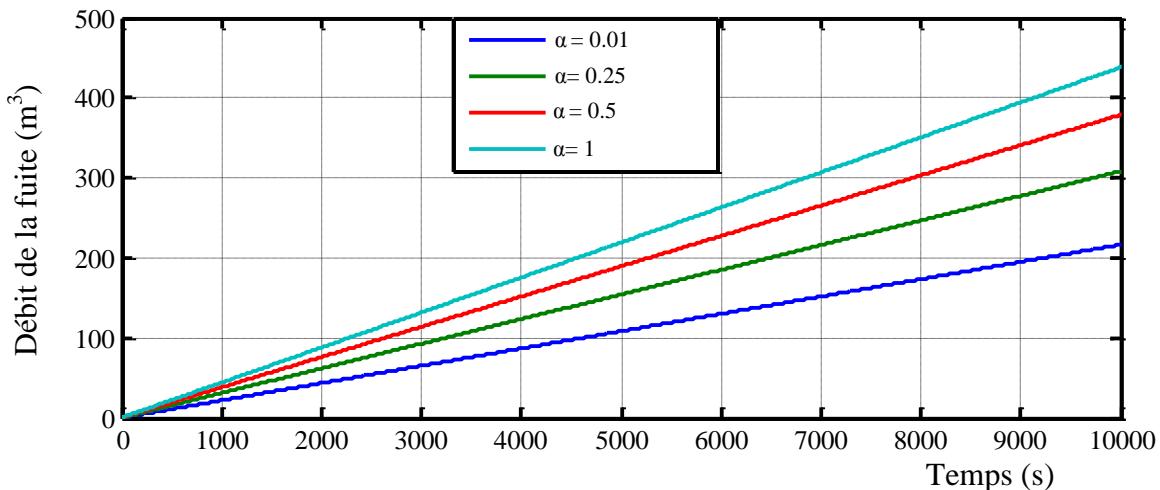


Figure II.6: Débit de la fuite en boucle ouverte, en variant le débit d'entrée.

II.3 Système hydraulique à deux réservoirs

Nous allons présenter la modélisation du système hydraulique à deux réservoirs couplés en utilisant les lois de la physique et, en particulier, la loi de Bernoulli.

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

II.3.1 Description du système hydraulique à deux réservoirs couplés

Le banc didactique d'étude de la régulation de niveau sur un ou deux réservoirs est systèmes hydrauliques Figure (II.7). Ce dispositif, est conçu par « TQ Education And Training» et à partir d'une pompe. Cet équipement est constitué de deux réservoirs

verticaux reliés par un canal d'écoulement, une valve rotative, utilisée pour changer la section du canal et, par conséquent, pour changer les caractéristiques d'écoulement entre les réservoirs considéré comme un benchmark pour l'étude et l'analyse des problèmes de commande des permet d'effectuer la régulation de niveau du liquide dans un ou deux réservoirs en variant le débit [12]. Il comporte également des capteurs de débit et de niveau du liquide sur chaque réservoir [12].

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

De l'appareil permettent de changer les caractéristiques d'écoulement du système et de changer ainsi le comportement dynamique du système.

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

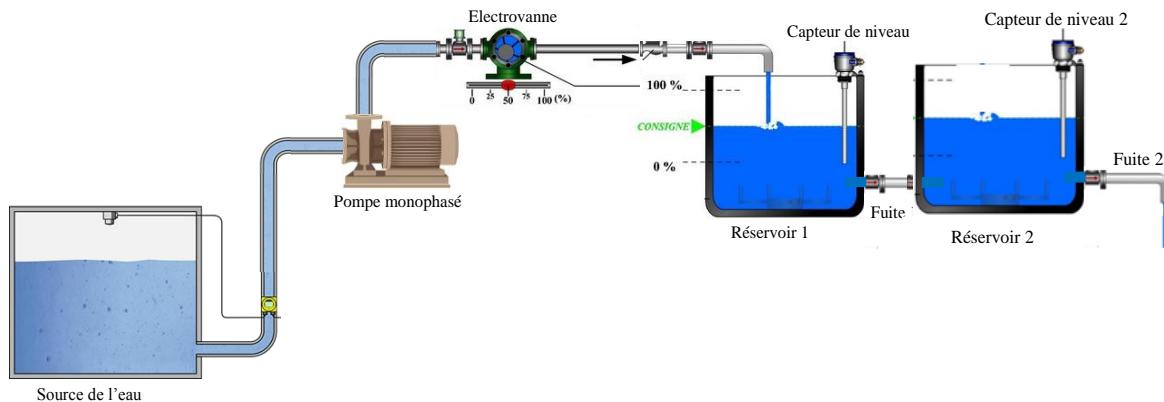


Figure II.7 Présentation du système hydraulique à deux réservoirs couplés [12].

II.3.2 Modélisation du système hydraulique

Considérons maintenant le système comprenant deux réservoirs et représenté par la Figure (II.8). Les équations d'état sont obtenues en remarquant que la variation du volume d'eau dans un réservoir est égale à la somme des débits entrants moins la somme des débits sortants. Le système considéré contient deux réservoirs, et caractérisé par deux états h_1 (le

niveau dans le premier réservoir) et h_2 (le niveau dans le deuxième réservoir) et trois débits : Q_e c'est le débit d'entrée, Q_{12} est le débit entre le premier et le deuxième réservoir, Q_0 est le débit sortant par la valve C. Il est à noter que la valve B est considérée toujours fermée. En utilisant les équations massiques (équilibre des débits).

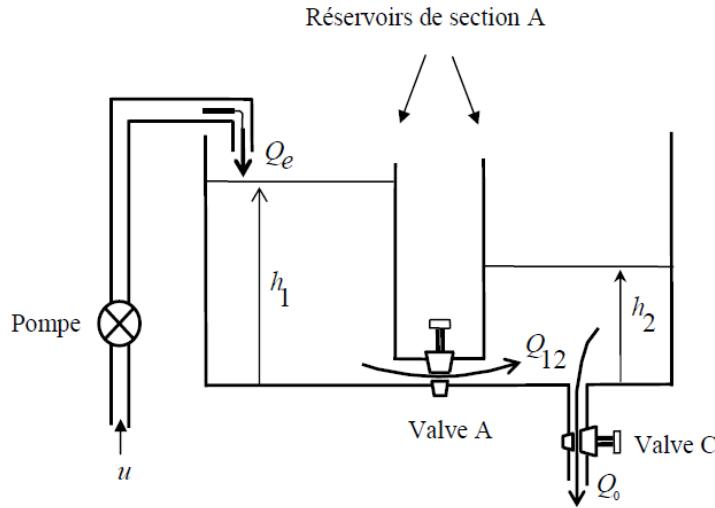


Figure II.8 Système hydraulique à réservoirs couplés [12].

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 :

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{d(Ah_1)}{dt} = Q_e - Q_{12} \Rightarrow A \frac{dh_1}{dt} = Q_e - Q_{12} \quad (\text{II.9})$$

$$\dot{h}_1 = \frac{1}{A} (Q_e - Q_{12}) \quad (\text{II.10})$$

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

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{d(Ah_2)}{dt} = Q_{12} - Q_0 \Rightarrow A \frac{dh_2}{dt} = Q_{12} - Q_0 \quad (\text{II.11})$$

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

Donc le système peut être représenté par :

$$\begin{cases} \dot{h}_1(t) = \frac{1}{A}(Q_e(t) - Q_{12}(t)) \\ \dot{h}_2 = \frac{1}{A}(Q_{12}(t) - Q_0(t)) \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Avec A la section du réservoir, h_1 le niveau dans le réservoir 1, Q_e le débit d'entrée généré par la pompe et Q_{12} est le débit entre les deux réservoirs au niveau de la valve

A qui est donné par :

$$Q_{12} = s a_{12} v_A \quad (\text{II.14})$$

Où s c'est la section maximale de passage du liquide valve A, a_0 est le coefficient de décharge de la valve A et V_A la vitesse d'écoulement au niveau de l'orifice de la valve A.

Pour déterminer la vitesse V_A on utilise 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 :

$$P_1 + p \frac{v_1^2}{2} + pgZ_1 = P_A + p \frac{v_A^2}{2} + pgZ_A \quad (\text{II.15})$$

Le coefficient p 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 :

$$P_1 + pgZ_1 = P_A + p \frac{v_A^2}{2} + pgZ_A \quad (\text{II.16})$$

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 :

$$P_A = pgh_2 + p_{atm} \quad (\text{II.17})$$

Ainsi, on obtient :

$$P_{atm} + pgh_1 = p \frac{v_A^2}{2} + pgh_2 + P_{atm} \quad (\text{II.18})$$

$$p \frac{v_A^2}{2} = pg(h_1 - h_2) \quad (2.19)$$

C'est-à-dire :

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

Donc, il vient :

$$Q_{12} = sa_{12}v_A = sa_0\sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (\text{II.21})$$

Le débit de sortie Q_{12} au niveau de la valve C est donné par :

$$Q_0 = sa_0v_c \quad (\text{II.22})$$

Où s 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 v_c on utilise 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 :

$$P_2 + p \frac{v_2^2}{2} + pgZ_2 = P_c + p \frac{v_c^2}{2} + pgZ_c \quad (\text{II.23})$$

Le coefficient P 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 :

$$P_1 + pgZ_1 = P_A + p \frac{v_A^2}{2} + pgZ_A \quad (\text{II.24})$$

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 :

$$P_{atm} + pgh_2 = p \frac{v_c^2}{2} + P_{atm} \quad (\text{II.25})$$

$$p \frac{v_c^2}{2} = pgh_2 \quad (\text{II.26})$$

C'est-à-dire

$$v_c = \sqrt{2gh_2} \quad (\text{II.27})$$

Il vient alors :

$$Q_0 = sa_0\sqrt{2gh_2} \quad (\text{II.28})$$

En résumé, on obtient :

$$\begin{cases} Q_{12} = sa_{12}\sqrt{2g(h_1 - h_2)} \\ Q_0 = sa_0\sqrt{2gh_2} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Avec:

Q_{12} : Le débit entre les deux réservoirs.

Q_0 : Le débit de sortie.

s : 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 :

$$\begin{cases} \frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{A}(Q_e - sa_{12}\sqrt{2g(h_1 - h_2)}) \\ \frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A}(sa_{12}\sqrt{2g(h_1 - h_2)} - sa_0\sqrt{2gh_2}) \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

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 :

$$Q_e = k_p u \quad (\text{II.31})$$

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 :

$$y = K_h h_2 \quad (\text{II.32})$$

Si on suppose que : $K_h = 1$ il vient donc

$$y = h_2 \quad (\text{II.33})$$

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

$$\begin{cases} \frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{A} (Q_e - sa_{12}\sqrt{2g(h_1 - h_2)}) \\ \frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A} (sa_{12}\sqrt{2g(h_1 - h_2)} - sa_0\sqrt{2gh_2}) \\ y = h_2 \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

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

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x) \\ \dot{x}_2 = f_2(x) + Q_e \\ y = x_1 \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

On a :

$$x_1 = h_2 \Rightarrow \dot{x}_1 = \dot{h}_2 = \frac{1}{A} (sa_{12}\sqrt{2g(h_1 - h_2)} - sa_0\sqrt{2gh_2}) \quad (\text{II.36})$$

$$x_2 = h_1 \Rightarrow \dot{x}_2 = \dot{h}_1 = \frac{1}{A} (-sa_{12}\sqrt{2g(h_1 - h_2)} + Q_e) \quad (\text{II.37})$$

Donc :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{A} (sa_{12}\sqrt{2g(h_1 - h_2)} - sa_0\sqrt{2gh_2}) \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{A} (-sa_{12}\sqrt{2g(h_1 - h_2)} + Q_e) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

On obtient :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{sa_{12}\sqrt{2g}}{A} \sqrt{x_2 - x_1} - \frac{Sa_0\sqrt{2g}}{A} \sqrt{x_1} \\ \dot{x}_2 = -\frac{sa_{12}\sqrt{2g}}{A} \sqrt{x_2 - x_1} + \frac{Q_e}{A} \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

$$\text{En posant : } \beta_1 = \frac{sa_{12}\sqrt{2g}}{A} ; \beta_2 = \frac{sa_0\sqrt{2g}}{A} ;$$

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

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \beta_1 \sqrt{x_2 - x_1} - \beta_2 \sqrt{x_1} \\ \dot{x}_2 = -\beta_1 \sqrt{x_2 - x_1} + Q_e \\ y = x_1 \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

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

Section du chaque réservoir	A	2 m^2
Section de l'ouverture variable de chaque valve	S_n	1 m^2
Coefficient de décharge	a_{12}	1
	a_0	0.5
Gain de la pompe	K_p	$7.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{sV}$
Constante de gravité	g	9.8 m/s^2

Tableau II.1. Paramètres du système hydraulique

II.3.3 Résultat et discussion

Le modèle du système hydraulique à deux réservoirs sous logiciel MATLAB/SUMILINK est donné par la figure suivante :

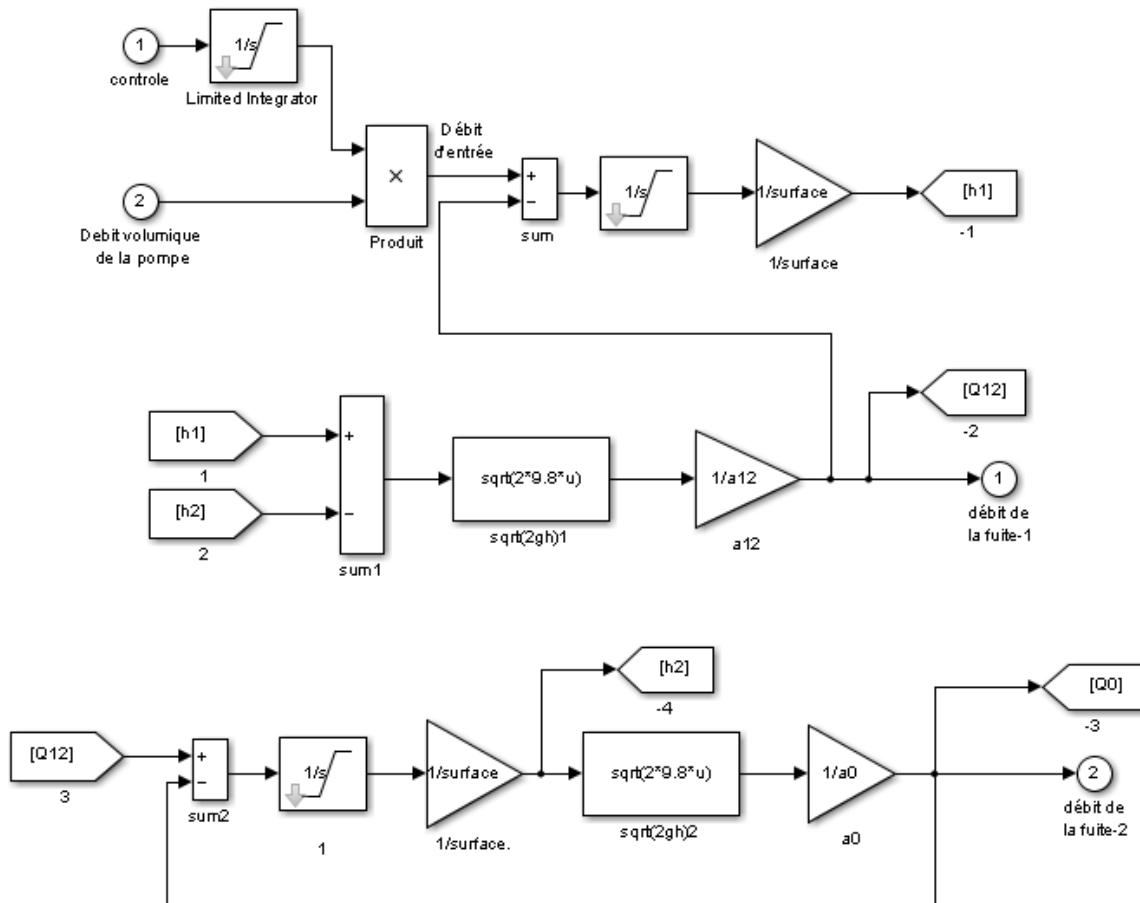


Figure II.9. Modèle Simulink d'un système hydraulique à deux réservoirs.

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation en boucle ouverte du système hydraulique à deux réservoirs. Le modèle établi a été examiné par la variation du débit d'entrée. Dans ce contexte, le diamètre de la fuite entre le premier et le deuxième réservoir Q_{12} et le diamètre de la fuite du deuxième réservoir Q_0 ont été pris constants.

Les résultats de simulation sont présentés sur les figures II.10 et II.13. Les résultats illustrent que le système hydraulique à deux réservoirs est instable et l'augmentation du débit d'entrée a permis d'augmenter le temps de remplissage des deux réservoirs et les débits des fuites. Par conséquent, les résultats obtenus peuvent utiliser pour confirmer la fiabilité du modèle établi et la variation de ce paramètre peut modifier le comportement dynamique du système hydraulique à deux réservoirs.

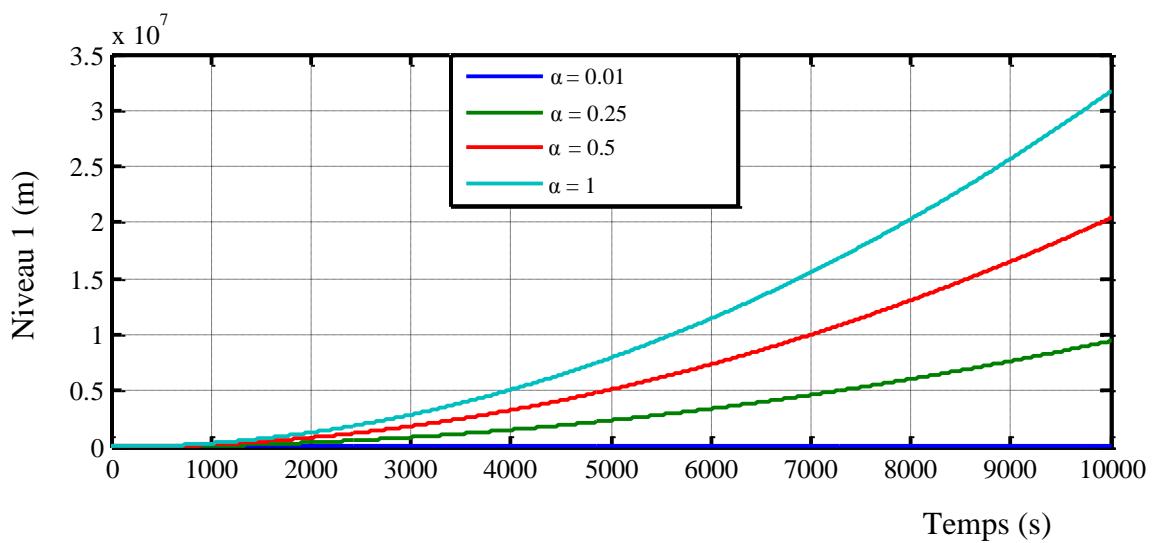


Figure II.10: Niveau de l'eau dans le premier réservoir en boucle ouverte.

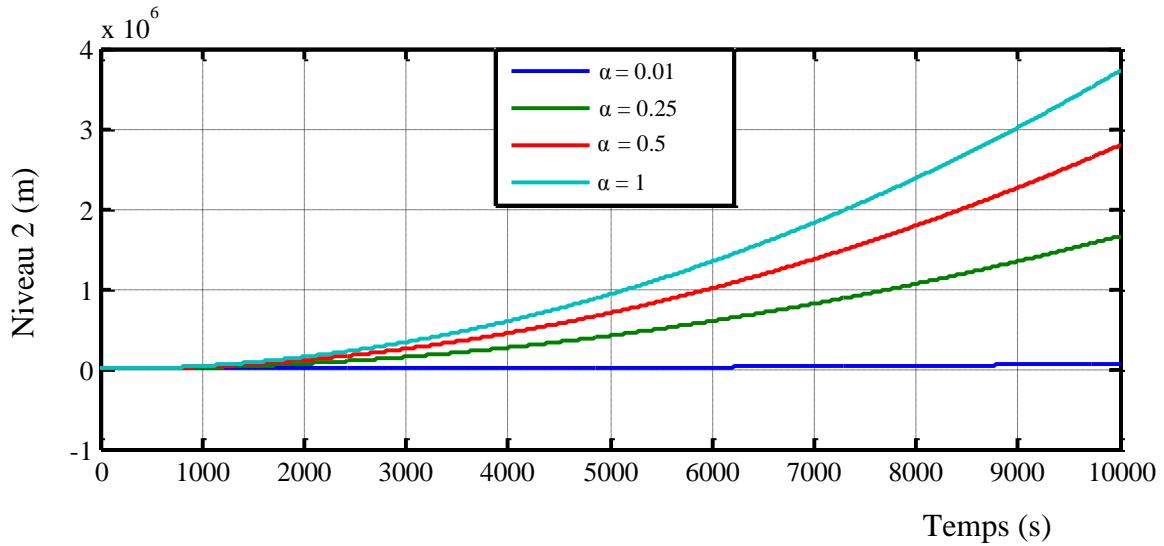


Figure II.11: Niveau de l'eau dans le deuxième réservoir en boucle ouverte.

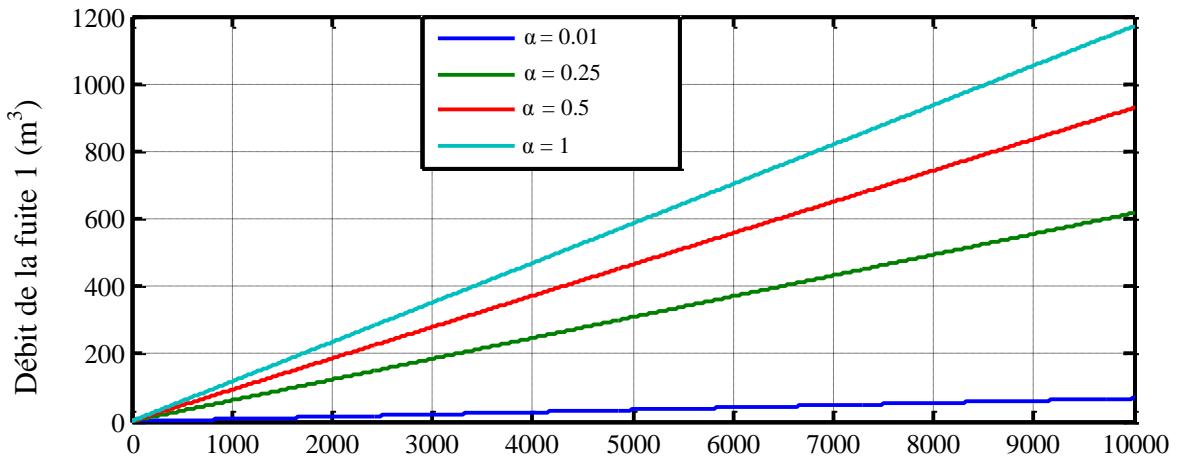
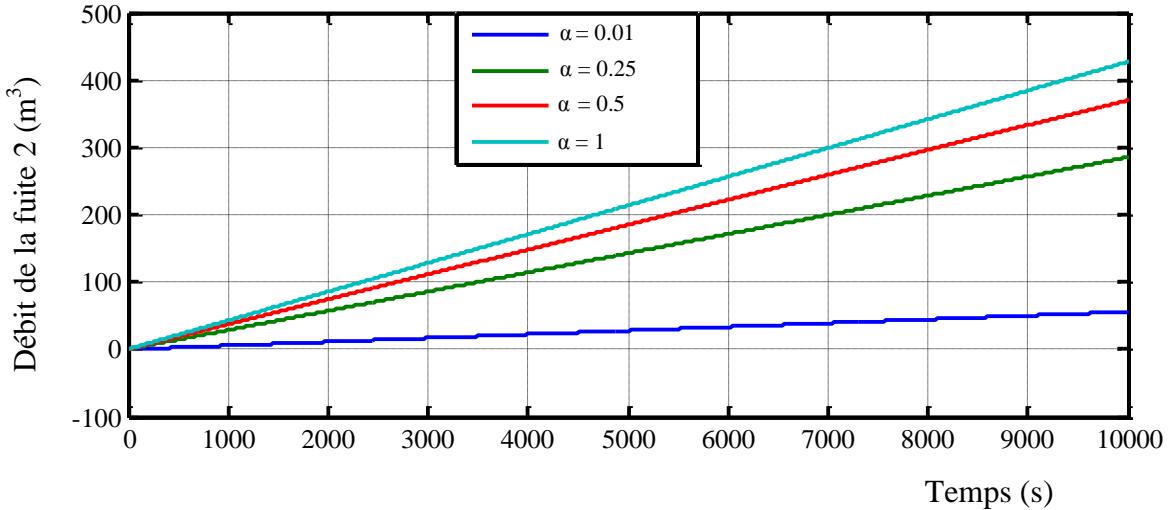


Figure II.12: Débit entre le premier et le deuxième réservoir en boucle ouverte.

**Figure II.13:** Débit de la fuite du deuxième réservoir en boucle ouverte.

II.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la description du système hydraulique et sa Modélisation dynamique. Le système hydraulique est constitué de deux réservoirs couplés et son modèle dynamique est un modèle non linéaire avec une seule entrée et une sortie. Un test de simulation en boucle ouverte est présenté pour illustrer le comportement du système par rapport aux variations du coefficient de décharge de la valve de sortie.

La lecture des tableaux analogiques ne peut que nous convaincre du parallélisme existant entre l'électricité d'une part et l'hydraulique d'autre part. Cependant, on constate, par exemple, qu'il n'est pas possible de rendre analogues la résistivité électrique $1/\sigma$ et la viscosité dynamique η : on atteint là les limites de validité de l'analogie. En fait, si l'analogie « fonctionne » souvent bien au niveau intégré (entre grandeurs extensives), il n'en est plus de même au niveau local (entre grandeurs intensives). Mais cela ne doit pas surprendre : dans la veine de l'exemple précédent, un courant électrique dans un métal est toujours constitué du déplacement d'électrons libres, constitutifs eux-mêmes du conducteur, alors que les lois régissant un courant fluide dépendent à la fois du fluide et du tuyau, deux facteurs indépendant l'un de l'autre.

Modélisation en vue de la commande d'un système hydraulique à deux réservoirs couplés

III.1	Introduction	43
III.1.1	Outils mathématiques.....	43
III.1.2	Linéarisation entrée/sortie	44
III.1.2.1	Principe de la commande par linéarisation entrée/sortie	45
III.1.2.2	Systèmes mono variables.....	45
III.1.2.3	Degré relatif	46
III.1.2.4	Loi de commande linéaire.....	48
III.2	La logique floue.....	49
III.2.1	Les opérations des ensembles flous	49
III.2.1.1	Notions d'ensemble flou	49
III.2.1.2	Les opérations et les normes	50
III.2.1.3	Les propositions floues et les variables linguistiques	51
III.2.1.4	Implication floue (règle Si /Alors):.....	51
III.2.2	Système d'inférence floue	52
III.2.2.1	Fuzzyfication (quantification floue)	53
III.2.3	Inférence floue.....	54
III.2.4	Défuzzification ou concréétisation.....	56
III.2.4.1	Défuzzification par le centre de gravité	56
III.2.4.2	Calcul du centre de gravité lors de la méthode d'inférence SOM / PROD	57
III.2.4.3	Méthode par valeur maximum	57
III.2.5	Les applications de la logique floue	58
III.2.5.1	Commande floue.....	58
III.2.5.2	Diagnostic industriel	59
III.3	Conclusion	60

III.1 Introduction

Un système hydraulique se compose d'un ensemble de différents équipements électriques et hydrauliques, tels que les pompes électriques, les vannes analogiques et mécaniques, les tuyaux de transport et les réservoirs. Ces composants du système hydraulique sont interconnectés entre eux pour transporter ou distribuer l'eau aux différentes stations. Selon le nombre des réservoirs couplés, le degré de complexité structurale du système hydraulique se définira. Généralement, cette complexité est liée au nombre des réservoirs en parallèle ou en série existant dans le système hydraulique.

Dans ce chapitre, nous présentons la méthode de commande par linéarisation au sens entrée-sortie et nous appliquons cette méthode sur le modèle du système hydraulique à deux réservoirs couplés. De plus, nous allons présenter brièvement les concepts fondamentaux de la logique floue dans une perspective industrielle, les différentes applications de cette dernière et particulièrement en diagnostic industriel.

III.1.1 Outils mathématiques

Dans cette section, nous présentons quelques outils mathématiques nécessaires pour Assimiler la technique de linéarisation entrée/sortie [14].

❖ Gradient

On définit une fonction scalaire $h(x)$ par rapport au vecteur d'état $x \in R^n$, le gradient de $h(x)$ est donné par :

$$\forall h = \frac{\partial h}{\partial x} = \left[\frac{\partial h}{\partial x_1} \dots \frac{\partial h}{\partial x_n} \right]$$

$$\forall h \text{ Est une vectrice ligne d'élément : } \forall h_i = \frac{\partial h}{\partial x_i}$$

❖ Dérivée de Lie

On considère une fonction scalaire $h : R^n \rightarrow R$ et deux champs de vecteurs $f, g : R^n \rightarrow R^n$. La dérivée de Lie comme étant une nouvelle fonction scalaire, notée $L_f h$ donnant la dérivée $h(x)$ dans la direction de $f(x)$, tel que :

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

Les dérivées de Lie d'ordre quelconque sont données par :

$$\begin{aligned} L_f^0 h &= h(x) \\ L_f^i h &= L_f(L_f^{i-1} h); i = 1, 2, 3, \dots \end{aligned}$$

La dérivée de Lie de la fonction $L_f h$ suivant le champ de vecteur g est donnée par :

$$L_g L_f h = \nabla(L_f h) g = \sum_{i=1}^n \frac{\partial(L_f h(x))}{\partial x_i} g_i(x)$$

❖ Difféomorphisme

La fonction dérivable $\Phi : \Omega \rightarrow \mathbf{R}^n$ définie dans une région $\Omega \subset \mathbf{R}^n$ est appelée difféomorphisme elle vérifie les deux conditions suivantes :

- a) Φ est inversible, c'est-à-dire, il existe une fonction Φ^{-1} telle que : $\Phi^{-1}(\Phi(x)) = x$

Pour tout $x \in \Omega \subset \mathbf{R}^n$.

- b) Φ^{-1} et Φ sont des fonctions dérivables.

Le difféomorphisme est utilisé pour transformer un système non linéaire en un autre système linéaire en effectuant un changement de variables.

III.1.2 Linéarisation entrée/sortie

La linéarisation entrée/sortie est une approche géométrique de la conception de la commande non linéaire qui a fait l'objet de beaucoup de recherches dans les années 80. L'idée centrale de l'approche est de transformer la dynamique non linéaire d'un système en une dynamique (entièrement ou en partiellement) linéaire, de telle sorte que des techniques de commande linéaire puissent être appliquées.

Ceci diffère entièrement de la linéarisation locale, c'est-à-dire conventionnelle par développement de Taylor au premier ordre. En effet, la linéarisation entrée/sortie est

réalisée par des changements de coordonnées, plutôt que par des approximations linéaires de la dynamique. Cette technique de linéarisation peut être vue comme une manière de transformer le modèle d'un système en un modèle équivalent d'une forme plus simple.

III.1.2.1 Principe de la commande par linéarisation entrée/sortie

La linéarisation entrée-sortie consiste à rendre linéaire la relation dynamique entre l'entrée de commande d'un système non linéaire et sa sortie en utilisant une loi de commande non linéaire. Cette dernière est dite linéarisant. Une autre loi de commande linéaire est ensuite employée pour stabiliser le système linéaire ainsi obtenu. La Figure III.1 illustre bien le principe.

Il est à noter que le modèle linéaire que donne la linéarisation entrée-sortie est valide dans tout l'espace d'état. Le cas des systèmes à une entrée et une sortie est présenté dans cette section [14,15].

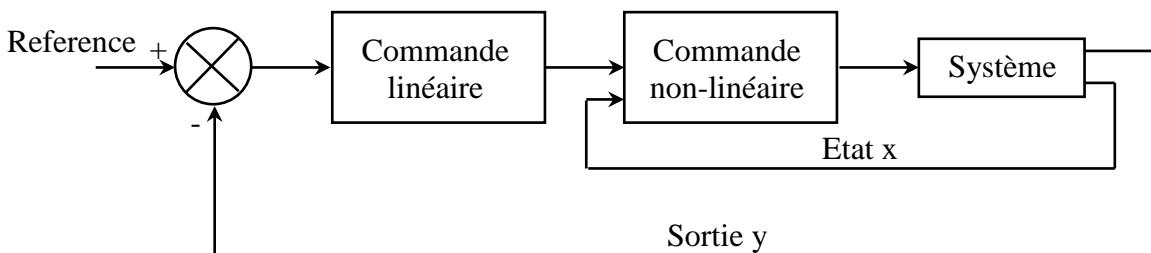


Figure III.1. Schéma de principe de la linéarisation entrée/sortie [14,15]

III.1.2.2 Systèmes mono variables

Soit le système non linéaire mono variable décrit par l'équation différentielle suivante [14,15, 16] :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$x = [x_1, \dots, x_n]^T \in R^n$: Vecteur d'état

$u \in R$: Entrée de commande.

$y \in R$: Sortie de système.

$f(x), g(x)$: Champs de vecteur.

$h(x)$: est une fonction scalaire et dérivable.

L'idée de la linéarisation entrée/sortie est basée sur le calcul d'un retour d'état non linéaire du type $u = \psi(x, v)$, où v est la nouvelle entrée de commande. Pour effectuer ce bouclage, il

nous faut exprimer la dérivée de la sortie en fonction de l'état et de l'entrée. Ainsi, on introduit la notion du degré relatif.

III.1.2.3 Degré relatif

D'après [9], le degré relatif r de la sortie y , est le nombre de fois qu'il faut dériver la sortie y par rapport au temps pour faire apparaître explicitement l'entrée de commande u dans les dérivées de la sortie y . D'après cette définition on peut écrire : Le système (II.1) est dit de degré relatif r si :

- $L_g L_f^1 h(x) = 0$, $\forall x \in R^n$ pour $0 \leq i \leq r - 2$
- $L_g L_f^{r-1} h(x) \neq 0$, $\forall x \in R^n$

En effet, si on applique cette définition au système (II.1), on obtient :

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = \frac{dy}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dh}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (\text{III.2})$$

$$\dot{y} = \frac{dh(x)}{dx} (f(x) + g(x)u) \quad (\text{III.3})$$

$$\ddot{y} = L_f h(x) + L_g h(x)u \quad (\text{III.4})$$

Si $L_g h(x) = 0$ nous continuons la dérivation de la sortie y pour la deuxième fois, donc :

$$\ddot{y} = \frac{dL_f h(x)}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dL_f h(x)}{dx} (f(x) + g(x)u) \quad (\text{III.5})$$

$$\ddot{y} = L_f^2 h(x) + L_g L_f^1 h(x)u = L_f^2 h(x) \quad \text{Si } L_g L_f^1 h(x)u = 0 \text{ pour un degré relatif } r > 2.$$

Nous continuons la dérivation de la sortie y jusqu'à l'apparition de u pour la première fois, Pour un degré relatif égale à r , nous obtenons :

$$y = h(x) = L_f^0 h(x)$$

$$\dot{y} = L_f^1 h(x) + L_g h(x) = L_f^1 h(x) \text{ Avec } L_g h(x) = 0$$

$$\ddot{y} = L_f^2 h(x) + L_g L_f^1 h(x) = L_f^1 h(x) \text{ Avec } L_g L_f^1 h(x) = 0$$

$$y^{(r)} = L_f^r h(x) + L_g L_f^{r-1} h(x)u \text{ Avec } L_g L_f^{r-1} h(x) \neq 0$$

Donc r est le plus petit nombre entier pour lequel le coefficient de u n'est pas nul sur l'espace où nous voulons commander le système.

Soient :

$$\alpha(x) = L_f^r h(x)$$

$$\beta(x) = L_g L_f^{r-1} h(x)$$

Donc :

$$Y^{(r)} = L_f^r h(x) + L_g L_f^{r-1} h(x)u = \alpha(x) + \beta(x)u = v \text{ Ou } \beta(x) \neq 0$$

Où v est appelée nouvelle entrée de commande. Donc, l'équation différentielle $Y^{(r)} = v$, peut être représentée par la Figure III.2.

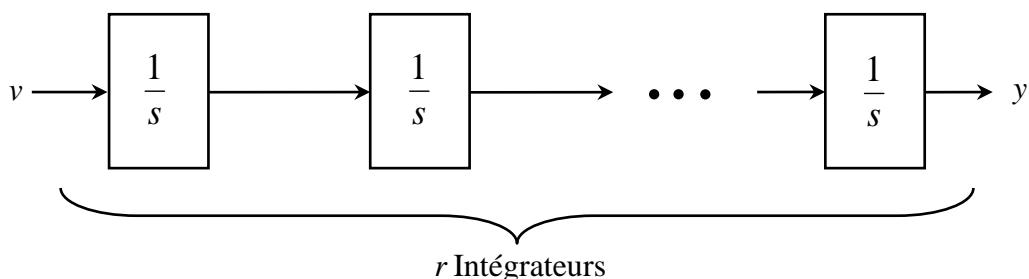


Figure III.2. Représentation d'état du système linéaire résultant [16].

Nous avons r intégrateurs en cascade de fonction de transfert :

$$\frac{y(s)}{v(s)} = \frac{1}{s^r}$$

Donc, nous pouvons concevoir maintenant une loi de commande pour ce système en utilisantn'importe quelle méthode de conception des commandes linéaires. Nous avons :

$$v(x) = \alpha(x) + \beta(x)u \quad (\text{III.6})$$

La loi de commande non linéaire qui sera implémentée est obtenue par (Figure III.3):

$$u = \frac{1}{\beta(x)}(v - \alpha(x)) \quad (\text{III.7})$$

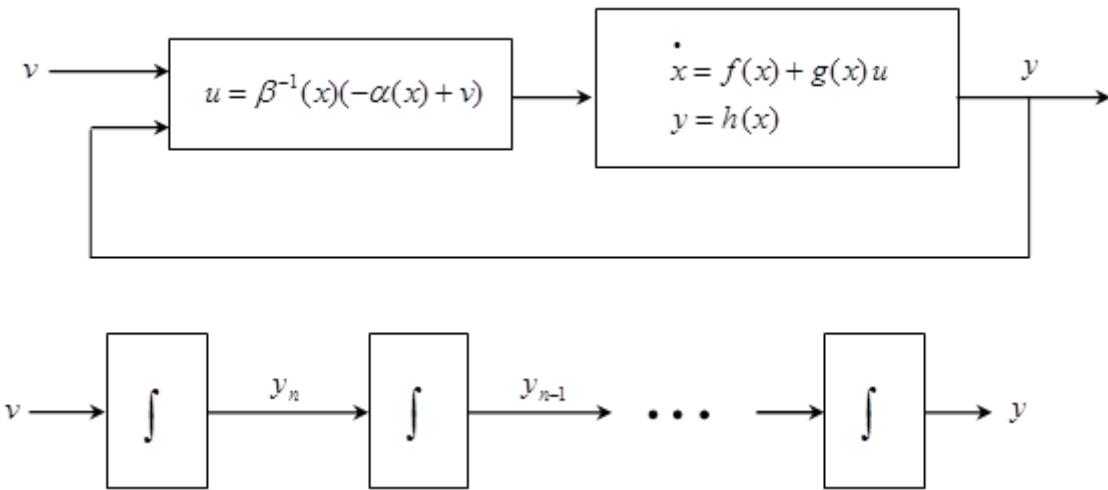


Figure III.3. Schéma bloc du système linéarisé en boucle fermée

III.1.2.4 Loi de commande linéaire

La nouvelle entrée de commande v est obtenue en utilisant un réglage linéaire (retour d'état, régulateur classique, etc.) présentée selon la Figure III.4.

En général, l'objectif de la commande est de forcer la sortie du système à suivre une trajectoire désirée. Si on considère y_d comme la sortie désirée (référence), l'erreur de poursuite e est donnée par :

$$e = y_d - y \quad (\text{III.8})$$

Donc la loi de commande est donnée par [14] :

$$v = y_d^{(r)} + K_{r-1}e^{(r-1)} + \dots + K_1 e + K_0 e \quad (\text{III.9})$$

$$v = y_d^{(r)} + K_{r-1}(y_d^{(r-1)} - y^{(r-1)} + \dots + K_0(y_d - y)) \quad (\text{III.10})$$

Le choix des paramètres K_i est basé sur l'imposition des pôles du polynôme caractéristique:

$$s^r + K_{r-1}s^{r-1} + \dots + K_1s + k_0 \quad (\text{III.11})$$

C'est-à-dire, que tous les pôles imposés soient situées strictement dans la partie gauche du plan de Laplace.

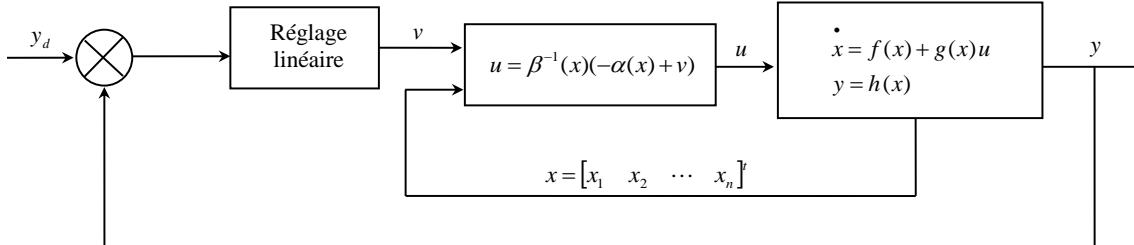


Figure III.4. Synthèse de la loi de commande linéaire.

Remarque : Dans ce travail on suppose que le degré relatif r est égal à l'ordre du système n . C'est-à-dire, la dynamique du système est complètement linéarisable et le système Ne possède pas de dynamique interne (dynamique des zéros).

III.2 La logique floue

La théorie des ensembles flous a également donné naissance à un traitement original de l'incertitude, fondée sur l'idée d'ordre, et qui permet de formaliser le traitement de l'ignorance, et permet de formaliser les systèmes d'informations avancés. Les ensembles flous ont également un impact sur les techniques de classification automatique, et ont contribué à un certain renouvellement des approches existantes de l'aide à la décision.

III.2.1 Les opérations des ensembles flous

La logique floue a été formulée par Lotfi A. Zadeh dans le milieu des années soixante. Elle constitue une généralisation de la logique booléenne classique, et ajoute cependant une Fonctionnalité déterminante : la possibilité de calculer un paramètre en disant simplement Dans quelle mesure il doit se trouver dans un intervalle de valeurs.

III.2.1.1 Notions d'ensemble flou

On considère que X est un ensemble non nul. Un ensemble flou A dans X est caractérisé par son fonction d'appartenance $\mu_A : X \rightarrow [0,1]$. $\mu_A(x)$ Est interprété comme le degré d'appartenance d'élément x dans l'ensemble flou A car chaque $x \in X$.

On peut donc dire qu'un élément peut appartenir à un ensemble flou (figure III.5) de manière graduelle, ce qui rompt avec le tout ou rien de la théorie ensembliste classique.

À l'inverse de la logique booléenne, la logique floue permet à une condition d'être en un autre état que vrai ou faux. Il y a des degrés dans la vérification d'une condition.

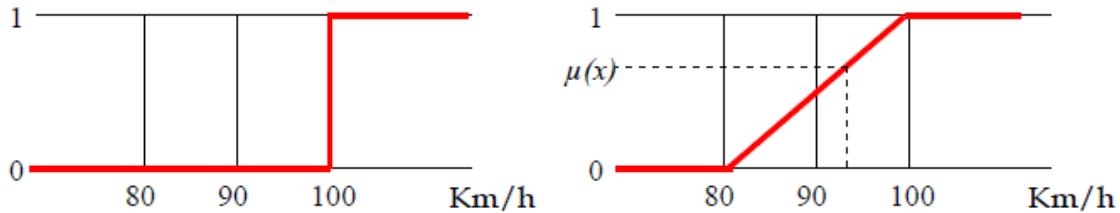


Figure III.5. Ensemble flou.

III.2.1.2 Les opérations et les normes

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 « *et* », « *ou* », « *non* ». De nouvelles fonctions d'appartenance liées à ces Opérateurs sont établis :

- ❖ *Et* : opérateur de conjonction : les plus employés sont le « minimum » et le « produit ». x appartient à A et $B \Leftrightarrow x \in A \cap B \Leftrightarrow \mu_{A \cap B}(x)$. L'opérateur « *et* » se défini par une norme triangulaire (t-norme) :

$$T : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1] \quad (x, y) \mapsto z = xy \quad (\text{III.15})$$

- ❖ *ou* : opérateur de disjonction, les plus employés sont le « maximum » et la « Somme ».

x Appartient à A ou $B \Leftrightarrow x \in A \cup B \Leftrightarrow \mu_{A \cup B}(x)$. L'opérateur « *ou* » se défini par une Co-norme triangulaire (T^*) qu'on appelle aussi S-norme(S):

$$S : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1] \quad (x, y) \mapsto z = x + y - xy \quad (\text{III.16})$$

- ❖ *Non* : opérateur qui désigne le complémentaire d'un ensemble flou: x appartient au complément de :

$$A \Leftrightarrow x \in \bar{A} \Leftrightarrow \mu_{\bar{A}} - (x) \quad (\text{III.17})$$

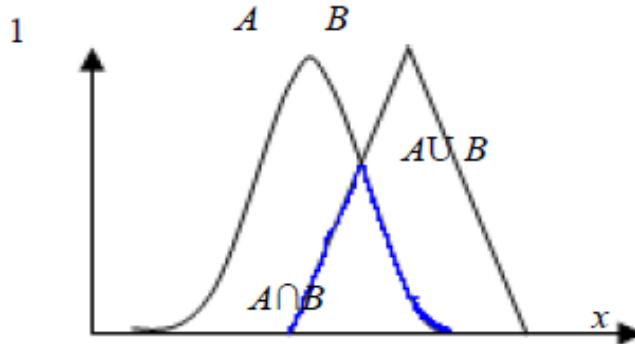


Figure III.6. Intersection et union de deux ensembles flous.

III.2.1.3 Les propositions floues et les variables linguistiques

L'association de sous-ensembles flous à des termes linguistique définis sur un univers de discours quelconque, autorise la représentation d'information plus au moins spécifique et précise.

Une variable linguistique peut être définie comme l'association d'une variable Classique et de plusieurs sous-ensembles flous caractérisant les valeurs possibles de celle-ci. On appelle une proposition floue élémentaire, une proposition du type X est A , où:

X Est une variable linguistique et A un sous ensemble flou.

Une telle proposition possède un degré de vérité $\mu_A(X)$, compris entre 0 et 1.

III.2.1.4 Implication floue (règle Si /Alors):

L'opérateur d'implication permet d'introduire la notion de règle floue qui caractérise les relations de dépendance entre plusieurs propositions floues quelconques : X_1 est A_1 et X_2 est A_2 impliqué Y et B . Cette règle peut également être exprimée sous forme plus classique :

Si(X_1 est A_1) et (X_2 est A_2) alors (Y est B).

Le tableau III.1 regroupe les types d'implications les plus utilisées

N°	Nom	Implication
01	Kleene-dienes (binaire)	$\text{Max } \{1-a,b\}$
02	Lukasiewiez	$\text{Min } \{1,1-a-b\}$
03	Reichenbach	$1-a+b^*b$
04	Fodor	$\begin{cases} 1 & \text{si } a \leq b \\ \max\{1-a,b\} & \text{si } a > b \end{cases}$
05	yager	$\begin{cases} 1 & \text{si } a = 0 \\ b^a & \text{si } a > 0 \end{cases}$
06	Zadeh	$\text{Max } \{\min\{a,b,1-a\}\}$
07	Dubois-Prade	$\begin{cases} 1-a & \text{si } b = 0 \\ b & \text{si } a = 1 \\ 1 & \text{si non} \end{cases}$

Tableau III.1. Implication floues [17].

III.2.2 Système d'inférence floue

La notion de règle floue permet de définir un système expert flou comme une extension d'un système expert classique, manipulant la proposition floue. Donc un système d'inférence floue (SIF) est formé de trois blocs comme l'indique la figure III.5. Le premier, bloc defuzzification transforme les valeurs numériques en degrés d'appartenance aux différents ensembles flous de la partition. Le second bloc est le moteur d'inférence, constitué de l'ensemble de règles. Enfin, le bloc de defuzzification permet, si nécessaire, d'inférer une valeur nette, à partir du résultat de l'agrégation des règles.

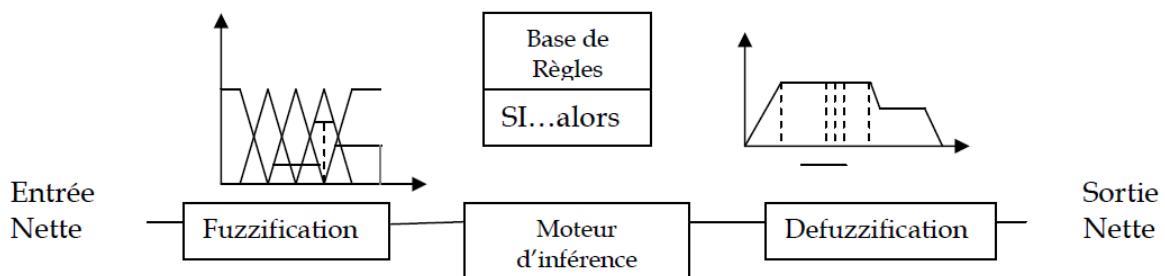


Figure III.7. Système d'inférence floue.

III.2.2.1 Fuzzyfication (quantification floue)

Elle consiste à associer à chaque valeur d'entrée un ou plusieurs sous-ensembles flous ainsi que les degrés d'appartenance associés. Cette étape réalise la transformation de valeurs numériques en informations symboliques floues.

Le choix du nombre d'ensembles flous, de la forme des fonctions d'appartenance, du recouvrement de ces fonctions et de leur réparation sur l'univers de discours n'est pas évident. Il y a cependant des facteurs qui sont plus importants que d'autre.

- **Comment fuzzifier?**

Pour fuzzifier, il faut donner:

1. L'univers du discours, i.e. : Plage de variations possibles de l'entrée considérée.
2. Une partition en classe floue de cet univers.
3. Les fonctions d'appartenances de chacune de ces classes.

- **L'Algorithm fuzzy k-means**

L'un des premiers algorithmes, introduit par Bazdek 1974, proposés pour construire automatiquement des fonctions d'appartenance est l'algorithme « fuzzy k-means » ou algorithme des centres mobiles flou. Cet algorithme non supervisé consiste à minimiser itérativement un critère en fonction d'une matrice de partition flou

$$U = [\lambda_k(x_i)]_{(k=1, m; i=1, n)}$$

Où $\lambda_i(x)$ le degré d'appartenance de vecteur x à la classe i .

Et $V = (\mu_1, \dots, \mu_M)$ de la forme :

$$J_m(U, V) = \sum_{i=1}^N \sum_{K=1}^M \lambda_K(x_i)^m d_k(x_i)^2 \quad (\text{III.18})$$

Sous les contraintes :

$$\lambda_k(x_i) \in [0,1] \quad \forall i, k \quad (\text{III.19})$$

$$\sum_{k=1}^M \lambda_k(x_i) = 1 \quad (\text{III.20})$$

Cette condition traduit le concept de totale appartenance.

$$0 < \sum_{i=1}^N \lambda_k(x_i) < 1 \quad (\text{III.21})$$

L'ensemble des vecteurs d'apprentissage est constitué de N vecteurs $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ susceptibles d'appartenir à M classes $\{a_1, a_2, \dots, a_m\}$.

La solution qui minimise la formule (3.18) est donnée par les deux conditions suivantes :

$$\mu_k = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_k(x_i)^m x_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_k(x_i)^m} \quad (\text{III.22})$$

$$\lambda_k(x_i) = \frac{1}{\sum_{j=1}^M (d_k(x_i) \times d_j(x_i))^{-2 \times (1-m)}} \quad (\text{III.23})$$

Les caractéristiques essentielles de cet algorithme sont : Partitionnement, non exclusivité, supervisé.

III.2.3 Inférence floue

La phase d'inférence consiste à calculer le degré de vérité des différentes règles du système, en utilisant les formules données dans la phase de fuzzification, et à associer à chaque règle une valeur de sortie. Cette valeur de sortie dépend de la partie conclusion des règles qui peut prendre plusieurs formes. Donc on peut dire que l'inférence floue est l'opération d'agrégation des règles floues.

Il peut s'agir d'une proposition floue, et l'on parlera dans ce cas de règle de *type mamdani* :

SI Alors Y est B.

Il peut également s'agir d'une fonction réelle des entrées, et l'on parlera dans ce cas de règle de *type sugeno* : *SI* Alors Y est $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. où x_1, \dots, x_n sont des valeurs réelles des variables d'entrée.

Une règle est une combinaison de variables d'entrées, combinaison qui utilise les opérateurs flous, tel que le "ET" et le "OU" (min et max).

Ainsi, pour toutes les combinaisons possibles des entrées, nous allons définir une règle. Cette règle nous indique à quel sous-ensemble de sortie, le coefficient de modification va être attribué.

Les règles d'inférences peuvent être décrites de plusieurs façons [18]

- linguistiquement : on écrit les règles d'une façon explicite.
 - symboliquement : il s'agit en fait d'une description linguistique où l'on remplace la Désignation des ensembles flous par des observations.
 - Par matrice d'inférence : elle rassemble toutes les règles d'inférence sous forme de tableau à deux dimensions : Les entrées du tableau représentent les ensembles flous des variables d'entrée. L'intersection d'une colonne et d'une ligne donne l'ensemble flou de la variable de sortie défini par la règle. Il y a autant de cases que de règles.
- Il existe plusieurs méthodes pour calculer la valeur représentative d'un ensemble de sortie, dont les principales sont : ***MIN / MAX, MAX / PROD, SOM / PROD.***

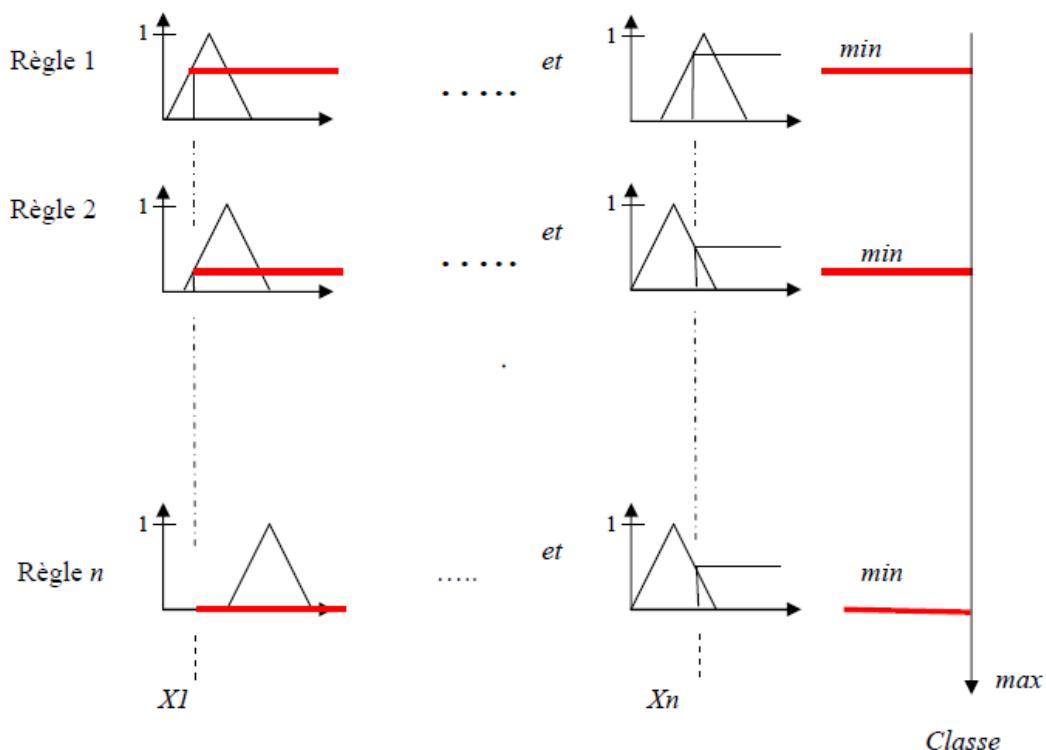


Figure III.8 : Base de règle floue avec une évaluation Min/Max

	MIN/MAX	MAX / PROD	SOM / PROD
ET	Min	Min	Prod
OU	Max	Max	Som
ALORS	Min	Prod	Prod
Combinaison	Max	Max	Som
Combinaison des règles activées (OU)			

Tableau III.2. Méthodes d'inférence floues.

III.2.4 Défuzzification ou concrétisation

Le moteur d'inférence fournit une fonction d'appartenance résultante pour la variable de sortie. Il s'agit donc d'une information floue.

Par cette étape se fait le retour aux grandeurs de sortie réelles. Il s'agit de calculer, à partir des degrés d'appartenance à tous les ensembles flous de la variable de sortie, l'abscisse correspondant à la valeur de cette sortie.

Il existe plusieurs méthodes pour calculer la valeur représentative d'un ensemble de sortie, dont les principales sont : Défuzzifications basées sur le centre de gravité des ensembles ; le MIN / MAX ; le SOM / PROD.

III.2.4.1 Défuzzification par le centre de gravité

La méthode de défuzzification la plus utilisée est celle de la détermination du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante $\mu_{RES}(x_R)$ [19]. Dans ce contexte il suffit de calculer l'abscisse Z^* . La figure III.9 montre le principe de défuzzification.

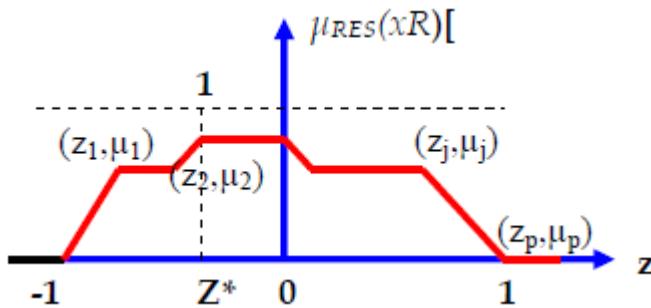


Figure III.9. Défuzzification par centre de gravité.

L'abscisse du centre de gravité peut être déterminée à l'aide de la relation générale
Suivante :

$$CdG = X^* = \frac{\int_{-1}^1 x_R \mu_{RES}(x_R) dx_R}{\int_{-1}^1 \mu_{RES}(x_R) dx_R} \quad (\text{III.24})$$

Lorsque la fonction d'appartenance est composée par morceaux de droits, il est possible de faire les intégrations analytiquement. Avec les coordonnées Z_j , μ_j des points d'intersections des p segments de droites.

L'abscisse du centre de gravité peut être calculée par la relation :

$$Z^* = \frac{\sum_{j=1}^p (z_{j+1} - z_j) [(2z_{j+1} + z_j)\mu_{j+1} + (z_{j+1} + 2z_j)\mu_j]}{3 \sum_{j=1}^p (z_{j+1} - z_j)(\mu_{j+1} + \mu_j)} \quad (\text{III.25})$$

III.2.4.2 Calcul du centre de gravité lors de la méthode d'inférence SOM / PROD

Cette méthode est la plus utilisée vu son temps de calcul court. Les coefficients issus du moteur d'inférence sont utilisés pour multiplier les fonctions d'appartenance des sous-ensembles de sortie. La valeur de la sortie correspondra au centre de gravité de tous ces ensembles pris individuellement.

Remarque : La position du centre de gravité de chaque sous-ensemble n'a pas été modifiée par le produit, d'où l'avantage d'un calcul simple du centre de gravité global.

Le calcul du centre de gravité peut être ramené au calcul suivant:

$$x^*_R = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{ci} x^*_i S_i}{\sum \mu_{ci} S_i} \quad (\text{III.26})$$

Où :

μ_{ci} : Coefficient de modification à appliquer au sous-ensemble.

S_i : Surface du sous-ensemble i.

X^*_i : Centre de gravité du sous-ensemble de sortie i.

III.2.4.3 Méthode par valeur maximum

Cette méthode est beaucoup plus simple, sa valeur de sortie est choisie comme l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance (figure III.10).

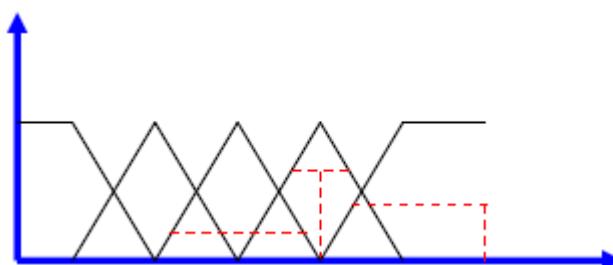


Figure III.10. Defuzzification par valeur maximum.

III.2.5 Les applications de la logique floue

Les domaines d'applications de la logique floue concernent principalement les problèmes où les données ne peuvent être formulées de manière explicite, ainsi que des techniques de contrôle et de réglages, lorsque les moyens classiques atteignent leurs limites (exemples caméra, systèmes non linéaires, etc.). et aussi pour les systèmes contrôlés par des Experts humains.

III.2.5.1 Commande floue

La Commande floue est l'application la plus utilisée de la logique floue. Elle consiste à remplacer les algorithmes de réglage conventionnels par des règles linguistiques. Ainsi, on obtient un algorithme linguistique s'y prête mieux que les méthodes traditionnelles à la commande d'un processus. Le schéma général d'une commande floue est illustré sur la figure III.11 :

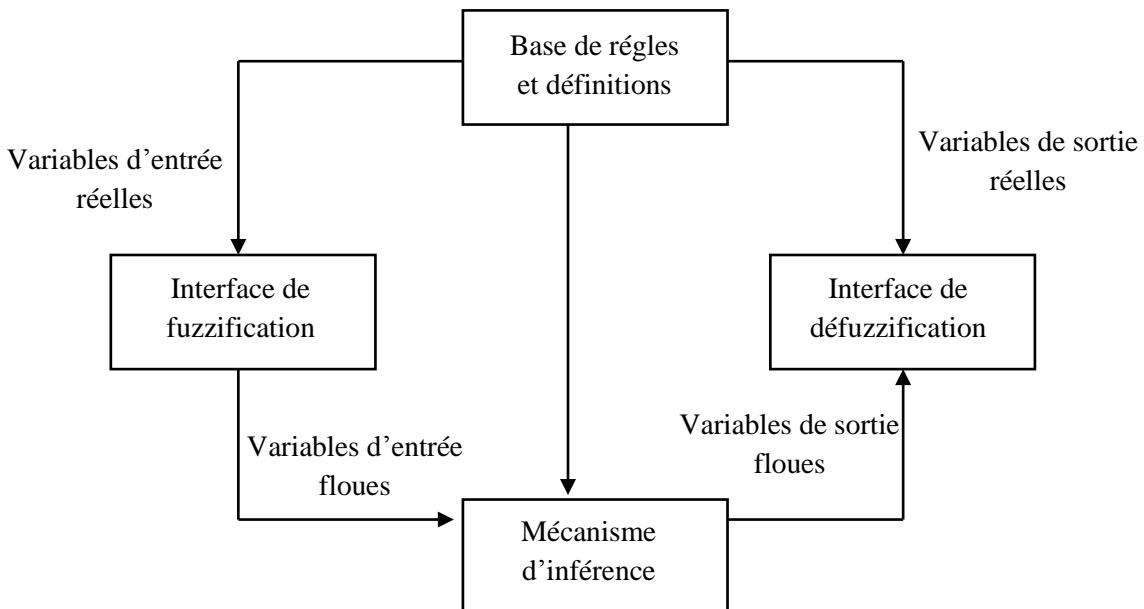


Figure III.11. Schéma général d'une commande floue.

Nous procédons tout d'abord à la partition en sous-ensembles flous des différents univers de discours (ou référentiels) que le système impose. Nous déterminons ensuite la base de règles qui va caractériser le fonctionnement désiré du système. Puis il faut transformer les variables réelles, c'est à dire celles qui ont une réalité physique, en variables floues. On appelle cette étape la « fuzzification ». Nous utilisons alors ces variables floues dans un mécanisme d'inférence qui crée et détermine les variables floues de sortie en utilisant les opérations sur les fonctions d'appartenance. Enfin, nous opérons à la de fuzzification qui

consiste à extraire une valeur réelle de sortie à partir de la fonction d'appartenance du sous-ensemble flou de sortie établi par le mécanisme d'inférence.

III.2.5.2 Diagnostic industriel

Les applications de la logique floue sont extrêmement nombreuses et variées. Les plus courantes sont les systèmes experts flous, le raisonnement à partir de cas est la reconnaissance floue de formes. Dans le cadre de la surveillance et du diagnostic, on trouve principalement les systèmes experts. Dans ces différents contextes (aide au diagnostic, aide alla décision), l'expert humain exprime des connaissances ou des données dans un langage naturel fondamentalement imprécis; la logique floue permet donc d'une part de prendre en compte les imprécisions inhérentes aux données et d'autre part de rendre compte Del 'expression des règles qui permettent de formuler un diagnostic ou de déterminer une action.

On trouve par exemple dans [19] l'architecture d'un outil de détection/diagnostic de station d'épuration, dans lequel la logique floue intervient sous forme d'un système expert flou et dans les étapes de classification (figure III.12).

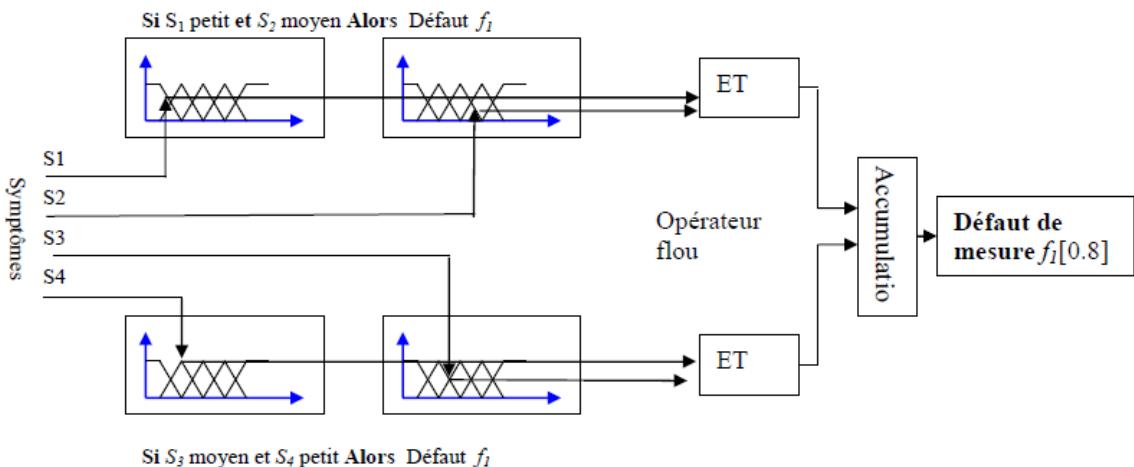


Figure III.12. Exemple de diagnostic par logique floue.

Dans le cadre de la surveillance des systèmes industriels, la logique floue se trouve également associée à d'autres outils et techniques d'analyses. A titre d'exemple, la logique floue a trouvé des applications en combinaison avec les arbres de défaillances afin d'évaluer l'apparition de l'événement sommet [20].

Dans ces diverses applications, l'utilisation de la logique floue est assez naturelle dans la mesure où elle permet de traiter l'imprécision, l'incertitude et l'incomplétude liées aux

connaissances du domaine. En plus, la logique floue leur confère une capacité d'utilisation en pronostic. Cependant, même si la logique floue fournit des résultats satisfaisants, on ne peut considérer ces applications comme de véritables applications de la logique floue pour le diagnostic dans la mesure où ces différents outils ne s'appliquent pas à la localisation et l'identification des causes expliquant un défaut. Utilisée avec les arbres de défaillances, cette dernière devrait fournir une évaluation sur l'occurrence ou la présence des événements de base de l'arbre de défaillances qui sont eux à l'origine de l'événement sommet. On obtiendrait ainsi l'évaluation des causes à l'origine d'un dysfonctionnement.

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté un bref aperçu sur la commande par linéarisation entrée/sortie et son application au système hydraulique à deux réservoirs couplés. Nous avons vu que la technique de la linéarisation entrée/sortie est basée sur l'idée de transformer un système non linéaire en un système linéaire puis lui appliquer une commande linéaire. Pour dé raisons de comparaison, la commande par linéarisation autour d'un point de fonctionnement est aussi présentée.

Les outils fournis par la logique floue permettent une modélisation des phénomènes pouvant en un certain sens s'approcher du raisonnement humain. Le fait de transcender le tout ou rien des ordinateurs introduit une souplesse faisant la puissance des outils flous dans de nombreux domaines.

Les applications montrent les avantages de la logique floue quand le modèle des systèmes est difficile à implémenté. Malheureusement, avec l'augmentation dans la complexité du modèle de l'existence du processus, nous allons rencontrer des difficultés pour développer des règles floues et des fonctions d'appartenance.

VI. Commande d'un système hydraulique à deux réservoirs couplés

IV.1.	Introduction	62
IV.2.	Commande par linéarisation entrée/sortie	62
IV.2.1.	Linéarisation autour d'un point de fonctionnement.....	62
IV.2.2.	Commande du système hydraulique a deux réservoirs.....	64
IV.2.3.	Résultats et discussion	66
IV.3.	Commande par la logique floue	68
IV.3.1.	Etape du fuzzification	69
IV.3.2.	Etape des règles linguistiques	70
IV.3.3.	Défuzzification:.....	71
IV.3.4.	Résultats et discussion	71
IV.4.	Supervision du système hydraulique.....	73
IV.5.	Conclusion.....	75

IV.1. Introduction

La commande fiable du système hydraulique consiste à contrôler l'alimentation des pompes ou l'ouverture et fermeture des vannes analogiques, tout en maintenant la plupart des variables du système hydraulique dans leurs limites admissibles, même en cas de perturbations pouvant affecter le système. Cette fiabilité est assurée par des systèmes de commande, qui doivent être fidèlement modélisés afin d'obtenir des performances plus fiables. Dans ce contexte, la modélisation en vue de la commande du système hydraulique à deux réservoirs a été présentée dans le chapitre précédent. En effet, la commande par linéarisation entrée/sortie et la commande par logique floue ont été modélisées et détaillées.

Dans ce chapitre, nous présentons l'application des lois de commande par linéarisation des entrées et des sorties et par logique floue synthétisées précédemment. De plus, nous allons présenter des simulations réalisées sur MATLAB en boucle fermée afin de conclure les performances de chaque régulateur.

IV.2. Commande par linéarisation entrée/sortie

Le but de cette section est de présenter la linéarisation entrée/sortie du système hydraulique à deux réservoirs couplés. Cependant, pour des raisons de comparaison, on présente également une commande linéaire par retour d'état utilisant une linéarisation locale autour d'un point de fonctionnement.

IV.2.1. Linéarisation autour d'un point de fonctionnement

On considère les équations d'état du système hydraulique deux réservoirs :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \beta_1 \sqrt{x_2 - x_1} - \beta_2 \sqrt{x_1} \\ \dot{x}_2 = -\beta_1 \sqrt{x_2 - x_1} + K_u u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

Notre objectif est de stabiliser la sortie du système hydraulique x_1 autour de x_{1e} . Alors, le point de fonctionnement (x_{1e}, x_{2e}) et u_e est déterminé de la résolution des équations suivantes :

$$\begin{cases} \beta_1 \sqrt{x_{2e} - x_{1e}} - \beta_2 \sqrt{x_{1e}} = 0 \\ -\beta_1 \sqrt{x_{2e} - x_{1e}} + K_u u_e = 0 \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

De la deuxième équation de (4.2), on obtient :

$$\beta_1 \sqrt{x_{2e} - x_{1e}} = K_u u_e \quad (\text{IV.3})$$

$$u_e = \frac{\beta_1 \sqrt{x_{2e} - x_{1e}}}{K_u} \quad (\text{IV.4})$$

Et de la première équation de (4.2), il vient :

$$\beta_1 \sqrt{x_{2e} - x_{1e}} = \beta_2 \sqrt{x_{1e}} \quad (\text{IV.5})$$

$$\sqrt{x_{2e} - x_{1e}} = \beta_2 \sqrt{x_{1e}} \quad (\text{IV.6})$$

$$\sqrt{x_{2e} - x_{1e}} = \frac{\beta_2 \sqrt{x_{1e}}}{\beta_1} \quad (\text{IV.7})$$

Donc, on obtient :

$$x_{2e} - x_{1e} = \left(\frac{\beta_2}{\beta_1} \right)^2 x_{1e} \quad (\text{IV.8})$$

Ainsi, il vient :

$$x_{2e} = \left(\left(\frac{\beta_2}{\beta_1} \right)^2 + 1 \right) x_{1e} \quad (\text{IV.9})$$

Le point de fonctionnement est donné par :

$$\begin{cases} x_{1e} \\ x_{2e} = \left(1 + \left(\frac{\beta_2}{\beta_1} \right)^2 \right) x_{1e} \\ u_e = \frac{\beta_1}{K_u} \sqrt{x_{1e}} \end{cases} \quad (\text{IV.10})$$

La linéarisation du système hydraulique autour du point de fonctionnement (4.11) donne :

$$\begin{cases} \frac{d\Delta x_1}{dt} = \left[\beta_1 \frac{-1}{2\sqrt{x_{2e} - x_{1e}}} - \beta_2 \frac{1}{2\sqrt{x_{1e}}} \right] \Delta x_1 + \beta_1 \frac{1}{2\sqrt{x_{2e} - x_{1e}}} \Delta x_2 \\ \frac{d\Delta x_2}{dt} = \frac{\beta_1}{2\sqrt{x_{2e} - x_{1e}}} \Delta x_1 - \frac{\beta_1}{2\sqrt{x_{2e} - x_{1e}}} \Delta x_1 - \frac{\beta_1}{2\sqrt{x_{2e} - x_{1e}}} \Delta x_2 + K_u \Delta u \end{cases} \quad (\text{IV.12})$$

Avec

$$\Delta x_1 = x_1 - x_{1e}, \Delta x_2 = x_2 - x_{2e} \quad (\text{IV.13})$$

$$\Delta u = u - u_e \quad (\text{IV.15})$$

Donc

$$\dot{\Delta x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (\text{IV.16})$$

$$A = \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \Big|_{x=x_e, u=u_e} = \left[\frac{-\beta_1}{2\sqrt{x_{2e} - x_{1e}}} - \frac{\beta_2}{2\sqrt{x_{1e}}} \frac{\beta_1}{2\sqrt{x_{2e} - x_{1e}}} \right] \quad (\text{IV.17})$$

$$B = \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \Big|_{x=x_e, u=u_e} = \begin{bmatrix} 0 \\ K_u \end{bmatrix} \quad (\text{IV.18})$$

Pour stabiliser le système au point de fonctionnement, on choisit une loi de commande linéaire de la forme suivante :

$$u = u_e - K_1(x_1 - x_{1e}) - K_2(x_2 - x_{2e}) \quad (\text{IV.19})$$

Les gains K_1 et K_2 peuvent être calculés par la méthode d'imposition des pôles.

$$K_1 = 1.6913 \times 10^4$$

$$K_2 = 3.4103 \times 10^3$$

IV.2.2. Commande du système hydraulique à deux réservoirs

Les équations d'état du système hydraulique à deux réservoirs sont définies comme suit:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \beta_1 \sqrt{x_2 - x_1} - \beta_2 \sqrt{x_1} \\ \dot{x}_2 = -\beta_1 \sqrt{x_2 - x_1} + K_u u \end{cases} \quad (\text{IV.20})$$

On réécrit (IV.20) sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x) \\ \dot{x}_2 = f_2(x) + K_u u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (\text{IV.21})$$

$$\begin{aligned} f_1(x) &= \beta_1 \sqrt{x_2 - x_1} - \beta_2 \sqrt{x_1} \\ f_2(x) &= -\beta_2 \sqrt{x_2 - x_1} \end{aligned} \quad (\text{IV.22})$$

➤ Calcul degré relatif

$$y = x_1 \quad (\text{IV.23})$$

$$\dot{y} = \dot{x} = L_f h(x) = f_1(x) = \beta_1 \sqrt{x_2 - x_1} - \beta_2 \sqrt{x_1} \quad (\text{IV.24})$$

$$\ddot{y} = L_f^2 h(x) = \beta_1 \frac{1}{2\sqrt{x_2 - x_1}} (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - \beta_2 \frac{1}{2\sqrt{x_1}} \dot{x}_1 \quad (\text{IV.25})$$

$$\ddot{y} = \frac{\beta_1}{2\sqrt{x_2 - x_1}} (f_2 - f_1) - \beta_2 \frac{1}{2\sqrt{x_1}} f_1 + \frac{\beta_1}{2\sqrt{x_2 - x_1}} K_u u \quad (\text{IV.26})$$

$$\ddot{y} = \frac{\beta_1}{2\sqrt{x_2 - x_1}} (f_2 - f_1) - \beta_2 \frac{1}{2\sqrt{x_1}} f_1 + \frac{\beta_1}{2\sqrt{x_2 - x_1}} K_u u \quad (\text{IV.27})$$

L'entrée u apparaît dans l'expression (4.27), alors pour cette sortie, le degré relatif est $r = 2$

➤ Calcul de la loi de commande u

On a :

$$\ddot{y} = \frac{\beta_1}{2\sqrt{x_2 - x_1}} (f_1 - f_2) - \beta_2 \frac{1}{2\sqrt{x_1}} f_1 + \frac{\beta_1}{2\sqrt{x_2 - x_1}} K_u u = \alpha(x) + \beta(x)u = v \quad (\text{IV.28})$$

$$\begin{cases} \beta(x) = \frac{\beta_1 K_u}{2\sqrt{x_2 - x_1}} \\ \alpha(x) = \left(\frac{\beta_1}{2\sqrt{x_2 - x_1}} [f_2 - f_1] - \beta_2 \frac{1}{2\sqrt{x_1}} f_1 \right) \end{cases} \quad (\text{IV.29})$$

Donc, la loi de commande est de la forme suivant :

$$u = \frac{1}{\beta(x)} (v - (\alpha)) \quad (\text{IV.30})$$

Pour la détermination de v , et afin d'avoir une poursuite d'une trajectoire de référence $y_d(t)$, on définit :

$$e = y_d - y \Rightarrow \dot{e} = \dot{y}_d - \dot{y} \Rightarrow \ddot{e} = \ddot{y}_d - \ddot{y} = \ddot{y} - v \quad (\text{IV.31})$$

Avec :

$$v = \ddot{y}_d + K_1 \dot{e} + K_0 e \quad (\text{IV.32})$$

On a :

$$\begin{cases} e = y_d - y = y_d - x_1 \\ \dot{e} = \dot{y}_d - \dot{y} = \dot{y}_d - (\beta_1 \sqrt{(x_2 - x_1)} - \beta_2 \sqrt{x_1}) \end{cases} \quad (\text{IV.33})$$

Il vient :

$$\ddot{e} + K_1 \dot{e} + K_0 e = 0$$

Les paramètres K_0 et K_1 sont déterminés de telle sorte que $S^2 + K_1 S + K_0$ soit stable.

Le polynôme $S^2 + K_1 S + K_0$ est stable lorsque ses racines ont une partie réelle négative. On impose les pôles suivants :

$$\begin{cases} P_1 = -1 \\ P_2 = -2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} K_1 = -(P_1 + P_2) \\ K_2 = P_1 P_2 \end{cases} \quad (\text{IV.34})$$

IV.2.3. Résultats et discussion

L'intérêt de cette simulation est d'examiner la réponse du système hydraulique à deux réservoirs, en utilisant la commande par la linéarisation des entrées et des sorties. Dans ce contexte, On va voir la réponse du système hydraulique, en variant la section transversale du tube de fuite. A cette la commande a été examiné pour :

$$a_0 = 0.01 \text{ m}; a_0 = 0.05 \text{ m}; a_0 = 0.1 \text{ m} ;$$

Les résultats de simulation de la commande par linéarisation entrée/sortie sont présentés sur les Figures IV.2- IV.4. Les résultats de simulations de la commande montrent que la sortie réelle du deuxième réservoir suit bien la référence désirée choisie. Et quand on varie la section transversale du tube de fuite a_0 la qualité de poursuite est maintenue mais le dépassement du niveau dans le régime transitoire augmente avec l'augmentation de la section de fuite.

Pour améliorer les performances du système hydraulique a deux réservoirs, en éliminant le dépassement du niveau dans le régime transitoire, nous allons remplacer la commande par linéarisation entrée/sortie avec la commande floue.

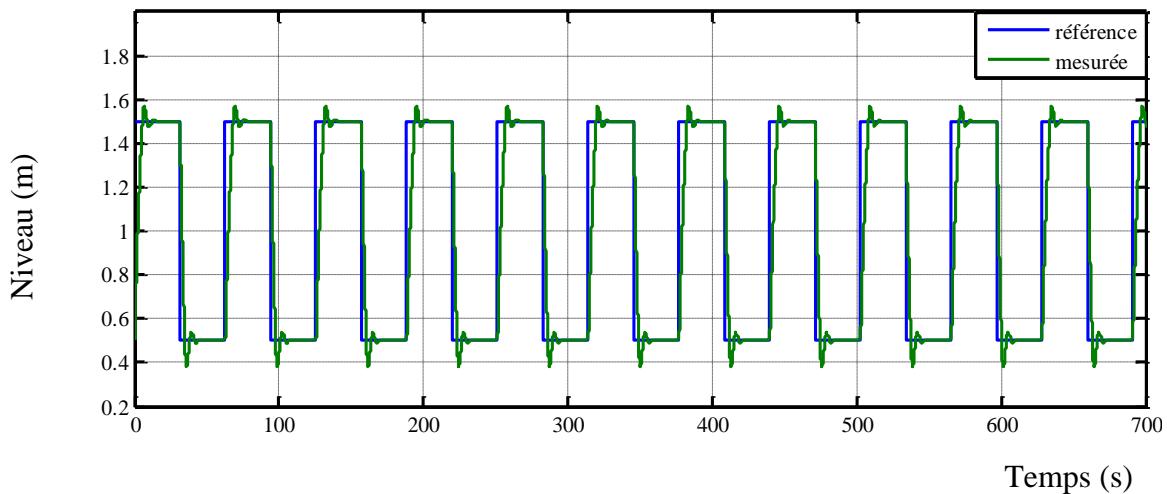


Figure IV.2. Niveau d'eau dans le deuxième réservoir pour $a_0 = 0.01 \text{ m}$

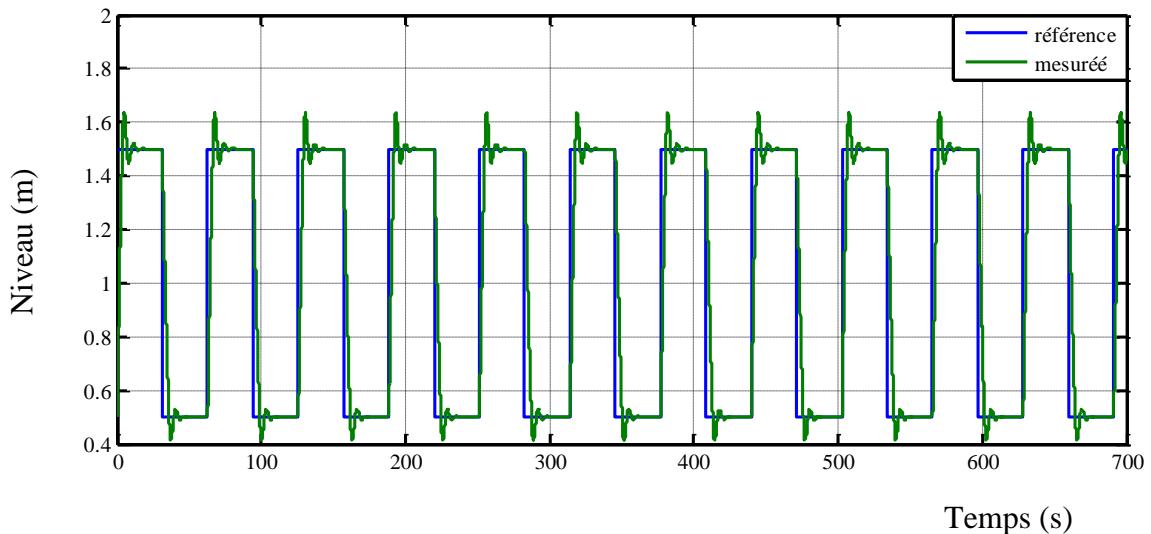


Figure IV.3. Niveau d'eau dans le deuxième réservoir pour $a_0 = 0.05 \text{ m}$

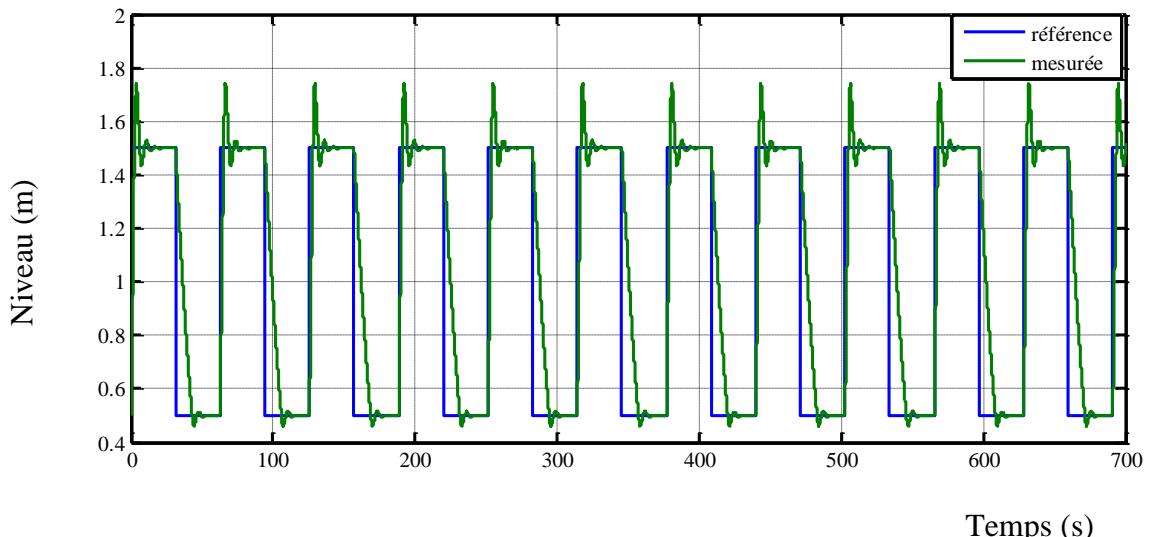


Figure IV.4 Niveau d'eau dans le deuxième réservoir pour $a_0 = 0.1 \text{ m}^2$

IV.3. Commande par la logique floue

Après avoir énoncé des concepts de base et les termes linguistiques utilisés en logique floue, nous présentons la structure d'un contrôleur flou. Dans ce qui suit, nous nous intéressons principalement au régulateur de niveau d'eau pour le système hydraulique à deux réservoirs. Le contrôleur développé utilise le schéma proposé par Mamdani. Ce schémas est présenté sur la Figure (IV.5), il est composé de :

- Des facteurs de normalisation associent à l'erreur (e) , à sa variation (Δe) et à la variation de la vanne (Δu) .
- D'un bloc de fuzzification de l'erreur et sa variation.
- Des règles de contrôle flou.
- D'un bloc de défuzzification utilisé pour convertir la variation de commande floue en valeur numérique.

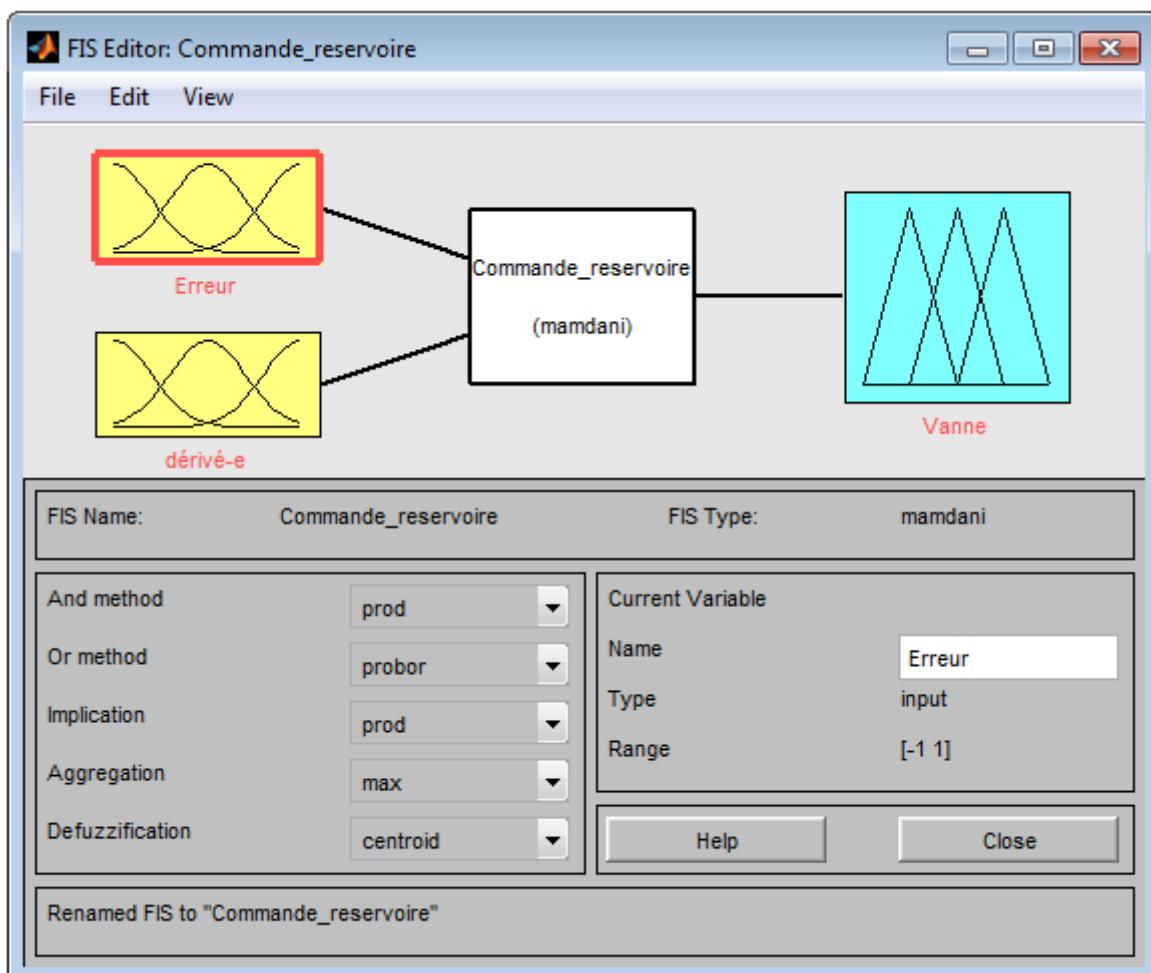


Figure IV.5. Schéma de Mamdani pour la régulation floue de la vanne du système hydraulique.

Il est important de bien choisir les plages de valeurs. Un bon choix de plages avec une bonne répartition peut garantir une conception réussie. En revanche, un mauvais choix entraîne des longues corrections dans les étapes qui suivent; il faut souvent même redéfinir les plages des valeurs afin d'éviter l'échec dans la conception. Un bon choix demande de l'expérience et de la connaissance du système à commander.

IV.3.1. Etape du fuzzification

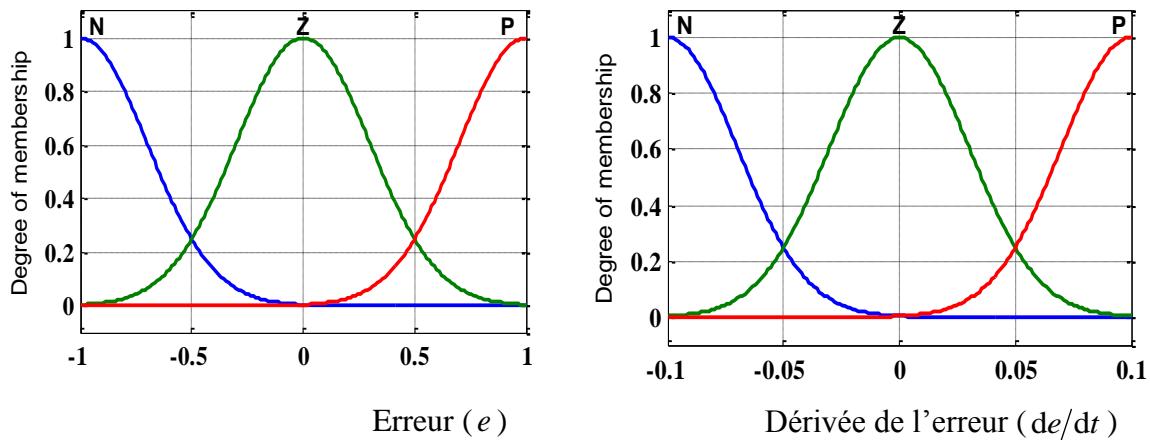
Les variables et les valeurs linguistiques sont définis comme suit :

- **2 entrées** : Erreur (e), Dérivée de la sortie ($\frac{dN}{dt}$)
 - a. Erreur (e) $\in \{\text{Négative (N)}, \text{Zéro(Z)}, \text{Positive(p)}\}$
 - b. Dérivée de la sortie ($\frac{de}{dt}$) $\in \{\text{Négative (N)}, \text{Zéro(Z)}, \text{Positive(p)}\}$
- **1 sortie** : Vanne (V)
 - a. Vanne (V) $\in \{\text{Ouvrir Rapidement (OR)}, \text{Ouvrir Lentement (OL)}, \text{Pas de Changement (PC)}, \text{Fermer Lentement (FL)}, \text{Fermer Rapidement (FR)}\}$

Les fonctions d'appartenance pour les variables d'entrées sont définies comme suit :

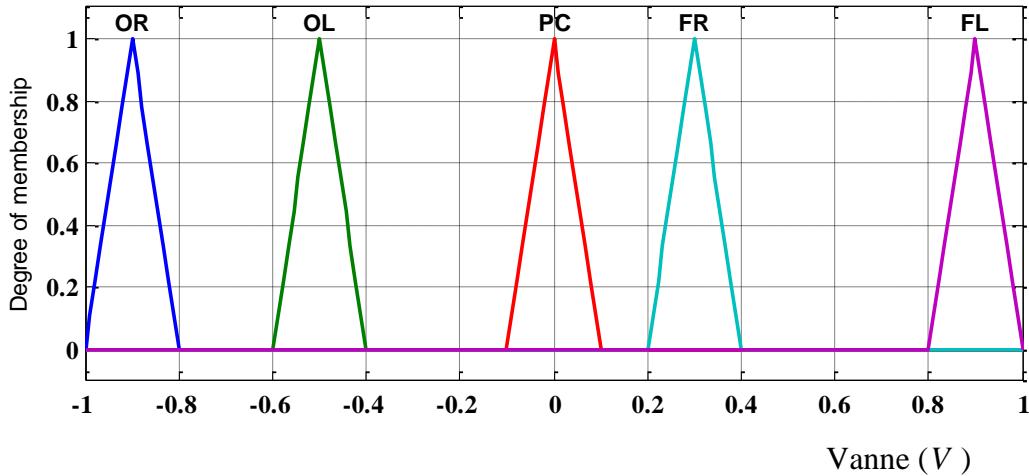
	Erreur (e)			Dérivée de l'erreur ($\frac{de}{dt}$)		
Valeurs	N	Z	P	N	Z	P
Forme	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss	Gauss
Paramètre	[0.3 -1]	[0.3 0]	[0.3 1]	[0.03 -0.1]	[0.03 0]	[0.03 0.1]

Tableau IV.1. Les fonctions d'appartenance pour les variables d'entrées.

**Figure IV.6.** Les fonctions d'appartenance pour les variables d'entrées.

Les fonctions d'appartenance pour la variable de sortie sont définies comme suit :

	Vanne (V)				
Valeurs	OR	OL	PC	FR	FL
Forme	Triangulaire	Triangulaire	Triangulaire	Triangulaire	Triangulaire
Paramètre	[-1 -0.9 -0.8]	[-0.6 -0.5 0.4]	[-0.1 0 0.1]	[0.2 0.3 0.4]	[0.8 0.9 1]

Tableau IV.2. Les fonctions d'appartenance pour les variables de sortie.**Figure IV.7.** Les fonctions d'appartenance pour les variables de sortie.

IV.3.2. Etape des règles linguistiques

A partir de l'étude du comportement du système en boucle fermée de niveau d'eau basée sur les expériences, nous pouvons établir les règles de commande, qui relient la sortie avec les entrées. Comme nous l'avons constaté, il y a cinq ensembles flous, Les règles sont définies comme suit :

- R1 : **Si** e est Z **Alors** V est PC
- R2 : **Si** e est Négative **Alors** V est OR
- R3 : **Si** e est P **Alors** V est CR
- R4 : **Si** e est Z et $\frac{de}{dt}$ est P **Alors** V est FL
- R5 : **Si** e est Z et $\frac{de}{dt}$ est N **Alors** V est OL

Tableau IV.3. Les règles linguistiques

IV.3.3. Défuzzification:

Lorsque la sortie floue est calculée, il faut la transformer en une valeur numérique. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser cette transformation. La plus utilisée est la méthode du centre de gravité, qu'on a adoptée dans notre travail [16].

L'abscisse du centre de gravité correspondant à la sortie du régulateur est donnée par la relation suivante :

$$\bar{x} = \frac{\int_{-1}^{+1} x \mu_B(x) dx}{\int_{-1}^{+1} \mu_B(x) dx} \quad (\text{IV.41})$$

IV.3.4. Résultats et discussion

Afin de contrôler le débit volumique d'entrée en ouvrant la vanne par une commande de logique floue. Dans ce contexte, le schéma de simulation présenté sur la Figure IV.8. a été utilisé pour examiner la commande floue du niveau d'eau, en ajustant les gains du régulateur par tâtonnement pour atteindre les performances désirées.

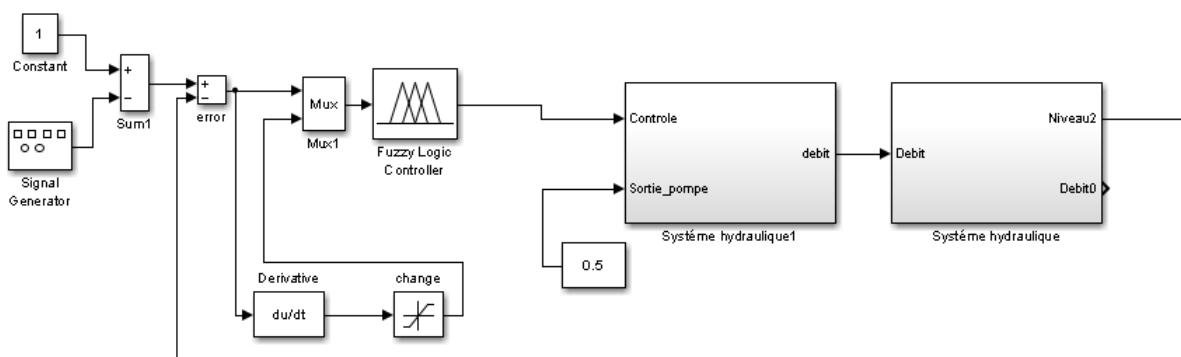
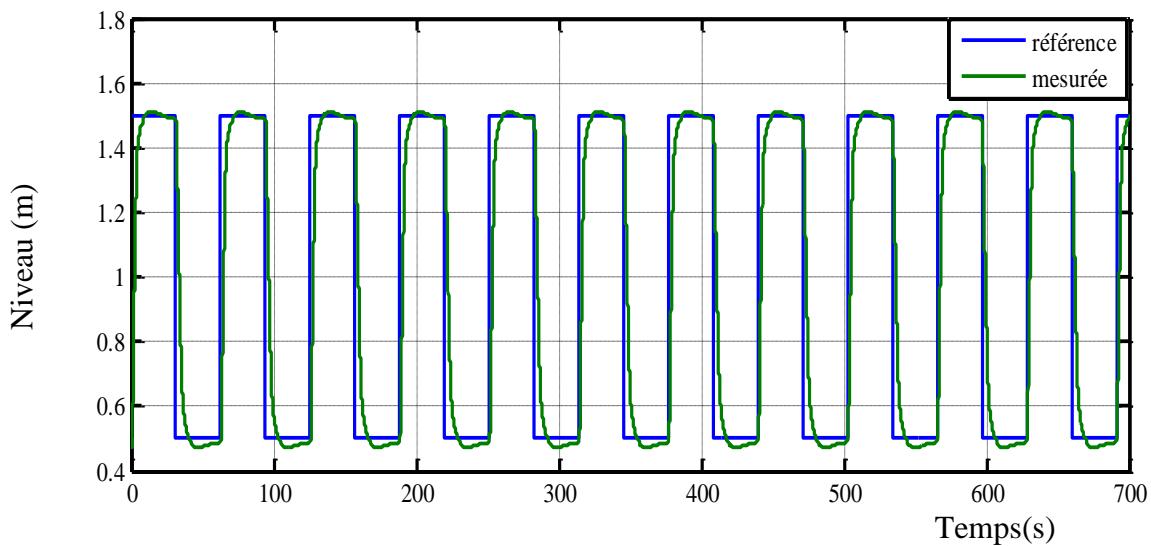
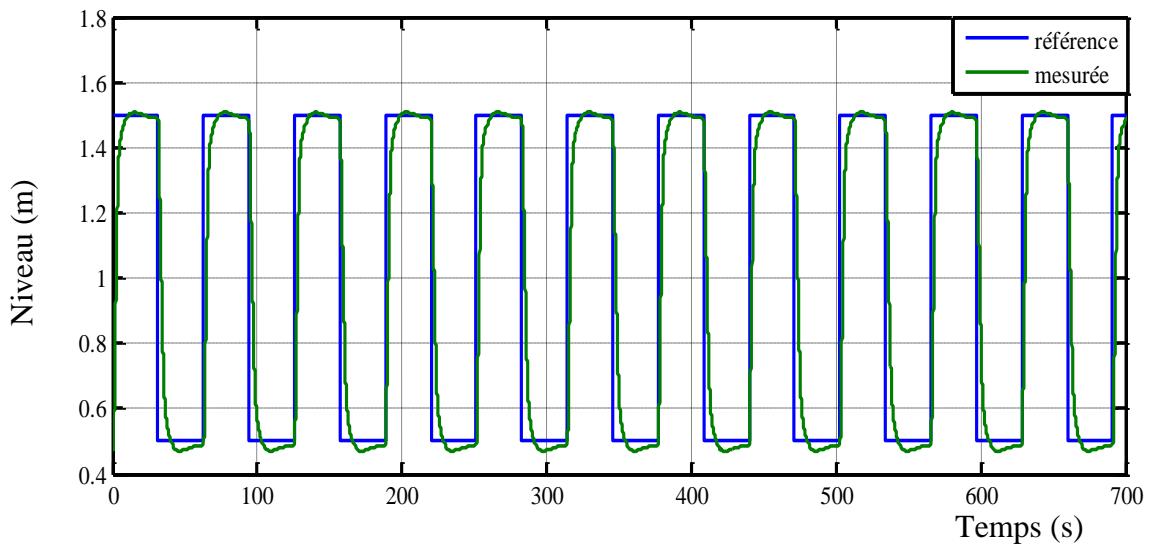


Figure IV.8 Schéma fonctionnel de la régulation de niveau d'eau.

Les résultats de simulation de la commande par logique floue sont présentés sur les Figures IV.9- IV.11. Les résultats de simulations de la commande montrent que la sortie réelle du deuxième réservoir suit bien la référence désirée choisie malgré le changement de la section transversale de fuite. De plus, les performances du système hydraulique ont été améliorées, en illuminant les dépassemens dans le régime transitoire obtenus par la commande par linéarisation des entrées et des sorties.

**Figure IV.9.** Niveau d'eau dans le deuxième réservoir pour $a_0 = 0.02$ **Figure IV.10.** Niveau d'eau dans le deuxième réservoir pour $a_0 = 0.05$

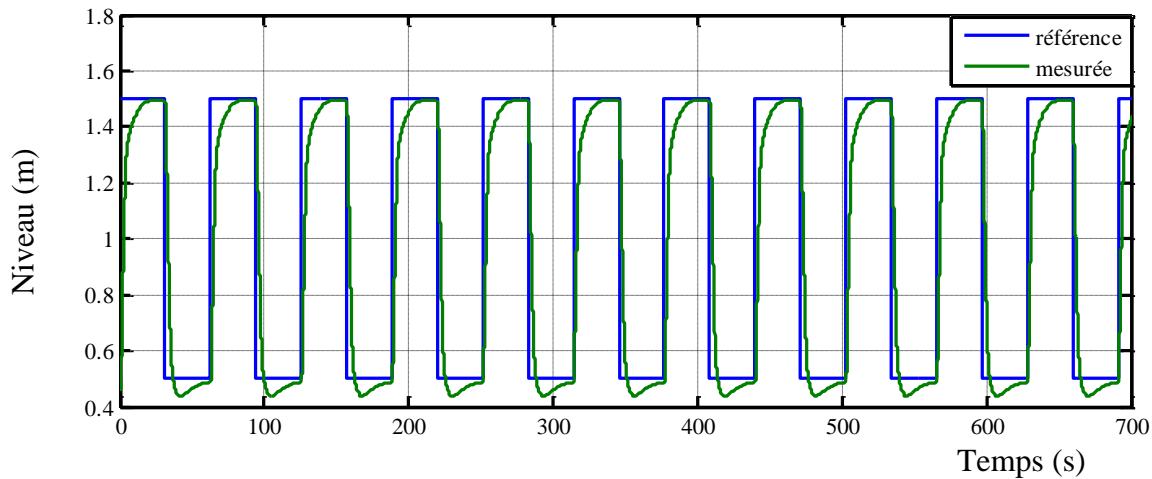


Figure IV.11. Niveau d'eau dans le deuxième réservoir pour $a_0 = 0.1$

IV.4. Supervision du système hydraulique

Afin de superviser le niveau d'eau dans le deuxième réservoir ($y = x_1$), une application de supervision, illustrée sur la Figure IV.1, a été développé par un programme sur MATLAB. Le programme de l'animation peut s'écrire comme suit :

```

function [sys,x0]=Supervision(t,x,u,flag,ts)

global Niveau

if flag==2,
    if any(get(0,'Children')==Niveau),
        if strcmp(get(Niveau,'Name'),'Supervision du niveau'),

            % Update tank one level
            tankHndlList=get(Niveau,'UserData');
            yData=get(tankHndlList(1),'YData');
            yOffset=yData(1);
            yData(3:4)=[1 1]*u(2)+yOffset;
            set(tankHndlList(1),'YData',yData);

            yData=get(tankHndlList(2),'YData');
            yData([3 4])=[1 1]*u(2)+yOffset;
            set(tankHndlList(2),'YData',yData);

            yData=get(tankHndlList(3),'YData');
            yData=[1 1]*u(1)+1;
            set(tankHndlList(3),'YData',yData);

            drawnow;
        end
    end
    sys=[];
    x0=[];

elseif flag == 4

```

```

ns = t/ts;
sys = (1 + floor(ns + 1e-13*(1+ns)))*ts;
x0=[];

elseif flag==0,

fuzzy_animinit('Tank Demo');
tankdemo=findobj(0,'Name','Tank Demo');

tank1Wid=1;
tank1Ht=2;
tank1Init=0;
setPt=0.5;

tankX=[0 0 1 1]-0.5;
tankY=[1 0 0 1];

line(1.1*tankX*tank1Wid+1,tankY*tank1Ht+0.95,'LineWidth',2,'Color','black')
;
tankX=[0 1 1 0 0]-0.5;
tankY=[0 0 1 1 0];
% Draw the water
waterX=tankX*tank1Wid+1;
waterY=tankY*tank1Init+1;
tank1Hndl=patch(waterX,waterY,'blue','EdgeColor','none');
% Draw the gray wall
waterY([1 2 5])=tank1Ht*[1 1 1]+1;
waterY([3 4])=tank1Init*[1 1]+1;
tank2Hndl=patch(waterX,waterY,[.9 .9 .9],'EdgeColor','none');
% Draw the set point
lineHndl=line([0 0.4],setPt*[1 1]+1,'Color','red','LineWidth',4);

set(gcf, ...
'Color',[.9 .9 .9], ...
'UserData',[tank1Hndl tank2Hndl lineHndl]);
set(gca, ...
'XLim',[0 2], 'YLim',[0 3.5], ...
'XTick',[], 'YTick',[], ...
'XColor','black', 'YColor','black', ...
'Box','on');
axis equal
xlabel('Supervision du niveau','Color','black','FontSize',10);
set(get(gca,'XLabel'),'Visible','on')

sys=[0 0 0 2 0 0];
x0=[];

end;

```

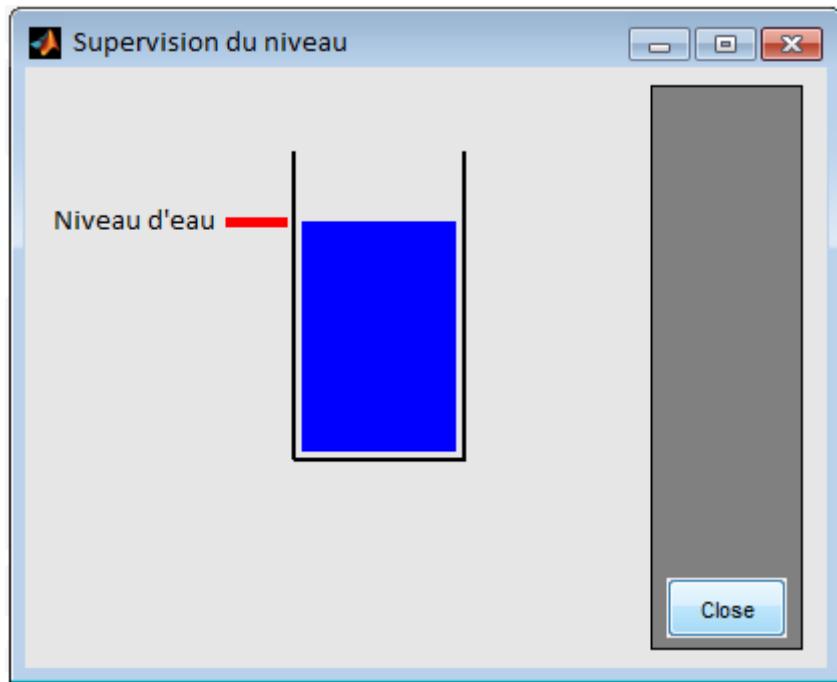


Figure IV.1. Application de supervision du niveau d'eau .

IV.5. Conclusion

Dans ce quatrième chapitre, nous avons donné un aperçu de la commande linéaire Entrées/sorties et de la commande par logique floue et son application au système hydraulique. Nous avons vu que la technique de linéarisation entrée/sortie est basée sur l'idée de transformer un système non linéaire en un système linéaire puis lui applique une commande linéaire. De plus, nous avons vu les aspects de la commande par logique floue, ainsi que la conception d'un contrôleur flou ont été introduits tout en justifiant notre choix de ce type de commande qui réside dans sa capacité de traiter l'imprécis, l'incertain et le vague et sa simplicité de conception. A la fin du chapitre, nous avons développé une application de supervision pour surveiller le niveau d'eau du réservoir.

Les résultats de la simulation pour les deux régulateurs montrent que le niveau d'eau a bien suivi la consigne ou le niveau désiré. Cependant, le régulateur flou peut améliorer les performances du système hydraulique, en illuminant le dépassement du niveau dans le régime transitoire.

Conclusion générale

L'exploitation et l'automatisation des systèmes hydrauliques sont très utiles, qui constituent une association des composants électronique, hydraulique, informatique et mécanique. Ce projet nous a permis de réaliser une petite installation hydraulique prototype, commander et contrôler par une carte électronique qui ordonne à une seule pompe et deux électrovannes d'alimenter deux réservoirs pour stocker une certaine quantité d'eau d'une façon continue à partir d'un réservoir source (puits).

Nous avons établi le projet et créer le programme qui permet de répondre au cahier de charge. Notre étude a été axée sur la conception de la commande et la conception du circuit hydraulique. A ce stade, nous pouvons affirmer que l'objectif de notre travail est atteint. En effet, la réalisation de cette commande programmée nous a conduits réellement à l'obtention du stockage de l'eau dans deux réservoirs d'une façon continue. Ensuite, nous avons appliqué deux technologies de contrôle au système hydraulique de commande, en l'occurrence, la commande basée sur la linéarisation entrée/sortie et la commande par logique floue.

La commande par linéarisation entrée/sortie a été présentée. Approche est basée sur la notion du degré relatif de la sortie considérée. L'application de cette technique au système hydraulique a donné des résultats satisfaisants en ce qui concerne la poursuite de la sortie désirée. Dans notre cas, pour le système hydraulique, les performances de cette approche se dégradent lorsqu'il existe des perturbations dans le système. D'autre part, la commande par logique floue est essentiellement basée sur des différents mécanismes et outils mathématiques nécessaires pour l'étude des concepts de base du système. Nous avons vu que la commande floue est basée sur trois parties essentielles ; la fuzzification, l'inférence flou et la défuzzification.

Malgré que le régulateur flou a donné un bon résultat que le régulateur par linéarisation entrée/sortie, mais le temps de développement d'un régulateur flou est assez important que l'autre régulateur parce-que nous avons rencontré des difficultés pour poser des règles floues et des fonctions d'appartenance pour notre système.

Bibliographie

- [1] : « Mémento du gestionnaire de l'alimentation en eau et de l'assainissement », Tome P.205, 206, 207.
- [2] : B. SALAH « polycopie d'Alimentation en Eau Potable », p.30a, 63, 64,72, 73,74, 75,76.
- [3] : CHARLATTE « Réservoirs hydraulique ».
- [4] : Lemasson G., Les machines transformatrices d'énergie, Tome2, Delagrave, 1982.
- [5] : typepomp.pdf principe de pompes centrifuge.
- [6] : Adamt T., les Turbopompes, Eyrolles, Paris, 1976.
- [7] : A.G.H.T.M Paris 1982 « les stations de pompage », édition Technique et Documentation, p.101.
- [8] : C. GOMELL et H. GUERREE « La distribution d'eau dans les agglomérations de petite et moyenne importance », Edition EYROLLES, 2004, université LAVAL.
- [9] : Fonctionnement des électrovannes de suspension v1.2 - Christophe TATIN 13/04/2004.
- [10] : Description Générale sur Le Capteur DS18B20 (source_ <https://www.dalsemi.com>).
- [11] : Domaine d'application des relais électromécaniques (source_wikipedia).
- [12] 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.
- [14] I. Boubakir, A. Zenanra, Commande décentralisée basée sur la dérivée d'ordre supérieur, PFE, Université de Jijel, 2009.
- [15] S. Safari, Etude d'une commande non linéaire sur un filtre actif, Mémoire de Master, Ecole de Technologie Supérieur, Université de Québec, 2002.
- [16] H. Kenniche, Commande par linéarisation entrées-sorties d'une machine asynchrone avec un estimateur d'état du flux rotorique, Mémoire de master, Université Ouargla, 2015.
- [17] C. Lakhmi. Jain; N.M. Martin, Fusion of Neural Networks, Fuzzy Systems and Genetic Algorithms: Industrial Applications. CRC Press, ISBN: 0849398045.1998.
- [18] L. Baghli, contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques. Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy, France.1999.

- [19] A. Abraham, cerebral quotion of neuro fuzzy tevhniques-hype or hallelujah, school of computing and information technology, Victoria, Australia.2000.
- [20] T. Ojala, neuro-fuzzy systems in control, department of electrical engineering. These de Master en science, Université de Tempre, Finland.1994.