

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 8 Mai 1945 – Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2022



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER Académique**

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Automatique

Spécialité: Automatique et Informatique industrielle

Par: KENNAT Mohammed et BRAHMIA Oussama

Thème

Modélisation et commande d'un système hydraulique à trois réservoirs

Soutenu publiquement, le 19/06 /2022, devant le jury composé de:

Mme. BOUCERREDJ Leila
Mr. BOUDJEHEM Badr Eddine
Mr. DEBECHE Mehdi

MCA
Professeur
MAA

Univ. Guelma Examineur
Univ. Guelma Président / Encadreur
Univ. Guelma Examineur

Année Universitaire: 2021/2022

Remerciements

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

Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à notre encadreur
Pr. Boudjehem Badr Eddine pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi
continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessée de me
donner ses conseils et remarques.

Je remercie également, tous les membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce
travail.

Ainsi que tous mes enseignants du Département du Génie électrique.

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

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

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

Dédicace

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais tout d'abord de me remercier, me remercier de croire en moi, de ma patience et de faire tout ce travail, de n'avoir aucun jour de congé, de ne jamais abandonner, d'être toujours un donateur et d'essayer de donner plus que je reçois.

J'adresse mes sincères remerciements à mon directeur de mémoire **Pr. Boudjehem Badr Eddine** pour disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi. Je remercie ma sœur et mes frères, pour leurs encouragements.

Enfin, je remercie mes amis qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

Brahmia Oussama

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A Ma très chère mère

A Mes sœurs

A Mes frères

A toute ma famille

A mes chers amis

A tous les enseignants au département de Génie Electrique.

A ma promotion de Master Automatique et informatique
industrielle A tous les amis d'études surtout ceux de génie
électrique promotion.

Kennat Mohammed

Table des matières

Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralités sur les systèmes hydrauliques	
I.1 Introduction	3
I.2 Systèmes hydrauliques	3
I.2.1 Energie hydraulique	3
I.2.2 Historique	3
I.2.3 Applications typiques de l'hydraulique	5
I.3 Fluide hydraulique	5
I.3.1 Définition	5
I.3.1.1 Fluide	5
I.3.1.2 Débit	6
I.3.2 Expression du débit en fonction de la vitesse v	6
I.3.3 Écoulement d'un liquide contenu dans un réservoir	7
I.4 Description les systèmes hydrauliques à trois réservoirs	8
I.4.1 Système hydraulique à trois réservoirs non interactifs	8
I.4.2 Système hydraulique à trois réservoirs interactifs 1 ^{er} cas	9
I.4.3 Système hydraulique à trois réservoirs interactifs 2 ^{ème} cas	9
I.4.4 Système hydraulique à trois réservoirs interactifs 3 ^{ème} cas	10
I.5 conclusion	10
Chapitre II : Modélisation de système hydraulique à trois réservoirs	
II.1 Introduction	11
II.2 Modélisation des systèmes hydrauliques	11
II.2.1 Différentes formes de modélisation	11
II.2.2 Modélisation d'un système de premier ordre-niveau d'un réservoir	12
II.2.2.1 Modélisation mathématique à l'écoulement non linéaire.....	13
II.2.2.2 Modélisation mathématique à l'écoulement linéaire	15
II.2.2.3 Résultat de simulation en boucle fermé du système de premier ordre	16

II.2.3 Modélisation des systèmes hydrauliques à trois réservoirs non interactifs	17
II.2.3.1 Modélisation mathématique à l'écoulement non linéaire	18
II.2.3.2 Modélisation mathématique à l'écoulement linéaire	20
II.2.3.2.1 Représentation par équation différentielle	20
II.2.3.2.2 Représentation par une fonction de transfert	21
II.2.3.2.3 Représentation par un modèle d'état	22
II.2.3.3 Résultat de simulation en boucle ouverte du système à trois réservoirs.....	25
II.3 conclusion	27
Chapitre III : Commande d'un système à trois réservoirs non-interactif par un régulateur PID	
III.1 Introduction	28
III.2 Correcteur PID.....	28
III.3 Méthodes de réglage du contrôleur PID	31
III.4 Application de la commande PID sur le système à trois niveaux de réservoir	32
III.4.1 Contrôle par la méthode d'oscillation : Ziegler-Nichols	32
III.4.2 Contrôle par la méthode Cohen et Coon modifiée	36
III.4.3 Critères minimaux d'erreur (IAE, ISE, ITAE)	40
III.4 Conclusion.....	45
Conclusion Générale.....	46


Liste des figures

Figure I.1 : Bateau musical Al-Jazari	4
Figure I. 2 : La machine de Marly	4
Figure I. 3 : Le fontainier CLAUDE DENIS	4
Figure I.4: schéma représentant les variables entrant de Torricelli.....	7
Figure I. 5 : Système à trois réservoirs non interactifs.....	8
Figure I. 6: Système à trois réservoirs interactifs (1ercas).....	9
Figure I. 7: Système à trois réservoirs interactifs (2èmecas).	9
Figure I. 8: Système à trois réservoirs interactifs (3èmecas).	10
Figure II.1: Les différentes formes de représentation de système Erreur ! Signet non défini.	
Figure II.2: Schéma du système de contrôle du niveau de liquide	12
Figure II.3: Schéma Simulink du modèle non linéaire en boucle fermé.....	16
Figure II.4: Réponse en boucle fermé du modèle non linéaire du système hydraulique.....	17
Figure II.5: Système à trois réservoirs non interactifs.	17
Figure II.6: Système à trois réservoirs.	20
Figure II.7: Schéma bloc de la représentation d'état.	23
Figure II.8 : Schéma Simulink du modèle non linéaire en boucle ouverte.	26
Figure II.9: Réponse en boucle ouverte du modèle non linéaire du système hydraulique.....	27
Figure III.1: Schéma de fonctionnement du régulateur PID.....	29
Figure III.2: Action Proportionnelles.....	30
Figure III.3: Action Intégrale.....	30
Figure III.4: Action Dérivée.	30

Figure III.5: Système sous étude : Ziegler-Nichols	32
Figure III.6: Réponse d'un système : Ziegler-Nichols	33
Figure III.7: Schéma Simulink du modèle par la méthode Ziegler-Nichols.....	35
Figure III.8: Réponse de P, PI, et PID contrôleur de système à trois réservoirs non-interactif par ZN	35
Figure III.9: Réponse d'un système : Cohen Coon modifiée.	37
Figure III.10: Réponse de fonction de transfert du système de trois réservoirs.....	38
Figure III.11: Réponse de P, PI, et PID contrôleur de système à trois réservoirs non-interactif par Cohen Coon modifiée.....	39
Figure III.12: Simulink model du system a trois réservoirs	42
Figure III.13: Réponse de PI contrôleur de système à trois réservoirs non- interactif par IAE, ISE.ITAE et Z-NICHOLS méthode	43
Figure III.14: Réponse de PID contrôleur de système à trois réservoirs non- interactif par IAE, ISE.ITAE et Z-NICHOLS méthode	44

Liste des tableaux

Tableau I.1 Applications typiques de l'hydraulique.	5
Tableau II.1: Les paramètres du système hydraulique	16
Tableau II.2 : Les paramètres du système hydraulique à trois réservoirs.....	25
Tableau III.1: Paramètres de réglage de la méthode en boucle fermée Ziegler-Nichols.	33
Tableau III.2: Paramètres P, PI, PID de la méthode Ziegler-Nichols	34
Tableau III.3: Comparaison des performances du processus en P, PI et PID à l'aide de la méthode Z-N.....	36
Tableau III.4: Paramètres de réglage de la méthode Cohen Coon modifiée.	37
Tableau III.5: Paramètres P, PI, PID de la méthode Cohen Coon modifiée	38
Tableau III.6: Comparaison des performances du processus en P, PI et PID à l'aide de la méthode Cohen Coon modifiée	39
Tableau III.7: Les paramètres du contrôleur PI en boucle fermée conçus à partir de différents indices de performance.....	42
Tableau III.8: Comparaison des performances du processus en PI par IAE, ISE.ITAE et Z-NICHOLS	43
Tableau III.10: Comparaison des performances du processus en PID par IAE, ISE.ITAE et Z-NICHOLS méthodes.....	45



***Introduction
générale***

Introduction Générale

Dans les industries des nombreuses de transformation telle que les industries pétrochimiques., industries de Fabrication de papier et les industries de traitement des eaux utilisant le système de réservoir pour contrôler le niveau du liquide , Le niveau de liquide doit être commandé par le contrôleur Correspondant. L'objectif du régulateur dans le contrôle de niveau est de maintenir un point de consigne niveau à une valeur donnée et être en mesure d'accepter nouveau point de consigne.

La régulation de niveau de liquide dans les systèmes hydrauliques à trois réservoirs est un problème classique de la régulation industrielle. De nos jours, les industries de transformation telles que les industries pétrochimiques, 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 essentiel dans les industries de transformation. [1][2].

Dans la conception d'un système de régulation, on utilise généralement un modèle mathématique complexe. Il existe de nombreuses stratégies et méthodes de régulation et de commande du niveau de liquide dans les systèmes à trois réservoirs. , parmi lesquelles on peut citer : la commande optimale, la commande non-linéaire et les régulateurs PID.

L'objectif de ce travail est d'introduire et d'évaluer la technique de contrôle d'un circuit hydraulique à trois réservoirs muni d'un contrôleur PID.

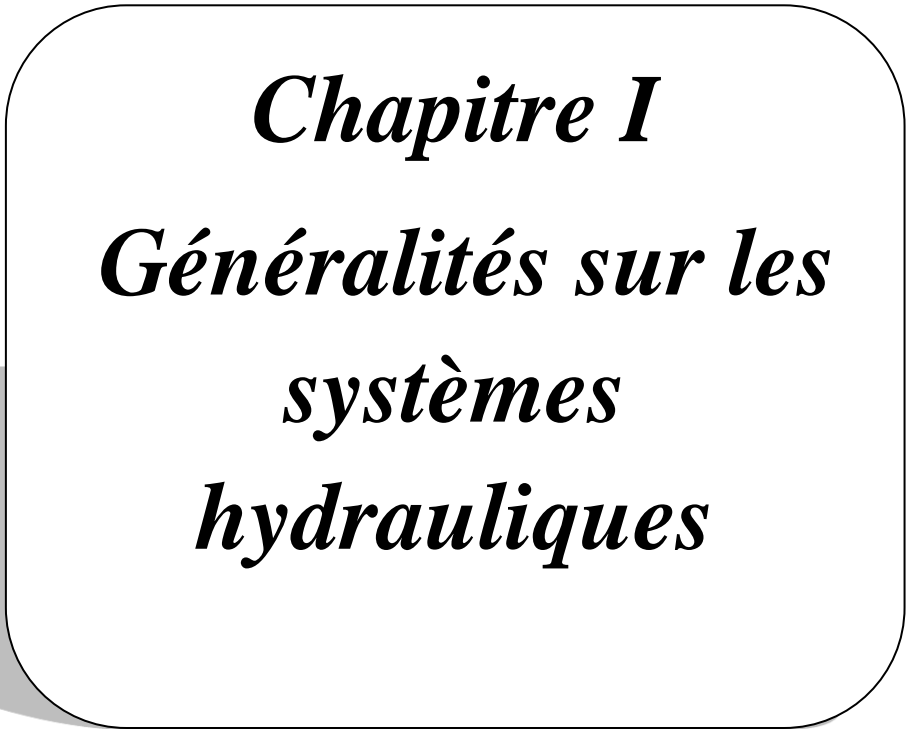
Ce travail est organisé comme suit :

Le premier chapitre donne une vue d'ensemble des systèmes hydrauliques et décrit les systèmes hydrauliques à trois réservoirs.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation d'un système hydraulique à trois réservoirs. Il présente un test de simulation du modèle non linéaire avec **MATLAB-SIMULINK**.

Le troisième chapitre est l'objet de la commande par le contrôleur PID. Les résultats de la simulation numérique obtenus montrent l'efficacité de la technique utilisée ainsi que ses performances.

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



Chapitre I
Généralités sur les
systèmes
hydrauliques

I.1 Introduction :

Dans le domaine industriel, il existe de nombreuses options pour faire fonctionner différentes machines et permettre tout travail à faire, Le système hydraulique est utilisé beaucoup dans le domaine industriel tel que le domaine énergétique avec les centrales, le domaine mécanique avec les vérins ou encore le domaine du stockage avec les réservoirs. Ces domaines sont les plus utilisés et les plus demandés car ils continuent à augmenter et à s'améliorer [3].

Dans ce chapitre, nous allons présenter des systèmes hydrauliques et les domaines d'application typiques de ces systèmes. En particulier, nous donnons une description du système hydraulique à trois réservoirs.

I.2 Systèmes hydrauliques :

I 2.1 Energie hydraulique :

L'origine de mots hydraulique est issue de la grec que (**HYDRAULIKOS**) ce sont deux mots (**HYDOR**) qui signifie l'eau et (**AULOS**) c'est à dire pipe [4].

Différentes formes d'énergie sont utilisées en hydraulique :

- L'énergie potentielle (par gravité), comme un château d'eau.
- L'énergie cinétique (par vitesse), comme une turbine hydroélectrique.
- L'énergie par pression. C'est cette forme d'énergie qui est utilisée dans les systèmes hydrauliques industriels et mobiles [5].

I 2.2 Historique :

Le premier système, créé par **Al-Jazari** au **XIIe** siècle, ce système est une expression d'un automate musical, qui était un bateau avec quatre musiciens automatiques qui flottaient sur un lac pour divertir les invités lors de soirées [6] ; le mécanisme de ce système est composé d'un liquide de trois réservoirs. Après ça le fontainier **CLAUDE DENIS**, C'est une pompe à proximité de l'étang de **CLAGNY** actionnée par un cheval. Créé par **CLAUDE DENIS** dans les années 1639, Ce système a été témoin de nombreux développements. À partir du dix-septième siècle les scientifiques ont essayé d'imaginer un machine pour amener l'eau de la **SEINE** jusqu'à **VERSAILLES**, C'est ce qu'il a confirmé **LE GENTHOMME AMOLD de VILLE** et **LE CHARPENTIER RENNEQUIN SUALEM** par construire un moulin **BALFOUR**, appelé la machine de **MARLY**, qui date de 1680. Et dans l'année 1817 a

été remplacée la machine de MARLY par une machine à vapeur conçue par CECILE et MARTN. Et à partir de Le vingtième siècle les ingénieurs Créer un système avec une pompe fonctionne avec du fluide [7]



Figure I.1 bateau musical Al-Jazari [6]



Figure I.2 le fontainier CLAUDE DENIS [8]

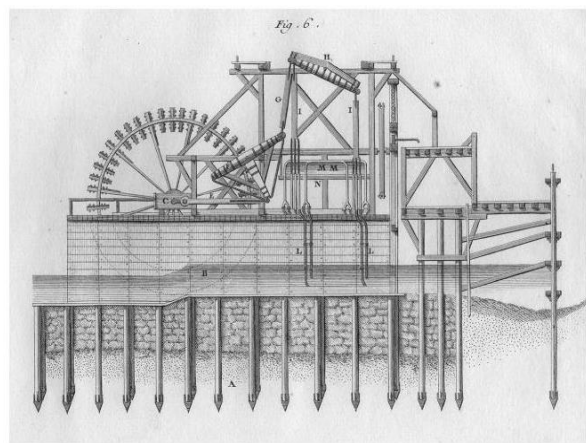


Figure I.3 la machine de Marly [9]

I.2.2 Applications typiques de l'hydraulique :

Hydraulique industrielle	<ul style="list-style-type: none"> • Machines-outils • Machines de transformation des plastiques • Centrales électriques et nucléaires
Hydraulique mobile	<ul style="list-style-type: none"> • Excavateurs et grues • Machines de construction, agricoles et forestières • Véhicules automobiles, véhicules utilitaires et sur rails
Hydraulique de construction navale	<ul style="list-style-type: none"> • Réglages du gouvernail • Grues de bord • Sabords de charge
Hydraulique offshore	<ul style="list-style-type: none"> • Dameuses hydrauliques • Fraiseuses de sol • Equilibrage maritime
Constructions hydrauliques en acier	<ul style="list-style-type: none"> • Equilibrage maritime • Actionnement de ponts • Plateformes élévatrices de bateaux
Technique spéciale	<ul style="list-style-type: none"> • Techniques robotique et de manipulation • Actionnements d'antennes
Hydraulique dans l'aviation	Dépend des conditions particulières du service aérien (servosoupapes)

Tableau I.1 Applications typiques de l'hydraulique. [10]

I.3 Fluide hydraulique :

Dans les installations industrielles, l'hydraulique est la transmission et le contrôle des forces par un liquide (huile hydraulique).

I.3.1 Définition :**I.3.1.1 Fluide :**

Un fluide hydraulique (ou huile hydraulique) est un liquide utilisé comme moyen de transmission de puissance dans un système hydraulique.

Les fluides sont classés en deux groupes :

- ✓ **Les liquides** : Très peu compressibles ce qui explique leur utilisation en hydraulique pour des pressions élevées.
- ✓ **Les gaz** : Très compressibles donc ce sont des mauvais transporteurs d'énergie.

I.3.1.2 Débit :

Le débit est le quotient de la quantité de fluide qui traverse une section droite de la conduite par la durée de cet écoulement [11].

Le débit est classé en deux groupes :

✓ Débit-masse :

Si Δm est la masse de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le temps Δt , par définition le débit-masse est : unité : $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$

$$q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (\text{I. 1})$$

✓ Débit-volume :

Si ΔV est le volume de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le temps Δt , par définition le débit-volume est : unité : $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

$$q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (\text{I. 2})$$

Relation entre q_m et q_v :

La masse volumique est donnée par la relation :

$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta v} \quad \text{D'ou} \quad q_m = \rho q_v \quad (\text{I. 3})$$

I.3.2 Expression du débit en fonction de la vitesse v :

Le débit-volume est aussi la quantité de liquide occupant un volume cylindrique de base S et de longueur égale à v , correspondant à la longueur du trajet effectué pendant l'unité de temps, par une particule de fluide traversant S . [11]

Il en résulte la relation importante :

$$q_v = v S \quad (\text{I. 4})$$

I.3.3 Écoulement d'un liquide contenu dans un réservoir - Théorème de Torricelli

Considérons un réservoir muni d'un petit orifice à sa base, de section S . Figure I.4 Pour déterminer la vitesse v_A de sortie on utilise la relation de Bernoulli qui nous permet d'écrire pour un point S_B situé à la surface du liquide de réservoir et un point S_A situé à la sortie de réservoir.

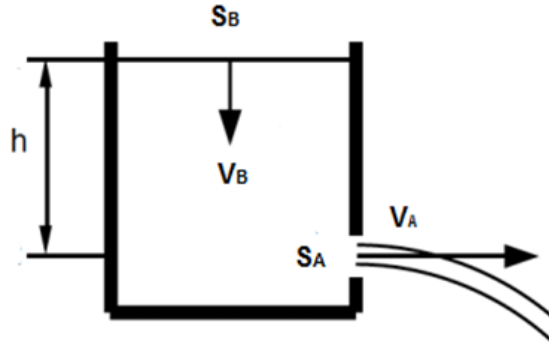


Figure I.4 schéma représentant les variables entrant de Torricelli.

L'équation suivante :

$$P_A + \rho \frac{v_A^2}{2} + \rho g h_1 = P_B + \rho \frac{v_B^2}{2} + \rho g h_2 \quad (I.5)$$

ρ C'est la masse volumique de l'eau.

g Est la constante de gravitation.

$P_A; P_B$ est la pression.

Le niveau de liquide $h = h_2 - h_1$

Si on considère que $v_B = 0$, alors. De plus, la pression $P_A = P_{atm}$ (pression atmosphérique) et la pression $P_B = P_{atm}$. Ainsi, on obtient :

$$P_{atm} + \rho \frac{v_A^2}{2} + \rho g h_1 = P_{atm} + \rho g h_2 \quad (I.6)$$

$$\rho \frac{v_A^2}{2} = \rho g (h_2 - h_1) \quad (I.7)$$

On trouve alors la formule de Torricelli :

$$v_A = \sqrt{2gh} \quad (I.8)$$

I.4 Description les systèmes hydrauliques à trois réservoirs :

Le système de trois réservoirs est un système de laboratoire largement utilisé dans la théorie du contrôle de niveau du liquide.

Pour les systèmes hydrauliques à trois réservoirs, on a deux configurations différentes, système hydraulique à trois réservoirs interactif et non interactif.

I.4.1 Système hydraulique à trois réservoirs non interactifs :

La figure ci-dessous montre un système à trois réservoirs non interactifs :

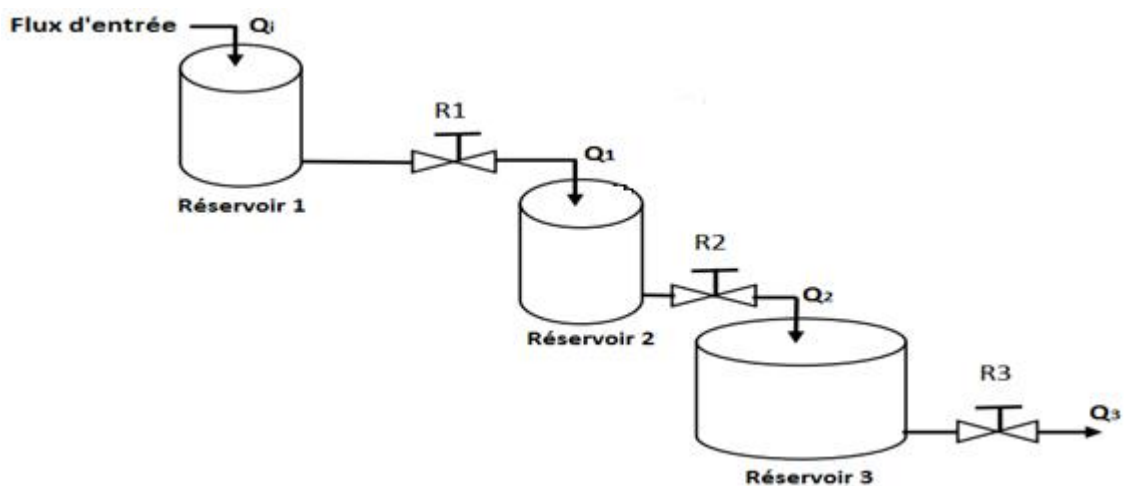


Figure I.5 Système à trois réservoirs non interactifs.

Q_i Est le débit d'entrée dans le premier réservoir(m^3/s).

Q_1 Est le débit de sortie du premier réservoir(m^3/s).

Q_2 Est le débit de sortie du deuxième réservoir(m^3/s).

Q_3 Est le débit de sortie du troisième réservoir(m^3/s).

R_1 Est la résistance du débit de sortie du premier réservoir($m/m^3/s$)

R_2 Est la résistance du débit de sortie du deuxième réservoir($m/m^3/s$)

R_3 Est la résistance du débit de sortie du troisième réservoir($m/m^3/s$)

Dans ce système, le flux de sortie du premier réservoir est le flux d'entrée du deuxième réservoir et le flux de sortie du deuxième réservoir est le flux d'entrée du troisième réservoir.

I.4.2 Système hydraulique à trois réservoirs interactifs 1^{er} cas :

Le système d'interaction des trois réservoirs est représenté à la Figure I.6. L'interaction de ce produit en raison du couplage entre deux réservoirs [12] et la figure indique que les réservoirs 1, 2 et 3 sont interconnectés. Le débit de sortie du réservoir 1 interagit avec le réservoir 2 et le débit de sortie du réservoir 2 interagit avec le réservoir 3.

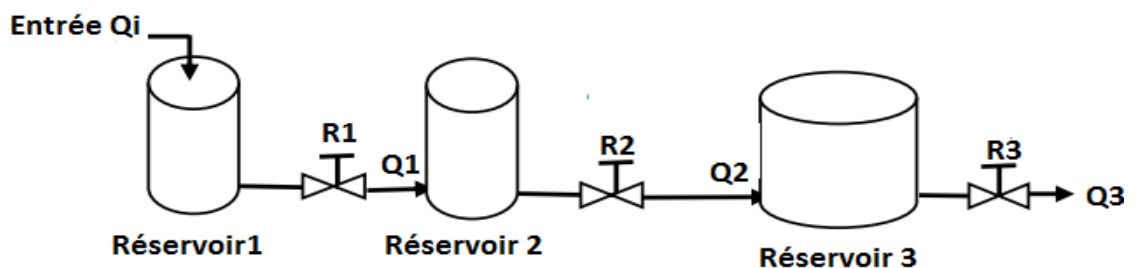


Figure I.6 Système à trois réservoirs interactifs (1^{er} cas).

I.4.3 Système hydraulique à trois réservoirs interactifs 2^{ème} cas :

La combinaison du système de trois réservoirs interactif et non interactif est montrée dans Figure I.7. Il montre le réservoir 1 est en contact avec le réservoir 2 et le réservoir 3 ne pas en contact avec le réservoir 2.

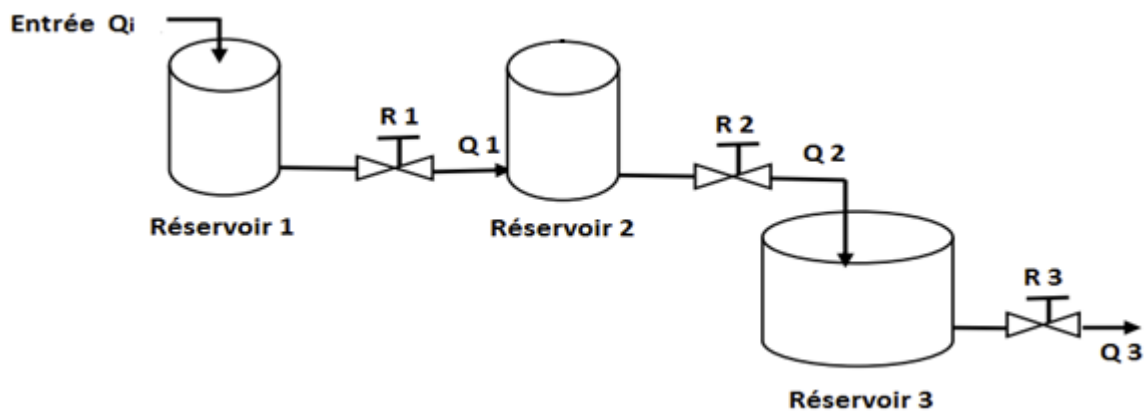


Figure I.7 Système à trois réservoirs interactifs (2^{ème} cas).

I.4.4 Système hydraulique à trois réservoirs interactifs 3^{ème} cas :

La figure I.8 montre la combinaison de trois systèmes de réservoirs interactifs et non interactifs, le réservoir 1 ne pas en contact avec le réservoir 2 et le réservoir 2 est en contact avec le réservoir 3.

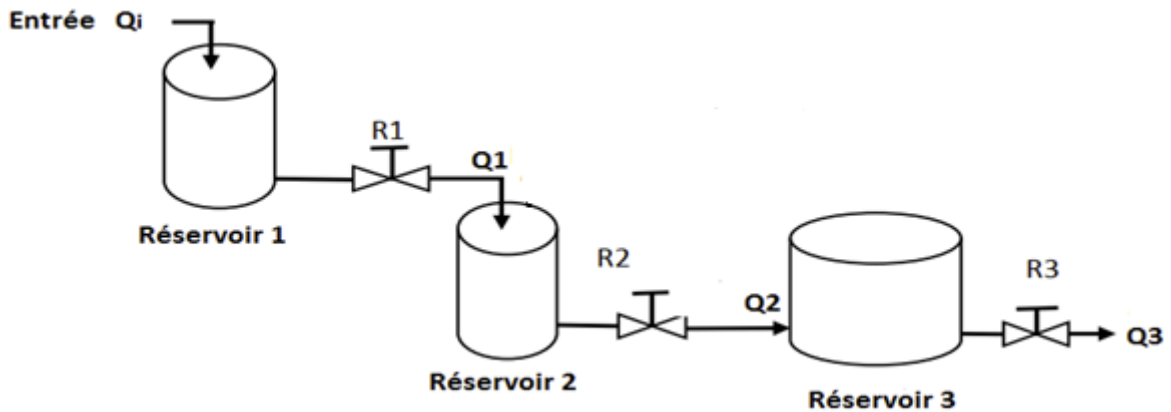


Figure I.8 Système à trois réservoirs interactifs (3^{ème} cas).

I.5 conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les systèmes hydrauliques ainsi que les domaines d'application typiques de ce système. Une description générale du système hydraulique à trois réservoirs est donnée. Dans le chapitre suivant on va faire une modélisation du système hydraulique à trois réservoirs non interactifs à l'écoulement linéaire et non linéaire avec un test de simulation.

Chapitre II

Modélisation de système hydraulique à trois réservoirs

II.1 Introduction :

Les réservoirs à niveau de liquide sont utilisés dans l'industrie chimique pour maintenir le niveau de liquide à un certain point ou entre des valeurs particulières.

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

Dans ce chapitre, nous allons présenter la modélisation du système hydraulique à trois réservoirs en utilisant les lois de la physique et, en particulier, la loi de Bernoulli. Un test de simulation du modèle non linéaire avec **MATLAB-SIMULINK**.

II.2 Modélisation des systèmes hydrauliques :

II.2.1 Différentes formes de modélisation :

Tous les systèmes peuvent être représentés de plusieurs manières comme le montre le schéma suivant :

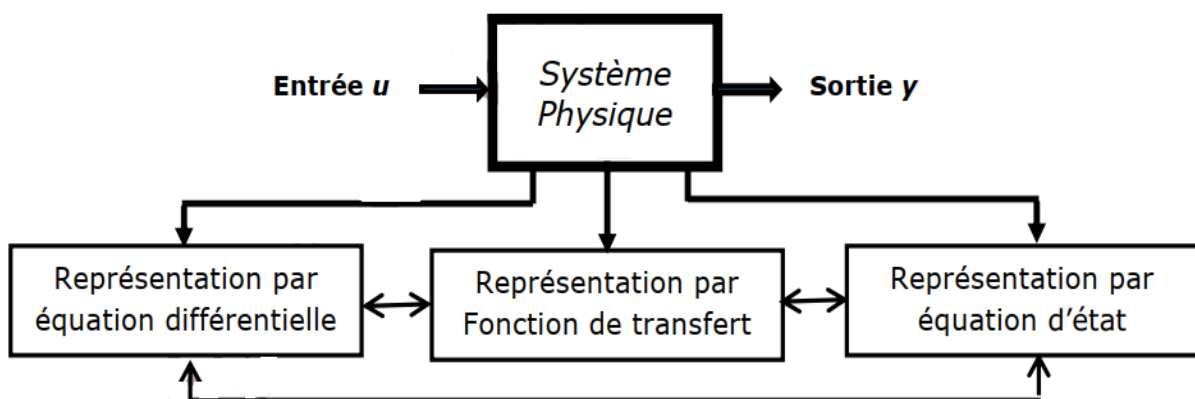


Figure II.1 Différentes formes de représentation de système.

II.2.2 Modélisation d'un système de premier ordre-niveau d'un réservoir :

Ce système se compose d'un réservoir avec une vanne d'entrée (de contrôle) et Vane de sortie (charge) et représente un système de contrôle à entré unique à sortie unique (SISO) Figure II.2. [13]

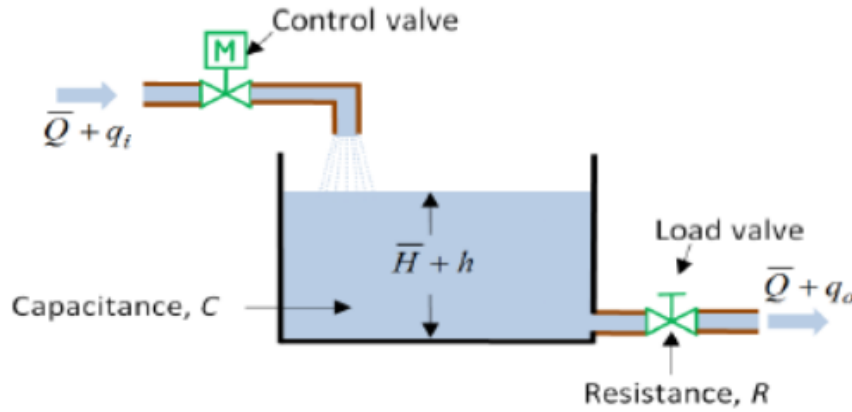


Figure II.2 Schéma du système de contrôle du niveau de liquide.

\bar{H} Réservoir en état constant (avant tout changement), **m**.

h Légère variation de la capacité du réservoir par rapport à la valeur d'état fixe, **m**

\bar{Q} Débit en régime permanent (avant tout changement)(**m³/s**).

qi Faible écart du taux d'entrée par rapport à sa valeur à l'état stable(**m³/s**).

qo Faible déviation du débit de sortie par rapport à sa valeur d'état stable(**m³/s**).

✓ Capacité de système à niveau de liquide :

La capacité d'un réservoir est définie comme étant le changement dans la quantité de liquide stockée nécessaire pour provoquer un changement d'unité dans le potentiel (tête). Le potentiel (tête) est la quantité qui inclut le niveau d'énergie du système.

$$\frac{\text{changement de liquide stocké, } m^3}{\text{changer en tête, } m}$$

La capacitance (C) est une zone de section transversale(A) du réservoir.

Taux de changement du volume de fluide dans le réservoir = flow in – flow out [14].

$$\frac{dV}{dt} = q_i - q_o \quad (\text{II. 1})$$

Puisque le volume est [surface(A) x hauteurs (h)]

$$\frac{d(A \times h)}{dt} = q_i - q_o \quad (\text{II. 2})$$

$$A \frac{dh}{dt} = q_i - q_o \quad (\text{II. 3})$$

II.2.2.1 Modélisation mathématique à l'écoulement non linéaire :

On a :

Le débit de sortie q_0 au niveau de la valve est donné par :

$$Q_0 = S_{max} a_0 v_A \quad (\text{II. 4})$$

Où

S_{max} c'est la section maximale de passage du liquide dans la valve A.

a_0 Est le coefficient de décharge de la valve A.

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

$$v_A = \sqrt{2gh} \quad (\text{II. 5})$$

Donc :

$$Q_0 = S_{max} a_0 \sqrt{2gh} \quad (\text{II. 6})$$

En suppose:

$$S_{max} a_0 \sqrt{2g} = C \quad (\text{II. 7})$$

$$Q_0 = C\sqrt{h} \quad (\text{II. 8})$$

Alors :

$$A \frac{dh}{dt} = q_i - C\sqrt{h} \quad (\text{II. 9})$$

$$q_i - C\sqrt{h} = A \frac{dh(t)}{dt} \Rightarrow \text{Impossible d'utiliser les transformées des Laplace.} \quad (\text{II. 10})$$

Pour linéarité hauteur de h_s en utilisant l'expression de Taylor :

$$q_0 = q_0(h_s) + q'_0(h_s)(h - h_s) + \frac{q''_0(h_s)(h - h_s)^2}{2!} + \dots \quad (\text{II. 11})$$

$$q_0 \approx q_0(h_s) + q'_0(h_s)(h - h_s) \quad (\text{II. 12})$$

Donc :

$$q_0 \approx C\sqrt{h_s} + \frac{C}{2\sqrt{h_s}}(h - h_s) \quad (\text{II. 13})$$

Remplacer l'équation (II. 13) dans l'équation (II. 9);

$$q_i - C\sqrt{h_s} - \frac{C}{2\sqrt{h_s}}(h - h_s) = A \frac{dh}{dt} \quad (\text{II. 14})$$

On a :

$$\text{Variables de déviation :} \quad Q = q_i - q_s \quad \text{et} \quad H = h - h_s \quad (\text{II. 15})$$

$$\text{Régime stationnaire :} \quad q_s - C\sqrt{h_s} = 0 \Rightarrow q_s = C\sqrt{h_s} \quad (\text{II. 16})$$

Remplacer les équations (II. 15) et (II. 16) dans l'équation (II. 14);

$$Q + q_s - C\sqrt{h_s} - \frac{C}{2\sqrt{h_s}}(H + h_s - h_s) = A \frac{d[H+h_s]}{dt} \quad (\text{II. 17})$$

$$Q - \frac{C}{2\sqrt{h_s}}H = A \frac{dh}{dt} \quad (\text{II. 18})$$

Avec la transformation de Laplace :

$$Q(s) - \frac{C}{2\sqrt{h_s}}H(s) = AsH(s) \quad (\text{II. 19})$$

La fonction de Transfert est :

$$\frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{1}{As + \frac{C}{2\sqrt{h_s}}} = \frac{\frac{2\sqrt{h_s}}{C}}{\frac{2A\sqrt{h_s}}{C}s + 1} = \frac{R}{\tau s + 1} \quad (\text{II. 20})$$

$$= \frac{2\sqrt{h_s}}{C} \text{ et } \tau = AR \quad (\text{II. 21})$$

II.2.2.2 Modélisation mathématique à l'écoulement linéaire :

- ✓ **Résistance du système de niveau de liquide** : est un le flux du liquide dans une telle ligne ou restriction est définie comme le changement de différence de niveau à un changement de débit unitaire ;

$$\text{Resistance} = \frac{\text{changement de niveau (m)}}{\text{changement de débit} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)} \quad (\text{II. 22})$$

$$R = \frac{dH}{dQ} = \frac{h}{q_0} \quad (\text{II. 23})$$

Avec l'équation (I. 2) on a :

$$q_0 = \frac{h}{R} \quad (\text{II. 24})$$

Donc :

$$A \frac{dh}{dt} = q_i - q_0 \quad (\text{II. 25})$$

Remplacer l'équation (II. 24) dans l'équation (II. 25);

$$A \frac{dh}{dt} = q_i - \frac{h}{R} \quad (\text{II. 26})$$

On multiplie l'équation(II. 26) par R, il devient :

$$RA \frac{dh}{dt} + h = Rq_i \quad (\text{II. 27})$$

Avec la transformation de Laplace :

$$RA s H(s) + H(s) = RQ_i(s) \quad (\text{II. 28})$$

La fonction de Transfert est :

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{R}{(RA s + 1)} = \frac{R}{(\tau s + 1)} \quad (\text{II. 29})$$

$$\tau = AR \quad (\text{II. 30})$$

II.2.2.3 Résultats de simulation en boucle fermée du système de premier ordre :

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation en boucle fermée du système hydraulique de premier ordre. Ces résultats ont été obtenus en représentant le modèle dynamique non linéaire du système hydraulique d'un réservoir dans Simulink (Figure .II.3).

Le modèle dynamique représenté par :
$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{A} q_i - \frac{C}{A} \sqrt{h} \quad (\text{II. 31})$$

$$C = S_{max} a_0 \sqrt{2g} \quad (\text{II. 32})$$

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

Tableau II.1 Les paramètres du système hydraulique.

Section du chaque réservoir $A_1 = A_2 = A_3$	0.5 m ²
Section maximale de passage du liquide dans la valve S_{max}	0.0003 m ²
Coefficient de décharge $a_1 ; a_2 ; a_3$	1 ; 0.7 ; 0.5
Gain de débit d'entrée Kq_i	0.003 m ³ /sv

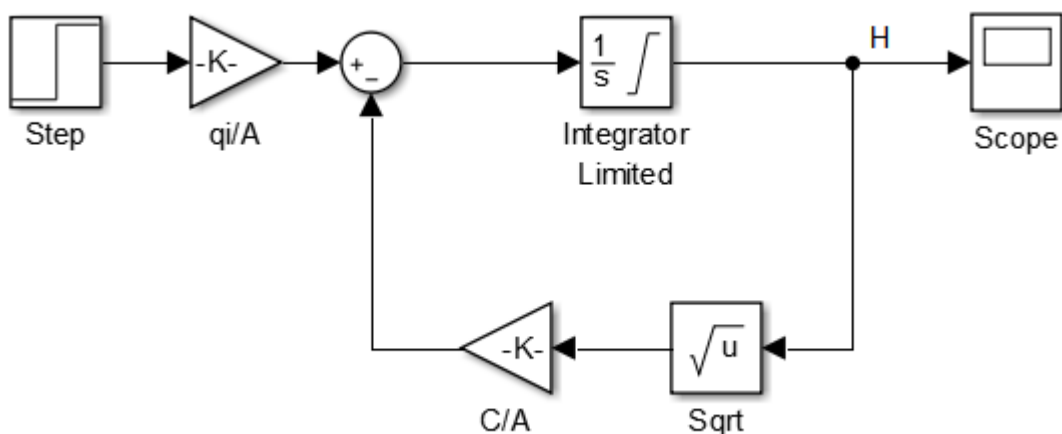


Figure II.3 Schéma Simulink du modèle non linéaire en boucle fermée.

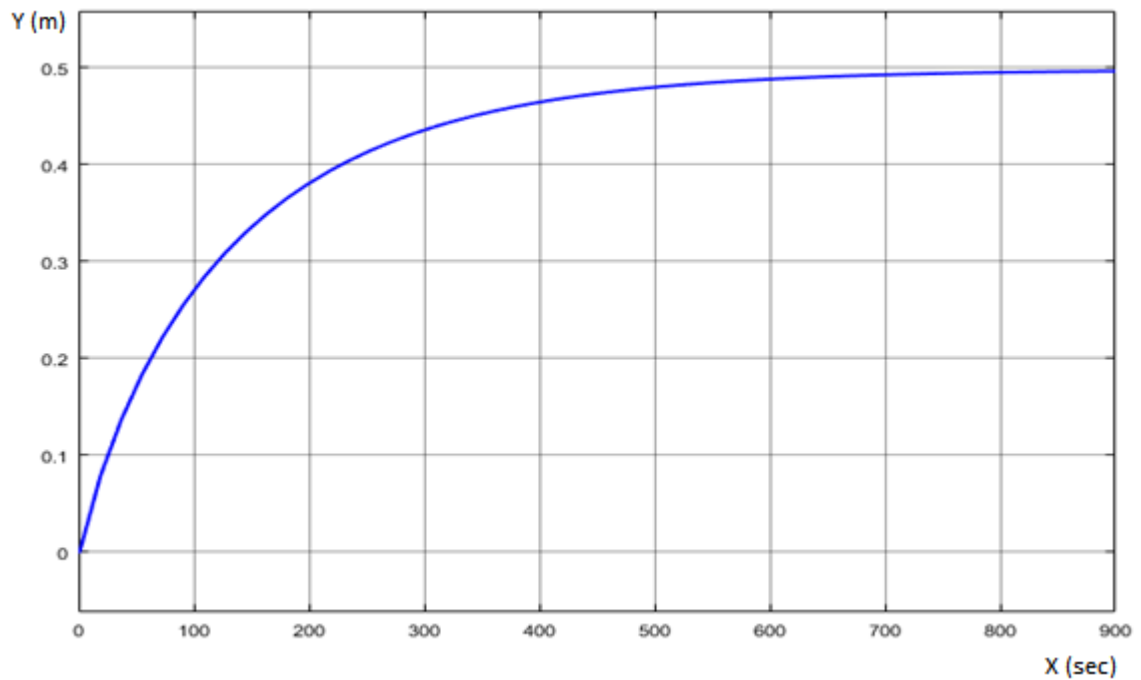


Figure II.4 Réponse en boucle fermée du modèle non linéaire du système hydraulique.

II.2.3 Modélisation des systèmes hydrauliques à trois réservoirs non interactifs :

Les réservoirs de ce système ne sont pas connectés entre elles. Donc il est appelé système non-interactif, Dans ce type de Système, un réservoir n’affecte pas le fonctionnement de l’autre réservoir. Le processus présenté dans la Figure II.5 est un procédé à trois réservoirs non perméables dans lequel le débit d’entrée du liquide est pompé vers le réservoir 1. Le débit de sortie du réservoir 1 ne réagit pas avec le réservoir 2 et le réservoir 2 est également connecté avec réservoir 3 de la même manière.

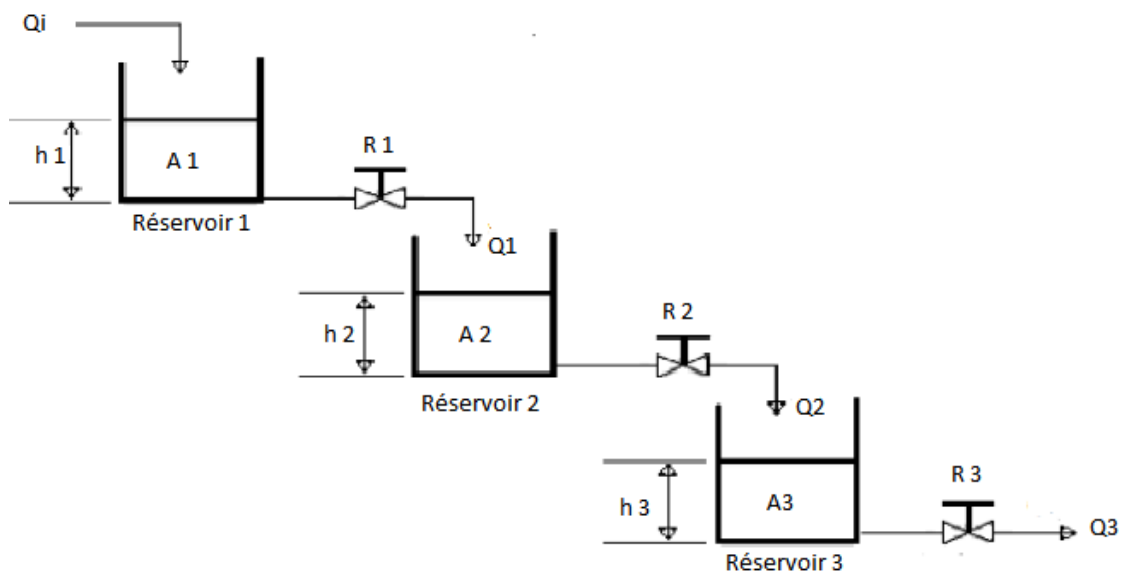


Figure II.5 Système à trois réservoirs non interactifs.

II.2.3.1 Modélisation mathématique à l'écoulement non linéaire :

En utilisant le principe de conservation de masse ou l'équation de continuité, le volume du liquide $V_1 = A_1 h_1$ dans le premier réservoir est donné par :

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{d(A_1 h_1)}{dt} = Q_i - Q_1 \Rightarrow A_1 \frac{dh_1}{dt} = Q_i - Q_1 \quad (\text{II. 33})$$

$$\text{On a :} \quad Q_1 = S_{max} a_1 v_{r1} \quad \text{et} \quad v_{r1} = \sqrt{2g h_1} \quad (\text{II. 34})$$

$$\text{Donc :} \quad \frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{A_1} (Q_i - S_{max} a_1 \sqrt{2g h_1}) \quad (\text{II. 35})$$

Où,

Q_i Est le débit d'entrée dans le premier réservoir (m^3/s).

Q_1 Est le débit de sortie du premier réservoir (m^3/s).

H_1 Est le niveau de liquide réel dans le premier réservoir (m).

A_1 Est la zone du premier réservoir (m^2).

S_{max} C'est la section maximale de passage du liquide dans la valve de résistance R_1 .

a_0 Est le coefficient de décharge de la valve de résistance R_1 .

v_{r1} Est la vitesse d'écoulement au niveau de l'orifice de la valve de résistance R_1 .

g Est la constante de gravitation.

- Pour le deuxième réservoir, le volume du liquide $V_2 = A_2 h_2$, il est régi par :

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{d(A_2 h_2)}{dt} = Q_1 - Q_2 \Rightarrow A_2 \frac{dh_2}{dt} = Q_1 - Q_2 \quad (\text{II. 36})$$

$$\text{On a :} \quad Q_2 = S_{max} a_2 v_{r2} \quad \text{et} \quad v_{r2} = \sqrt{2g h_2} \quad (\text{II. 37})$$

$$\text{Donc :} \quad \frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A_2} (S_{max} a_1 \sqrt{2g h_1} - S_{max} a_2 \sqrt{2g h_2}) \quad (\text{II. 38})$$

Où,

Q_1 Le flux de sortie du premier réservoir est le flux d'entrée du deuxième réservoir(m^3/s).

Q_2 Est le débit de sortie du deuxième réservoir(m^3/s).

R_2 Est la résistance du débit de sortie du deuxième réservoir($m/m^3/s$)

A_2 Est la zone du deuxième réservoir(m^2).

H_2 Est le niveau de liquide réel dans le deuxième réservoir(m).

a_2 Est le coefficient de décharge de la valve de résistance R_2 .

v_{r2} La vitesse d'écoulement au niveau de l'orifice de la valve de résistance R_2 .

- Pour le troisième réservoir, le volume du liquide $V_3 = Ah_3$, il est régi par :

$$\frac{dV_3}{dt} = \frac{d(A_3h_3)}{dt} = Q_2 - Q_3 \Rightarrow A_3 \frac{dh_3}{dt} = Q_2 - Q_3 \quad (\text{II. 39})$$

On a :

$$Q_3 = S_{max}a_3v_{r3} \quad \text{et} \quad v_{r3} = \sqrt{2g h_3} \quad (\text{II. 40})$$

Donc :

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{1}{A_3} (S_{max}a_2\sqrt{2g h_2} - S_{max}a_3\sqrt{2g h_3}) \quad (\text{II. 41})$$

Où,

Q_2 Est le flux de sortie du deuxième réservoir est le flux d'entrée du troisième réservoir(m^3/s).

Q_3 Est le débit de sortie du troisième réservoir(m^3/s).

R_3 Est la résistance du débit de sortie du troisième réservoir($m/m^3/s$).

A_3 Est la zone du troisième réservoir(m^2).

H_2 Est le niveau de liquide réel dans le deuxième réservoir(m).

a_3 Est le coefficient de décharge de la valve de résistance R_3 .

v_{r3} Est la vitesse d'écoulement au niveau de l'orifice de la valve de résistance R_3 .

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

$$\frac{dh(t)}{dt} = F(h, q_i) \quad (\text{II. 42})$$

$$\begin{pmatrix} \frac{dh_1}{dt} \\ \frac{dh_2}{dt} \\ \frac{dh_3}{dt} \end{pmatrix} = f(h(t), q_i(t)) = \begin{pmatrix} \frac{1}{A_1} (Q_i - S_{max} a_1 \sqrt{2g h_1}) \\ \frac{1}{A_2} (S_{max} a_1 \sqrt{2g h_1} - S_{max} a_2 \sqrt{2g h_2}) \\ \frac{1}{A_3} (S_{max} a_2 \sqrt{2g h_2} - S_{max} a_3 \sqrt{2g h_3}) \end{pmatrix} \quad (\text{II. 43})$$

La sortie du système est :
$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = g(h(t), q_i(t)) = \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{pmatrix} \quad (\text{II. 44})$$

II.2.3.2 Modélisation mathématique à l'écoulement linéaire :

II.2.3.2.1 Représentation par équation différentielle :

En utilisant l'équation d'équilibre d'écoulement, pour les trois réservoirs, on obtient

$$\begin{cases} \frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{A_1} (Q_i - Q_1) \\ \frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A_2} (Q_1 - Q_2) \\ \frac{dh_3}{dt} = \frac{1}{A_3} (Q_2 - Q_3) \end{cases} \quad (\text{II. 45})$$

On a Les débits de sortie de chaque réservoir donne par :

$$Q_1 = \frac{H_1}{R_1} \quad ; \quad Q_2 = \frac{H_2}{R_2} \quad ; \quad Q_3 = \frac{H_3}{R_3} \quad (\text{II. 46})$$

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

$$\begin{cases} \frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{A} \left(Q_i - \frac{H_1}{R_1} \right) \\ \frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A} \left(\frac{H_1}{R_1} - \frac{H_2}{R_2} \right) \\ \frac{dh_3}{dt} = \frac{1}{A} \left(\frac{H_2}{R_2} - \frac{H_3}{R_3} \right) \end{cases} \quad (\text{II. 47})$$

II.2.3.2.2 Représentation par une fonction de transfert :

Le système peut être converti en forme de Figure II.6.

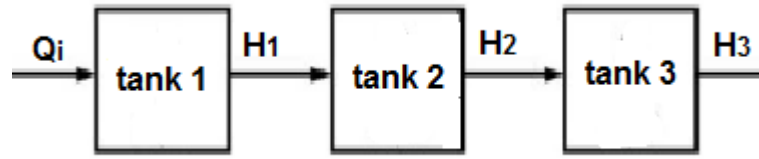


Figure II.6 système à trois réservoirs.

La fonction de transfert de réservoir 1 :

$$\text{On a:} \quad \frac{dh_1}{dt} = \frac{Q_i}{A_1} - \frac{H_1}{A_1 R_1} \quad (\text{II. 48})$$

Avec la transformation de Laplace

$$sH_1(s) = \frac{1}{R_1} Q_i(s) - \frac{1}{A_1 R_1} H_1(s) \quad (\text{II. 49})$$

Alors La fonction de transfert est :

$$\frac{H_1(s)}{Q_i(s)} = \frac{R_1}{A_1 R_1 s + 1} \quad (\text{II. 50})$$

La fonction de transfert de réservoir 2 :

$$\text{On a:} \quad \frac{dh_2}{dt} = \frac{H_1}{A_2 R_1} - \frac{H_2}{A_2 R_2} \quad (\text{II. 51})$$

Avec la transformation de Laplace :

$$sH_2(s) = \frac{1}{A_2 R_1} H_1(s) - \frac{1}{A_2 R_2} H_2(s) \quad (\text{II. 52})$$

Alors La fonction de transfert est :

$$\frac{H_2(s)}{H_1(s)} = \frac{R_2}{R_1(A_2 R_2 s + 1)} \quad (\text{II. 53})$$

La fonction de transfert de réservoir 3 :

On a:
$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{H_2}{A_3 R_2} - \frac{H_3}{A_3 R_3} \quad (\text{II. 54})$$

Avec la transformation de Laplace :

$$sH_3(s) = \frac{1}{A_3 R_2} H_2(s) - \frac{1}{A_3 R_3} H_3(s) \quad (\text{II. 55})$$

Alors La fonction de transfert est :

$$\frac{H_3(s)}{H_2(s)} = \frac{R_3}{R_2(A_3 R_3 s + 1)} \quad (\text{II. 56})$$

La fonction de transfert de system global :

La fonction de transfert du système à trois réservoirs non interactifs est calculée en réarrangeant chaque équation ci-dessus (I. 15) à l'équation(I. 20) .

$$\frac{H_3(s)}{Q_i(s)} = \frac{H_1(s)}{Q_i(s)} \frac{H_2(s)}{H_1(s)} \frac{H_3(s)}{H_2(s)} = \frac{R_3}{(\tau_3 s + 1)(\tau_2 s + 1)(\tau_1 s + 1)} \quad (\text{II. 57})$$

$$\tau_1 = A_1 R_1 \quad ; \tau_2 = A_2 R_2 \quad ; \tau_3 = A_3 R_3 \quad (\text{II. 58})$$

II.2.3.2.3 Représentation par un modèle d'état :**Généralisation sur modèle d'état :**

Le modèle est de la forme :

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (\text{II. 59})$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \quad (\text{II. 60})$$

L'équation (II. 59) est l'équation d'état ou équation de commande.

L'équation (II. 60) est l'équation de sortie ou équation d'observation.

Les équations(II. 59) et (II. 60) définissent entièrement le comportement dynamique.

✓ Les variables :

$$X(t) \text{ Vecteur d'état } X(t) \in \mathbb{R}^n \text{ (n nombre d'états)} \quad X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix}$$

$U(t)$ Vecteur des entrées $U(t) \in \mathbb{R}^m$ (m nombre d'entrées) $U(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ \vdots \\ u_n(t) \end{bmatrix}$

$Y(t)$ Vecteur des sorties $Y(t) \in \mathbb{R}^p$ (p nombre sorties) $U(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ \vdots \\ y_n(t) \end{bmatrix}$

✓ **Matrices de la représentation d'état :**

- A : matrice d'état $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ (matrice carrée).
- B : matrice d'entrée $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$.
- C : matrice de sortie $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$.
- D : matrice de couplage $D \in \mathbb{R}^{p \times m}$ souvent $D = 0$.

Remarque :

L'équation (II. 59) est l'équation d'état qui est l'équation dynamique de system.

L'équation (II. 60) est l'équation de sortie qui est l'équation statique de system.

Toute la dynamique interne du système est résumée dans l'équation d'état, notamment dans la matrice A .

Les valeurs propres de A sont les pôles du système.

Représentation schématique du modèle d'état :

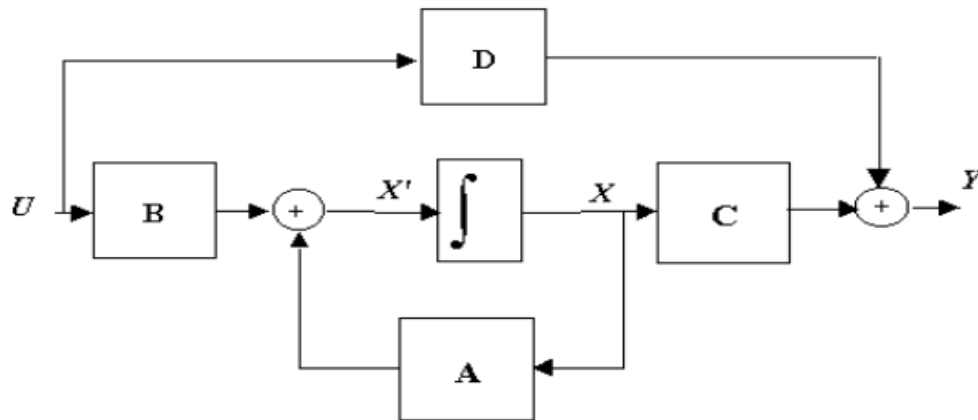


Figure II.7 schéma bloc de la représentation d'état.

Interprétation du schéma :

Equation d'état = vue interne du système.

A représente les interactions dynamiques entre les différents éléments internes du système.

B représente l'action des entrées sur l'évolution dynamique du système.

C indique les capteurs permettent d'obtenir les sorties.

D indique le couplage direct entre les entrées et les sorties. [15]

Modélisation de system :

On a Les équation différentielle du bilan massique pour les contenus des trois réservoirs :

$$\begin{cases} \frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{A} \left(Q_i - \frac{H_1}{R_1} \right) \\ \frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A} \left(\frac{H_1}{R_1} - \frac{H_2}{R_2} \right) \\ \frac{dh_3}{dt} = \frac{1}{A} \left(\frac{H_2}{R_2} - \frac{H_3}{R_3} \right) \end{cases} \quad (\text{II. 61})$$

Si $x_1 = h_1$, $x_2 = h_2$ et $x_3 = h_3$ sont les variables d'état, $u = Q_i$ est la variable d'entrée, et $y = h_3$ est la variable de sortie, alors l'équation d'état sont :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1}{\tau_1} x_1 + \frac{1}{A_1} u \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{\tau_2} x_2 + \frac{R_2}{\tau_2 R_1} x_1 \\ \dot{x}_3 = -\frac{1}{\tau_3} x_3 + \frac{R_3}{\tau_3 R_2} x_2 \end{cases} \quad (\text{II. 62})$$

$$\{ y = x_3 \quad (\text{II. 63})$$

Finalement le modèle d'état donné ci-dessous :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_1} & 0 & 0 \\ \frac{R_2}{\tau_2 R_1} & -\frac{1}{\tau_2} & 0 \\ 0 & \frac{R_3}{\tau_3 R_2} & -\frac{1}{\tau_3} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{1}{A_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u ; \quad y = [0 \ 0 \ 1] x + [0] u \quad (\text{II. 64})$$

II.2.3.3 Résultat de simulation en boucle ouverte du système à trois réservoirs :

Nous avons présenté les résultats de la simulation en boucle ouverte réalisée par le système hydraulique à trois réservoirs à l'écoulement non linéaire.

Le modèle dynamique représenté par :

$$\begin{pmatrix} \frac{dh_1}{dt} \\ \frac{dh_2}{dt} \\ \frac{dh_3}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{A_1} (Q_i - S_{max} a_1 \sqrt{2g h_1}) \\ \frac{1}{A_2} (S_{max} a_1 \sqrt{2g h_1} - S_{max} a_2 \sqrt{2g h_2}) \\ \frac{1}{A_3} (S_{max} a_2 \sqrt{2g h_2} - S_{max} a_3 \sqrt{2g h_3}) \end{pmatrix} \quad (\text{II. 65})$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{pmatrix} \quad (\text{II. 66})$$

Les paramètres du système sont donnés par le Tableau II.2

Tableau II.2 Les paramètres du système hydraulique à trois réservoirs.

Section du chaque réservoir $A_1 = A_2 = A_3$	0.5 m^2
section maximale de passage du liquide dans la valve S_{max}	0.0003 m^2
Coefficient de décharge $a_1 ; a_2 ; a_3$	1 ; 0.7 ; 0.5
Gain de débit d'entrée Kq_i	0.003 m^3/sv

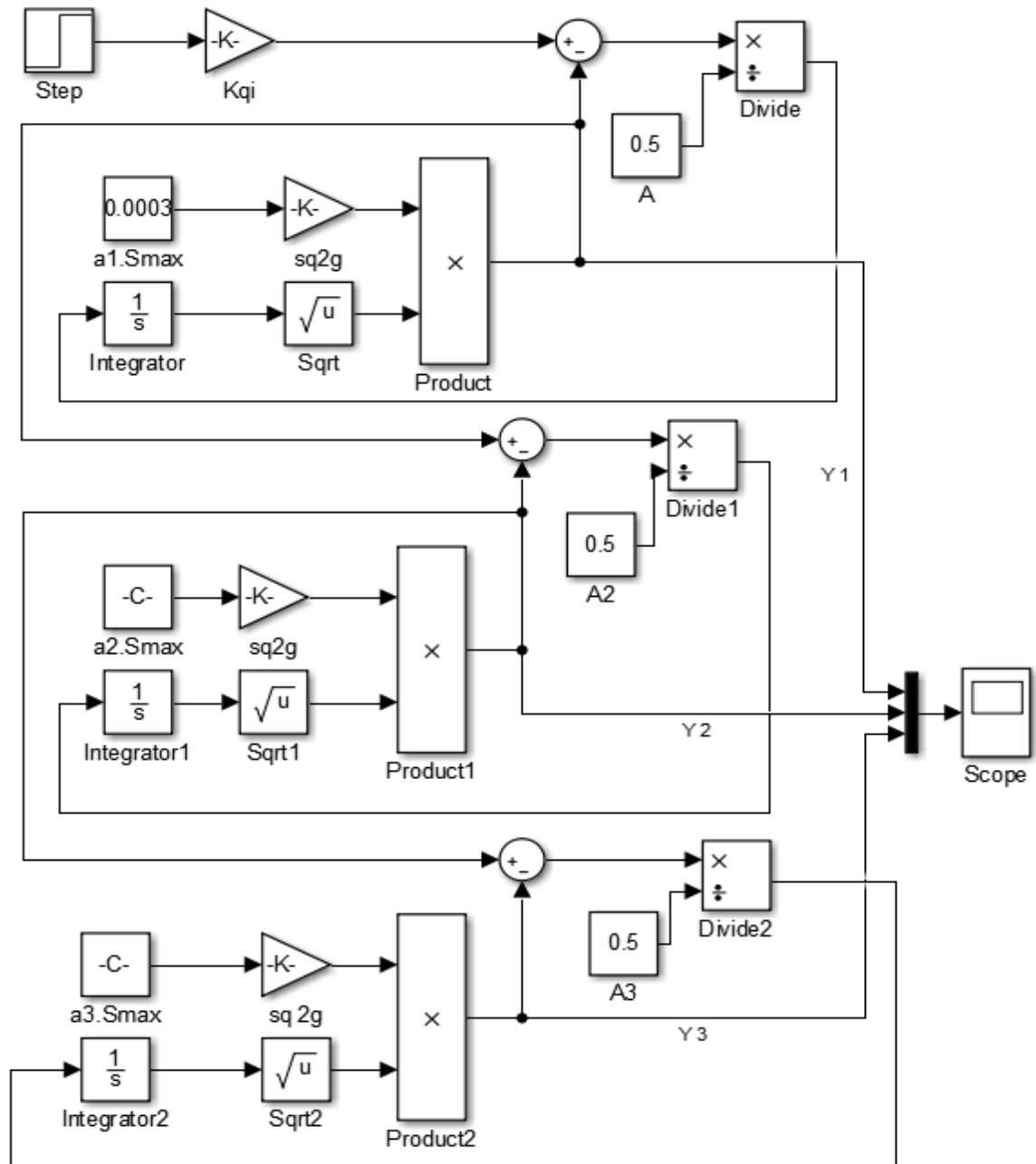


Figure II.8 Schéma Simulink du modèle non linéaire en boucle ouverte.

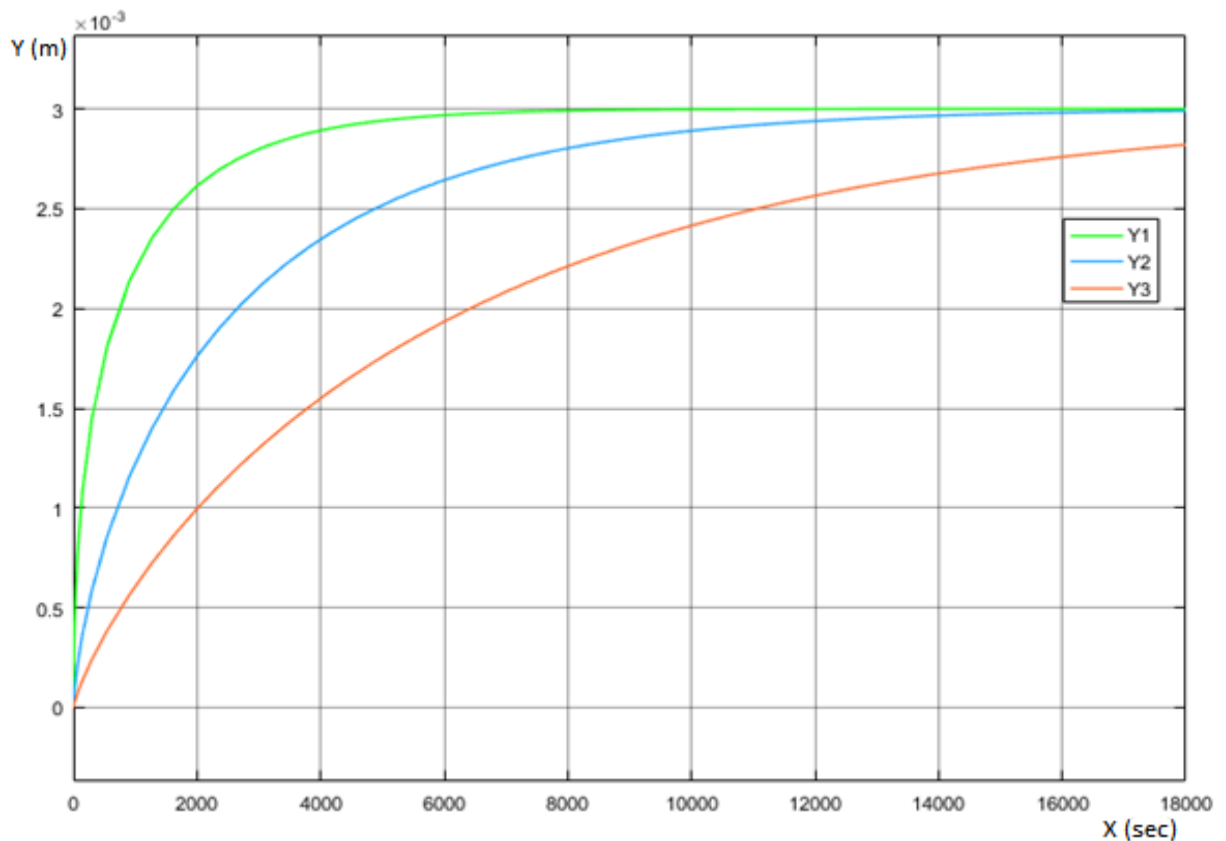


Figure II.9 Réponse en boucle ouverte du modèle non linéaire du système hydraulique.

II.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation dynamique de deux systèmes hydrauliques, système de réservoirs de premier ordre et système à trois réservoirs non interactifs. Cette modélisation est étudiée avec un débit non linéaire et linéaire, suivi par un test de simulation est présenté pour illustrer le comportement dynamique du système en fonction des variations du coefficient de refoulement de la vanne de sortie de chaque réservoir, Dans le chapitre suivant une approche utilisant un système de contrôle basée sur la correcteur PID.

Chapitre III

***Commande d'un système
à trois réservoirs non-
interactif par un
régulateur PID***

III.1 Introduction :

Dans de nombreuses applications de procédés industriels, le contrôle du niveau de liquide est important, en particulier dans les industries pétrolières et gazières, les usines de traitement des eaux usées et les industries de transformation des aliments. Le système à trois niveaux de réservoir se rapporte aux problèmes de contrôle du niveau des liquides généralement présents dans les réservoirs d'expansion industrielle [16]. Ce problème de contrôle peut être résolu par un certain nombre de stratégies de contrôle de niveau allant de PID classique aux contrôleurs PID basés sur un algorithme génétique [17]. Dans le contrôle de niveau d'application généralement utilisé le régulateur classique intégral dérivé proportionnel (PID), mais le réglage les paramètres des contrôleurs doivent être estimés par la technique de réglage soit en réponse fréquentielle ou en réponse temporelle à atteindre les performances souhaitées [18] [19], Il existe de nombreuses techniques de réglage pour obtenir la réponse souhaitée dans le système de contrôle.

Ce chapitre est consacré à donner de brèves informations sur les différentes stratégies diverses méthodes de réglage du contrôleur PID. Il décrit également différentes combinaisons de trois processus de niveau de réservoir en utilisant différentes méthodes avec leur test de simulation et faire des comparaisons avec d'autre méthode.

III.2 Le correcteur PID :

Un régulateur (correcteur) PID remplit essentiellement trois fonctions :

1. Il fournit un signal de commande $u(t)$ en tenant compte de l'évolution du signal de sortie $y(t)$ par rapport à la consigne $w(t)$.
2. Il élimine l'erreur statique grâce au terme intégrateur.
3. Il anticipe les variations de la sortie grâce au terme dérivateur.

Le régulateur PID relie directement le signal de commande $u(t)$ au signal d'écart $E(t)$.

Sa description temporelle est la suivante :

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (\text{III. 1})$$

Avec l'écart défini comme suit :

$$e(t) = w(t) - y(t) \quad (\text{III. 2})$$

Sa fonction de transfert s'écrit :

$$G_c(s) \equiv \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \quad (\text{III. 3})$$

La figure ci-dessous montre un schéma-bloc d'un régulateur PID :

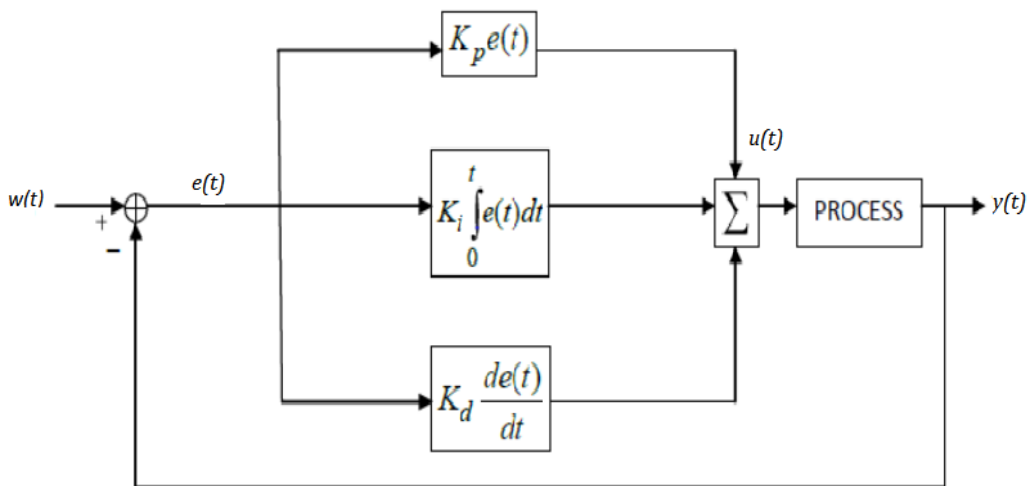


Figure. III.1 Schéma de fonctionnement du régulateur PID.

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

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

D: action dérivée permet d'améliorer la réponse transitoire grâce à l'effet d'anticipation. [20]

a) Action Proportionnelle

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

P est valide uniquement sur la bande dans laquelle le signal de sortie du régulateur est proportionnel à l'erreur du système. Noter que si l'erreur de mesure est égale à zéro, la partie proportionnelle de la sortie du régulateur est également à zéro Dans le cas d'un correcteur proportionnel, la loi de commande corrigée $u(t)$ est proportionnelle à l'écart

$$\varepsilon(t): u(t) = Kp \cdot \varepsilon(t) \quad (\text{III. 4})$$



Figure. III.2 Action Proportionnelles.

b) Action Intégrale :

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



Figure. III.3 Action Intégrale.

c) Action Dérivée :

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

[21]

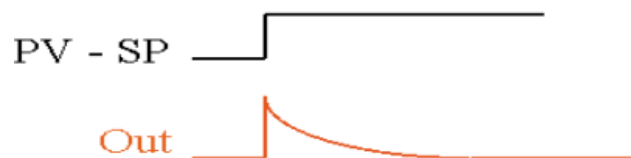


Figure. III.4 Action Dérivée.

III.3 Méthodes de réglage du contrôleur PID :

Il existe plusieurs méthodes pour régler les paramètres d'un correcteur PID. Les méthodes les plus efficaces impliquent généralement le développement d'une certaine forme de modèle de processus, puis le choix de P, I et D en fonction des paramètres du modèle dynamique, les méthodes de configuration du contrôleur décrivent les paramètres du contrôleur en tant que formules ou algorithmes. Ces méthodes sont généralement classées en trois catégories :

a) Méthodes en boucle fermée : Dans cette méthode le réglage des paramètres du contrôleur PID est basée sur la configuration en boucle fermée. Nous citons les méthodes suivantes :

Méthode Ziegler-Nichols.

Méthode Ziegler-Nichols modifiée.

Tyreus - Méthode Luyben.

Méthode d'oscillation amortie.

b) Méthodes en boucle ouverte : Dans cette méthode le réglage des paramètres du contrôleur PID est basée sur la configuration en boucle ouverte. Nous citons les méthodes suivantes :

Méthode Cohen et Coon.

Méthode Cohen et Coon modifiée.

Méthode Fertik.

Méthode IMC.

Critères d'erreur minimum (IAE, ISE, ITAE).

c) Méthodes intelligents avancées : Dans ces méthodes, les paramètres de réglage des contrôleurs sont basées sur les techniques d'intelligence artificielle pour avoir un coût minimale et commande plus robuste. Nous citons par exemple

Logique floue.

Intelligence artificielle.

Algorithme génétique.

III.3 Application de la commande système à trois niveaux de réservoir par un PID :

Dans cette application, nous fournirons le contrôle PID sur le système de stockage à trois niveaux en utilisant des différentes méthodes suivantes :

Méthode Ziegler-Nichols, méthode Cohen et Coon modifiée critères d'erreur minimale (IAE, ISE, ITAE).

Ce système de trois niveaux de réservoir est représenté par la fonction de transfert suivante :

$$\frac{H_3(s)}{Q_i(s)} = \frac{R_3}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)(\tau_3 s + 1)} \quad (\text{III. 5})$$

$$\tau_1 = A_1 R_1 \quad ; \tau_2 = A_2 R_2 \quad ; \tau_3 = A_3 R_3 \quad (\text{III. 6})$$

En suppose : $A_1 = A_2 = 1 \text{ m}^2$; $A_3 = 0.33 \text{ m}^2$ (III. 7)

$$R_1=R_3 = 1 \text{ (m/(m}^3\text{/s))} \quad ; \quad R_2 = 0.5 \text{ (m/(m}^3\text{/s))} \quad (\text{III. 8})$$

Alors la fonction de transfert globale du système de trois réservoirs est représentée par :

$$\frac{H_3(s)}{Q_i(s)} = \frac{6}{(s + 1)(s + 2)(s + 3)} \quad (\text{III. 9})$$

III.4.1 Contrôle par la méthode d'oscillation : Ziegler-Nichols :

En 1942, Ziegler et Nichols ont expliqué des procédures mathématiques simples pour le réglage PID. Ces procédures sont maintenant reconnues comme étant la norme dans la pratique des systèmes de commande [22].

Pour cette méthode, on se sert de la stabilité critique. Soit le système de la Figure. III.5

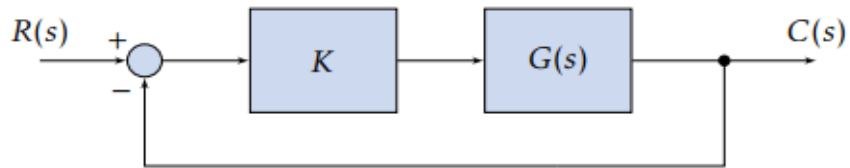


Figure. III.5 Système sous étude : Ziegler-Nichols.

On ajuste le gain K à une valeur faible. On augmente ensuite le gain K jusqu'à ce que le système soit marginalement stable (limite de stabilité). On note le gain critique, K_u . On doit aussi mesurer la période des oscillations, T_u , comme à la Figure. III.6.

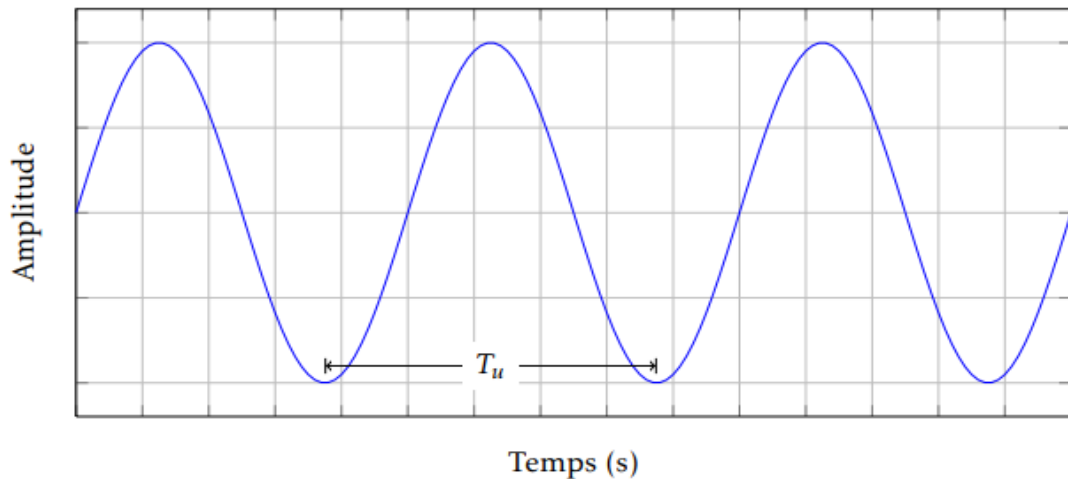


Figure. III.6 Réponse d'un système : Ziegler-Nichols.

Par après, on utilise les valeurs du tableau III.1 pour calculer les paramètres des contrôleurs.

	K_c	$T_i(sec)$	$T_d(sec)$
P	$0.5K_{cu}$	∞	0
PI	$0.45K_{cu}$	$T_u/1.2$	0
PID	$0.6K_{cu}$	$T_u/2$	$T_u/8$

Tableau III.1 Paramètres de réglage de la méthode en boucle fermée Ziegler-Nichols. [23]

Alors on a la fonction de transfert du système à trois réservoirs non-interactif :

$$G(s) = \frac{6}{(s + 1)(s + 2)(s + 3)} \quad (III. 10)$$

Calculer la valeur des composantes pour réaliser un contrôleur PID.

Il faut trouver la valeur du gain critique K_u et la période critique T_u , pour le système à trois réservoirs. En utiliser la table de Routh pour obtenir le gain critique, puis simuler et mesurer la période.

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$T(s) = \frac{6K}{s^3 + 6s^2 + 11s + (6 + 6K)} \quad (III. 10)$$

La table de Routh est alors :

$$\begin{array}{r|rr}
 s^3 & 1 & 11 \\
 s^2 & 6 & 6 + 6K \\
 s^1 & \frac{66 - (6 + 6K)}{6} & 0 \\
 s^0 & 6 + 6K & 0
 \end{array} \quad (III.11)$$

Pour que le système soit stable, il faut que :

$$A) 66 - (6 + 6K) > 0 \Rightarrow K < 10 \quad (III.12)$$

$$B) 6 + 6K > 0 \Rightarrow K > -1 \quad (III.13)$$

Le gain critique est donc $K_u = 10$.

Si on simule le système avec le gain critique, on obtient une période de $T_u \approx 1.9s$. On peut aussi calculer la fréquence d'oscillation du système avec le gain critique. On utilise le polynôme s^2 de la table de Routh, puis on isole w_c en remplaçant $s = jw_c$.

$$6s^2 + 6 + 6K = 6s^2 + 66 = s^2 + 11 \quad (III.14)$$

On substitue $s = jw_c$.

$$(jw_c)^2 + 11 = 0 ; w_c = \sqrt{11} \quad (III.15)$$

Et la période est :

$$T_u = \frac{2\pi}{\omega_c} = 1.89 s \quad (III.16)$$

Alors avec le tableau III.1, nous obtenons les valeurs des paramètres de réglage PID, Représenté dans le tableau III.2.

Tableau III.2 Paramètres P, PI, PID de la méthode Ziegler-Nichols.

	K_c	K_i	K_d
P	5	∞	0
PI	4.5	2.857	0
PID	6	6.349	1.416

Les paramètres de réglage présentés dans le tableau III.2 sont simulés pour la fonction de transfert de processus. La réponse des contrôleurs P, PI et PID sont obtenus en utilisant la simulation Fig. III.7 et sont représentés à la Figure. III.8.

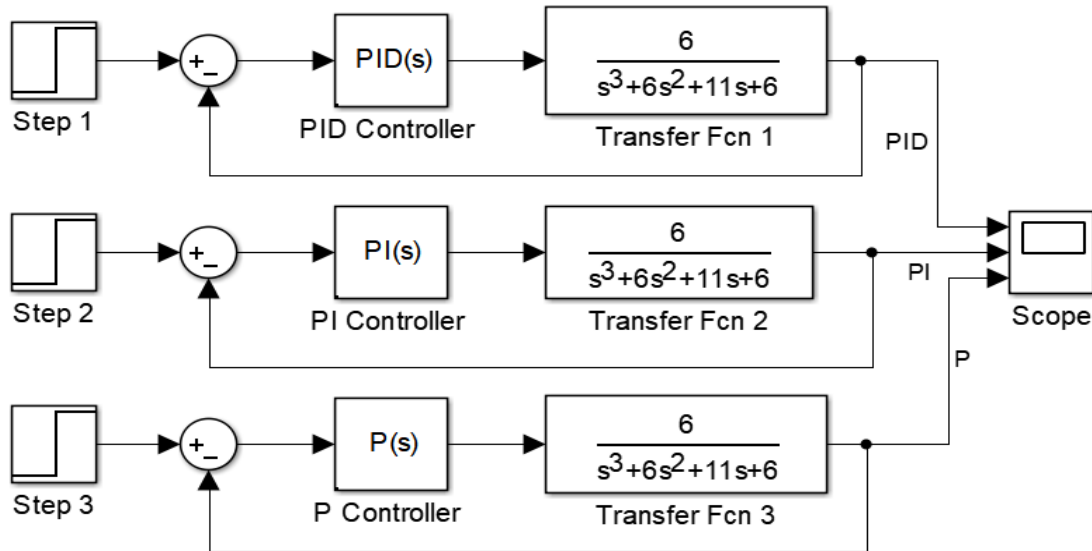


Figure. III.7 Schéma Simulink du modèle par la méthode Ziegler-Nichols.

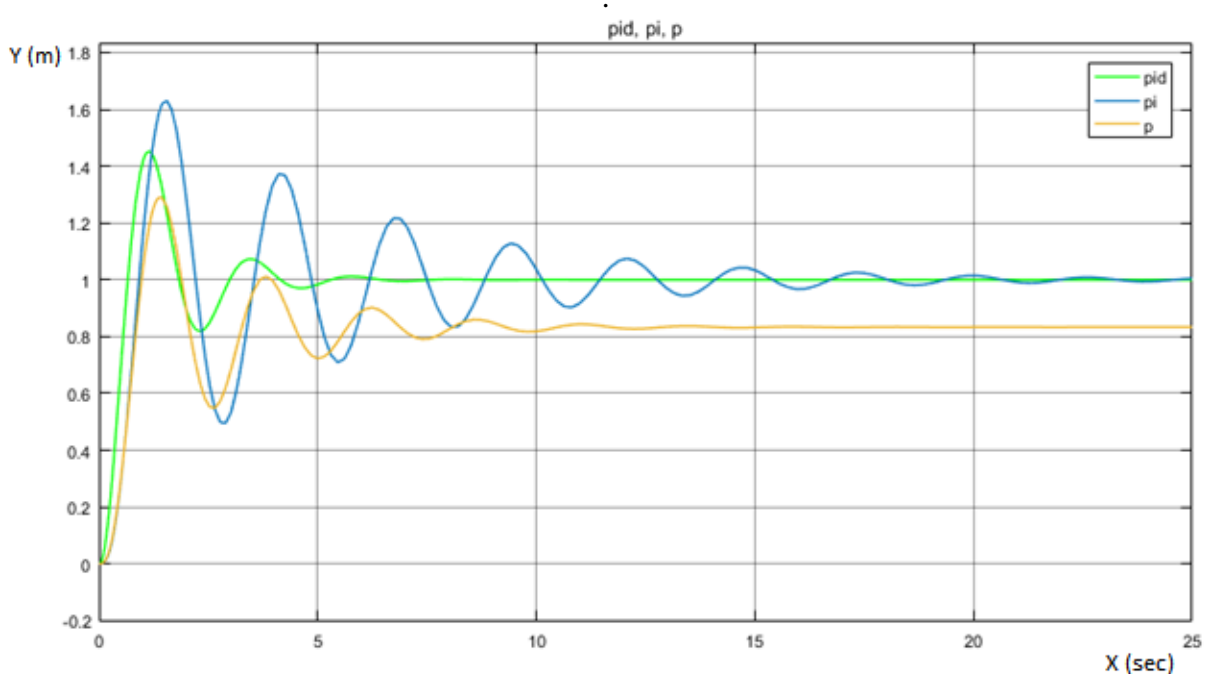


Figure. III.8 Réponse de P, PI, et PID contrôleur de système à trois réservoirs non-interactif par ZN

La réponse qui précède indique que les contrôleurs P, PI et PID ont une réponse d'étape différente. Temps de montée (T_m), Temps de pic (T_p), temps de stabilisation, dépassement ($D_1\%$) et erreur de décalage sont obtenus à partir de la simulation et sont comparés.

Tableau III.3 Comparaison des performances du processus en P, PI et PID à l'aide de la méthode Z-N

	Temps de montée (T_m)	Temps de pic (T_p)	Temps de stabilisation	Dépassement ($D_1\%$)	erreur de décalage
P	0.955	1.270	19.00	30	0.166
PI	0.918	1.530	32.50	61	0.00
PID	0.655	1.130	11.10	43	0.00

Le tableau III.3 montre que le contrôleur P a le plus faible dépassement $D_1\%$, mais a une erreur de décalage. Le contrôleur PI à zéro erreur de décalage mais a un grand dépassement $D_1\%$ et son temps de stabilisation est également plus grand que le contrôleur P. Le contrôleur PID a moins de temps de montée, moins de temps de stabilisation, zéro décalage et moins de dépassement $D_1\%$. Donc, le contrôleur PID est le mieux adapté pour cette méthode de Ziegler-Nichols.

III.4.2 Contrôle par la méthode Cohen et Coon modifiée :

La méthode Cohen-Coon n'est pas adaptée pour toutes les applications. Elle peut être utilisée que sur les processus auto réglés. La plupart des boucles de contrôle, comme le débit, la température, la pression, la vitesse et la composition, sont, du moins d'une certaine mesure, des processus autorégulateurs. (D'autre part, le processus d'intégration le plus courant est une boucle de contrôle du niveau).

Pour appliquer les règles de réglage Cohen-Coon modifiées, on va effectuer un test de sortie du système Figure. III.9 et obtenir les paramètres suivants :

Tau = est la Différence de temps entre l'intersection à la fin du retard/temps et le variable processus atteignant 63% de sa variation totale.

Gain gp = variation totale du PV [en %] / variation du CO [en %].

Td = différence de temps entre le changement de CO et l'intersection de la ligne tangentielle et le niveau PV d'origine.

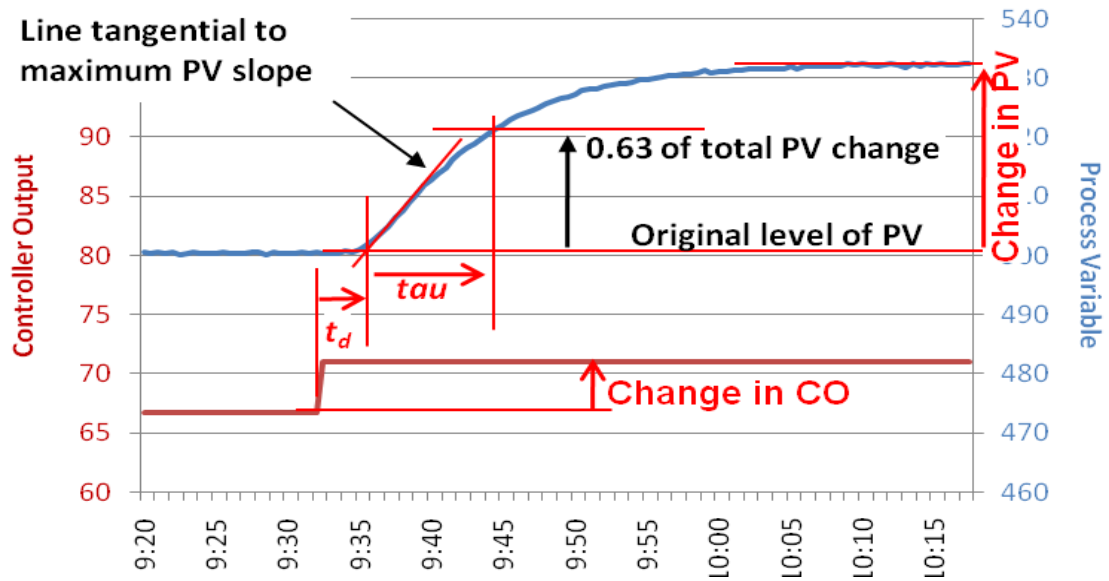


Figure. III.9 Réponse d'un système : Cohen Coon modifiée. [24]

On utilise les valeurs du tableau III.1 des règles de Cohen Coon modifiée. Pour calculer les paramètres des contrôleurs.

Tableau III.4 Paramètres de réglage de la méthode Cohen Coon modifiée. [24]

	K_c	$T_i(sec)$	$T_d(sec)$
P	$\frac{1.03}{g_p} \left(\frac{t_{au}}{t_d} + 0.34 \right)$	∞	0
PI	$\frac{0.9}{g_p} \left(\frac{t_{au}}{t_d} + 0.092 \right)$	$3.33t_d \frac{t_{au} + 0.092t_d}{t_{au} + 2.22t_d}$	0
PID	$\frac{1.35}{g_p} \left(\frac{t_{au}}{t_d} + 0.185 \right)$	$2.5t_d \frac{t_{au} + 0.185t_d}{t_{au} + 0.611t_d}$	$0.37t_d \frac{t_{au}}{t_{au} + 0.185t_d}$

Après avoir la description de cette méthode, nous l'appliquons au système de réservoirs à trois niveaux. Alors on va représenter la réponse indicielle de ce system à trois réservoirs donnée par la Figure. III.9 pour obtenir les paramètres suivants : Tau, Gain g_p , T_d .

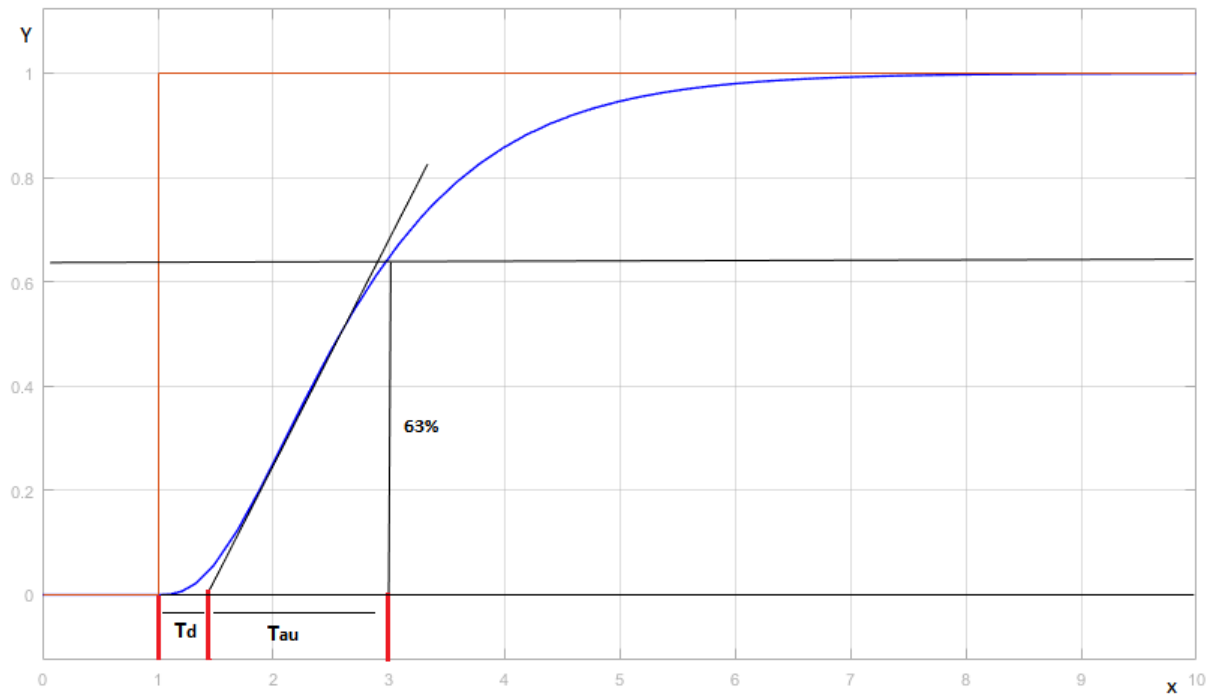


Figure. III.10 Réponse de fonction de transfert du système à trois réservoirs.

Ensuite nous utilisons la Fig. III.9 pour obtenir les paramètres de système suivants :

$$t_d = 1 - 1.4 = 0.4 \text{ sec} \quad ; \quad t_{au} = 3 - 1.4 = 1.6 \text{ sec} \quad ; \quad g_p = 1$$

Alors avec le tableau III.4, nous obtenons les valeurs des paramètres de réglage PID de la méthode Cohen Coon modifiée, Représenté dans le tableau III.4.

Tableau III.5 Paramètres P, PI, PID de la méthode Cohen Coon modifiée.

	K_c	K_i	K_d
P	4.47	∞	0
PI	3.86	1.85	0
PID	5.65	8.69	0.8

Les paramètres de réglage présentés dans le tableau III.5 sont utilisés pour simuler le processus commandé par le correcteur PID. La réponse des contrôleurs P, PI et PID sont représentés à la Figure. III.10.

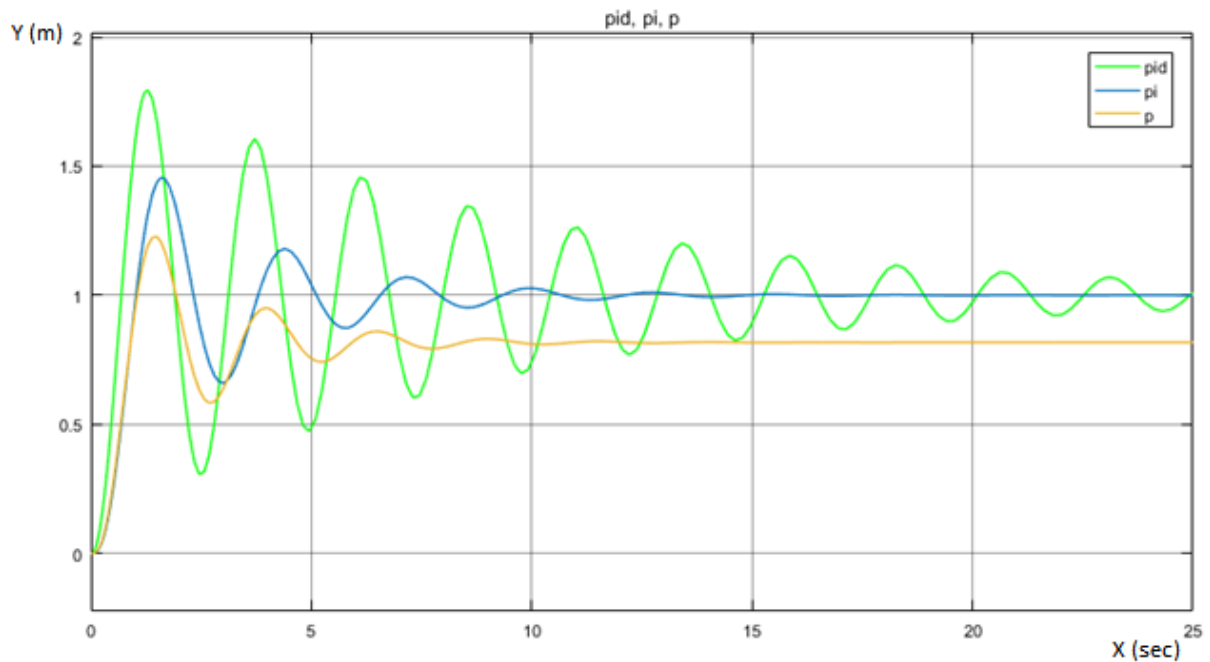


Figure. III.11 Réponse de contrôleur P, PI, et PID de système à trois réservoirs non-interactif par Cohen Coon modifiée.

La figure III.10 représente les réponses des correcteur P, PI et PID de système à trois réservoirs non-interactif par la méthode de Cohen Coon modifiée, Où nous remarquons une différence significative dans les ondulations de chaque correcteur alors on va fait une comparaison d'étape différente suivant : Temps de montée (T_m), Temps de pic (T_p), temps de stabilisation, dépassement ($D_1\%$) et erreur de décalage, les résultats de Comparaison dans le Tableau III.6.

Tableau III.6 Comparaison des performances du processus en P, PI et PID à l'aide de la méthode Cohen Coon modifiée.

	Temps de montée (T_m)	Temps de pic (T_p)	Temps de stabilisation	Dépassement $D_1\%$	erreur de décalage
P	0.992	1.370	19.65	46	0.172
PI	0.981	1.590	20.01	46	0.00
PID	0.697	1.261	64.50	80	0.00

Le tableau III.6 montre que le contrôleur PID à zéro erreur de décalage mais a un grand dépassement $D_1\%$ et son temps de stabilisation est également plus grand que le contrôleur P et PI. Le contrôleur PI

à moins de temps de stabilisation, zéro décalage et moins de dépassement $D_1\%$. Donc, le contrôleur PI est le mieux adapté pour cette méthode de Cohen Coon modifiée.

III.4.3 Critères minimaux d'erreur (IAE, ISE, ITAE) :

La plupart des règles de réglage du PID sont basées sur l'hypothèse du délai de premier ordre et du délai de retard, ce qui ne permet pas d'assurer les meilleures performances de contrôle. Dans cette application nous présentons une comparaison entre la méthode de Ziegler Nichols et la méthode de Critère d'erreur minimum, Cette dernière méthode est basée sur la minimisation d'une fonctionnelle du coût constitué des Indes de performances du type ISE, IAE et ITAE. La formulation mathématique de problème d'optimisation est basée sur l'approximation des fonctions de transfert des correcteurs pour optimiser les performances en boucle fermée.

ISE (Integral of the square value of the error):

ISE pénalisera les erreurs majeures plus que les erreurs mineures (parce que le carré d'une erreur importante sera beaucoup plus grand). Mathématiquement données par :

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (\text{III.17})$$

Les systèmes de contrôle spécifiés pour minimiser par ISE auront tendance à éliminer rapidement les erreurs importantes, mais toléreront de petites erreurs persistant pendant une longue période de temps. Souvent cela conduit à des réponses rapides, mais avec une amplitude considérable, basse, oscillation.

IAE (Integral of the absolute value of the error):

Mathématiquement données par :

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| \cdot dt \quad (\text{III.18})$$

IAE n'ajoute pas de pondération aux erreurs dans une réponse du système. Il tend à produire une réponse plus lente que les systèmes optimaux ISE, mais généralement avec une oscillation moins durable.

ITAE (Integral of the time-weighted absolute value of the error):

Ce que cela fait est à des erreurs de poids qui existent après un long temps beaucoup plus lourd que ceux au début de la réponse mathématiquement données par :

$$\text{ITAE} = \int_0^{\infty} t|e(t)| \cdot dt \quad (\text{III. 19})$$

Le réglage ITAE produit des systèmes qui se règlent beaucoup plus rapidement que les deux autres méthodes de réglage. L'inconvénient de cela est que le réglage ITAE produit également des systèmes avec une réponse initiale lente (nécessaire pour éviter une oscillation soutenue).

Où t est time et $e(t)$ est l'erreur qui est calculée par la différence entre le point de consigne et la sortie.

Procédure de réglage optimale :

Pour déterminer les paramètres de réglage optimal du contrôleur, les étapes suivantes sont prises pour concevoir les contrôleurs PID à l'aide du critère d'erreur minimum.

- Le calcul de l'erreur en utilisant Simulink/Matlab Figure. III.11.

- Paramètres initiaux du contrôleur :

Comme de nombreux problèmes d'optimisation, l'optimisation des performances de contrôle est non convenante, d'où un piège de minimum local est inévitable. Pour contrer cela, les paramètres initiaux du contrôleur sont ceux déterminés par l'une des règles de réglage existantes. De cette façon, le contrôleur dérivé est au moins meilleur que celui déterminé par la méthode de réglage. Les paramètres de contrôleur PID obtenus par **Ziegler-Nichols** est utilisée comme les paramètres initiaux de l'algorithme d'optimisation

- Réaliser le système de commande dans Simulink par la fonction de transfert du système à trois réservoirs en boucle fermée :

$$H(s) = \frac{G(s) C(s)}{1 + G(s) C(s)}$$

- Minimiser l'erreur calculée par les algorithmes d'optimisation :

L'ajustement des paramètres K_P, T_i, T_d par optimisation consiste à minimiser l'erreur définie par les critères (IAE, ITAE, ISE).

- l'algorithme d'optimisation utilisé dans notre exemple est celui existe dans la boîte d'outils de Matlab. La syntaxe de cette fonction est comme suit :

`[x, fval, flag]=fminunc (cost, x, opt)`

Où : **Cost** : fonction de Matlab ajouté pour faciliter l'optimisation.

Le variable **x** est le point de départ pour la méthode de recherche.

L'argument **opt** contient d'autres options de commande pour le processus d'optimisation. La fonction **fminunc** trouve un minimum d'une fonction scalaire de plusieurs variables, à partir d'une estimation initiale. Ceci est généralement appelé optimisation non linéaire sans contrainte.

La figure III.12 présente le model du Simulink d'une régulation PID du système a trois réservoirs en minimisant l'erreur ISE, ITAE, IAE.

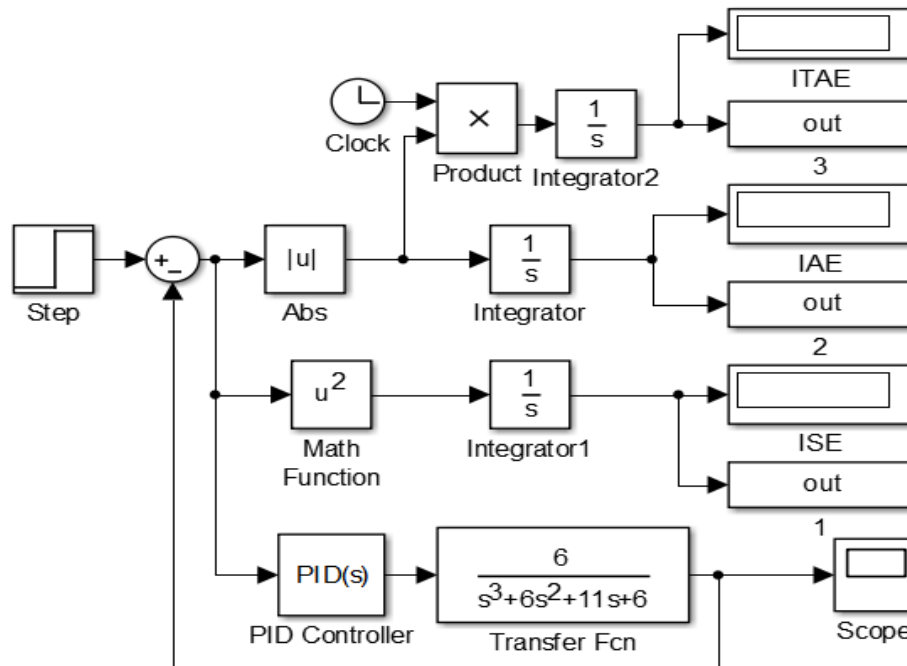


Figure. III.12 Simulink model du system a trois réservoirs.

Les paramètres du contrôleur PI en boucle fermée conçus à partir de différents indices de performance, les résultats sont présentés dans Tableau III.7.

Tableau III.7 Les paramètres du contrôleur PI à partir de différents indices de performance.

	KP	KI
ITAE	1.202	0.8195
IAE	1.932	0.9878
ISE	3.382	0.9486

La réponse du système avec contrôleur PI en boucle fermée conçus à partir de différents indices de performance, sont présentés dans Figure. III.12.

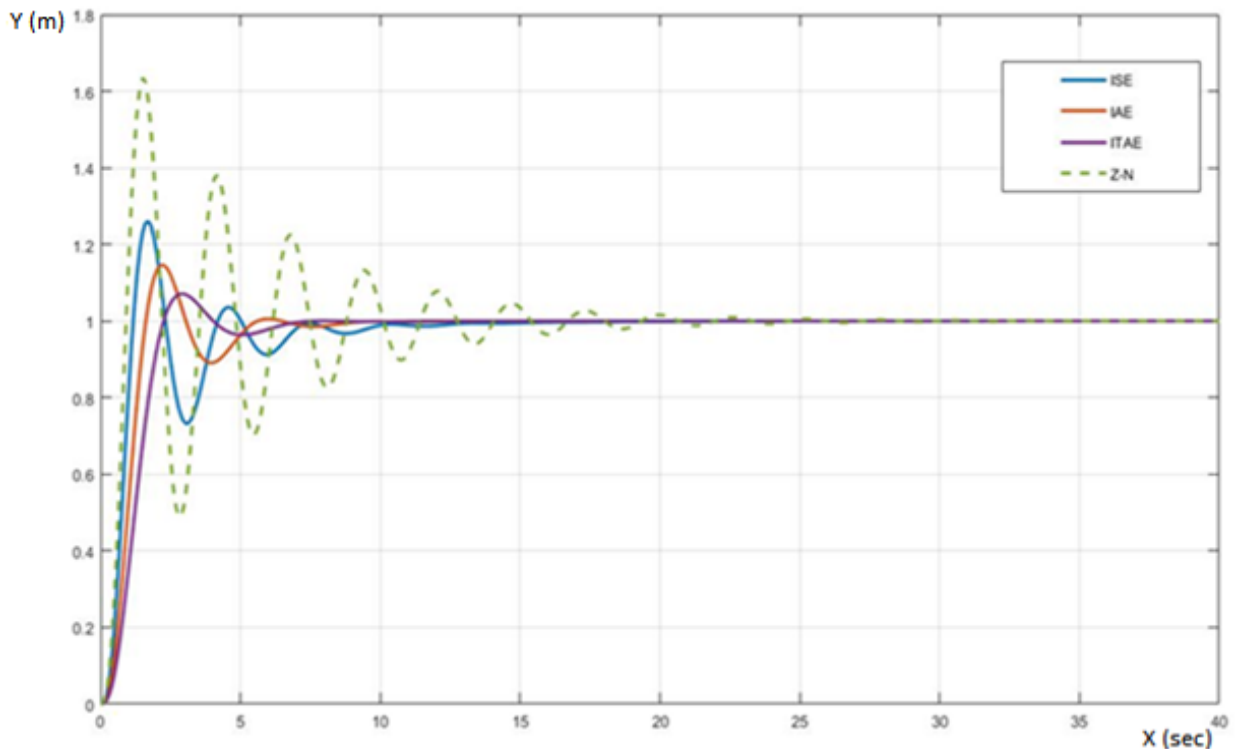


Figure. III.13 Réponse de PI contrôleur de système à trois réservoirs non-interactif par IAE, ISE, ITAE et Z-NICHOLS méthode

En termes de stabilité des systèmes, quatre valeurs principales sont importantes. Ce sont le temps de montée, le dépassement et l'erreur, temps de stabilisation qui correspondent respectivement la rapidité, stabilité, précision. Les valeurs de ces caractéristiques de robustesse pour les systèmes contrôlés par PI sont également :

Tableau III.8 Comparaison des performances du processus en PI par IAE, ISE, ITAE et Z-NICHOLS

	Temps de montée (T_m)	Temps de pic (T_p)	Temps de stabilisation	Dépassement ($D_1\%$)	Erreur de décalage
Z.NICHOLS	0.918	1.530	32.50	61	0.00
ITAE	2.211	2.833	11.5	7	0
IAE	1.621	2.182	16.6	16	0
ISE	1.152	1.705	19	26	0

La fonction de transfert de correcteur PID optimal en minimisant les critères IAE, ISE, ITAE par la fonction d'optimisation **fminunc** sont respectivement :

$$IAE = \frac{26.34 s^2 + 24.74 s + 15.88}{s}$$

$$ISE = \frac{1053 s^2 - 214.7 s + 57.87}{s}$$

$$ITAE = \frac{6.129 s^2 + 10.83 s + 5.924}{s}$$

La réponse du système avec contrôleur PID en boucle fermée conçus à partir de différents indices de performance, les résultats sont présentés dans Figure. III.13.

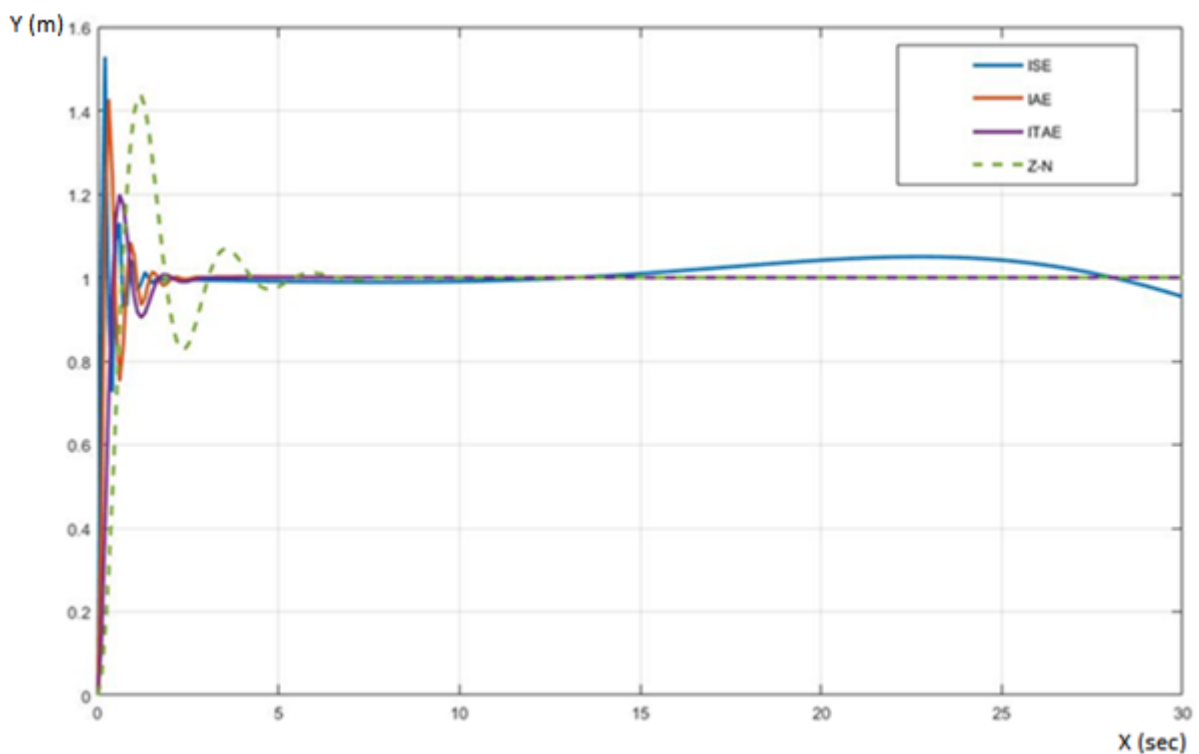


Figure. III.14 Réponse de PID contrôleur de système à trois réservoirs non-interactif par IAE, ISE, ITAE et Z-NICHOLS.

Tableau III.10 montre la comparaison des performances des processus dans le contrôleur PID par IAE, ISE, ITAE et Z-NICHOLS.


Tableau III.10 Comparaison des performances du processus en PID par IAE, ISE, ITAE et Z-NICHOLS.

	Temps de montée (T_m)	Temps de pic (T_p)	Temps de stabilisation	Dépassement ($D_1\%$)	erreur de décalage
Z.NICHOLS	0.655	1.130	11.10	43	0
ITAE	0.423	0.535	8.73	25	0
IAE	0.1803	0.2985	17.45	39	0
ISE	0.101	0.201	40	53	1.04

D'après le tableau III.10, les résultats obtenus pour les contrôleurs PI et PID par ITAE, IAE, ISE et Z-NICHOLS. Le contrôleur PID a donné de meilleures performances par rapport aux contrôleurs PI en ce qui concerne le temps de stabilisation, le temps de montée et le dépassement. La réponse obtenue par le contrôleur PID se caractérise par un ISE durée temps de stabilisation plus long. Le critère IAE tient compte d'un écart plus grand que l'ISE (dépassements plus faibles). La méthode Z-NICHOLS a le plus grand temps de montée que les autres méthodes avec un grand écart par rapport à l'index ISE. Le critère IATE donne une réponse le plus rapide avec un temps de stabilisation 8.73 ainsi ce dernier est le Moins oscillant que les autres index.

Conclusion :

Par rapport aux autres méthodes de réglage. ISE conduit à des réponses rapides mais avec une amplitude considérable, basse, oscillation. IAE tend à produire une réponse plus lente que les systèmes optimaux ISE, mais généralement avec une oscillation moins durable. Le réglage ITAE produit des systèmes qui se règlent beaucoup plus rapidement que les deux autres méthodes de réglage L'inconvénient de cela est que le réglage ITAE produit également des systèmes avec une réponse initiale lente (nécessaire pour éviter une oscillation soutenue). Donc La comparaison montre que la minimisation de u critère ITAE mène au meilleur contrôleur PID.



***Conclusion
générale***

Conclusion Générale

Ce travail propose de modéliser et de régler le niveau d'un liquide d'un système Hydraulique à trois réservoirs. L'objectif général est de suivre le point de consigne et stabiliser le niveau dans les réservoirs avec moins d'oscillations et le temps de décantation minimum.

Dans ce travail, nous avons présenté le système hydraulique à trois réservoirs et sa modélisation aussi le modèle d'état du système étudié et les résultats de simulation suivie par l'objectif de commande en utilisant les méthodes Ziegler-Nichols, la méthode Cohen et Coon modifiée et la minimisation des critères d'erreur (IAE, ISE, ITAE).

Enfin, les résultats de simulation ont montré que la minimisation de critère ITAE mène au meilleur contrôleur PID. Ce réglage produit des systèmes qui se règlent beaucoup plus rapidement que les deux autres méthodes de réglage. L'inconvénient de cela est que le réglage ITAE produit également des systèmes avec une réponse initiale lente (nécessaire pour éviter une oscillation soutenue).

Références bibliographiques :

- [1] 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
- [2] P. Wellstead, TecQuipment CE105 Coupled Tanks Apparatus, Control Systems Centre, Manchester, U.K, 1993.
- [3] Mahir « Système hydraulique », Université Lille1 Projet IMA4
- [4] Site web, https://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_drive_system.
- [5] Site web, <https://elearning-deprecated.univ-annaba.dz/mod/resource/view.php?id=37884>
- [6] Site web, https://www.wikiwand.com/fr/Techniques_arabes_au_Moyen_%C3%82ge
- [7] Site web, http://ressources.chateauversailles.fr/IMG/pdf/le_systeme_hydraulique_chronologie_des_travaux_d_adduction.pdf.
- [8] Cite web, <https://andrenotre.com/2012/04/30/bassin-dappolon-jardins-de-versailleschevaux-sous-les-grandes-eaux/>.
- [9] Site web, https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_de_Marly.
- [10] Le Roux, T. (Ed.). (2018). *Risques industriels: savoirs, régulations, politiques d'assistance, fin XVIIe-début XXe siècle*. Presses universitaires de Rennes.
- [11] Site web <https://hyquip.co.uk/training-materials/2817-hydac-hydraulic-basic-hydraulics-and-components-training-centre-manual.html>.
- [12] Site web https://www4.ac-nancmetz.fr/physique/ancien_site/PHYS/Term/Mecaflu/Poly-mecaflu.htm
- [13] J. C. Basilio and S. R. Matos, “Design of PI and PID Controllers with Transient Performance Specification”, *IEEE Transactions on Education*, vol. 45, no. 4, pp. 364-370, November 2002.
- [14] Mamur,H., Atacak, I., Korkmaz, F., & Bhuiyan, M. R. A. (2017). Modeling and application of a computer-controlled liquid level tank system. *Computer science & Information Technology (CS & IT)*, 97-106.
- [15] E.Kumar and M. Sankar, “Detection of Oscillation in Three Tank Process for Interacting and Non-Interacting cases”, International Multi-Conference in Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing, pp. 352-357, March 2013.
- [16] <http://asi.insa-rouen.fr/enseignement/siteUV/auto/cours/cours8.pdf>.
- [17] Graebe S.F., Goodwin G.C., “Control Design and Implémentation in Continuous Steel Casting”, *IEEE Control Systems*, August 1995, pp.64-71.

- [18] S.N.Sivanandam, S.N.Deepa, "Introduction to Genetic Algorithms", Springer Publications Co., 2010.
- [19] J.G.Ziegler and N.B.Nichols, "Optimum settings for automatic controller", ASME Trans, Vol64, 1942, pp.759-768.
- [20] W.K.Ho.C.C.Hang. and J.H.Zhou,"performance and gain and phase margins of well-known PI tuning formulas", IEEE Transaction. Control systemsTechnology, 1995.
- [21] http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9gulateur_PID
- [22] Mebarki Rafik, «Commande du robot PUMA 560 en Force/Position par la méthode de l'impédance », Mémoire d'ingénieur d'état, École nationale polytechnique, 2005.
- [23] J. C. Basilio and S. R. Matos, "Design of PI and PID Controllers with Transient Performance Specification", *IEEE Transactions on Education*, vol. 45, no. 4, pp. 364-370, November 2002.
- [24] C. A. Smith and A. B. Corripio, "Principles and Practice of Automatic Process Control", John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-47 1-88346-8.

Résumé

La régulation de niveau de liquide dans les systèmes hydrauliques à trois réservoirs est un problème classique de la régulation industrielle. Dans ce système, nous avons considéré trois réservoirs ayant chacun une superficie égale. . L'objectif général est de suivre le point de consigne et stabiliser le niveau en appliquant diverses stratégies de contrôle.

Tout d'abord, nous avons présenté la modélisation dynamique de deux systèmes hydrauliques, système de réservoirs de premier ordre et système à trois réservoirs non interactifs. Cette modélisation est étudiée avec un débit non linéaire et linéaire. Après on a fait un test de simulation est présenté pour illustrer le comportement dynamique du système en fonction des variations du coefficient de refoulement de la vanne de sortie de chaque réservoir.

Le réglage PID est un système de contrôle permettant d'améliorer les performances d'un asservissement contient trois différents paramètres proportionnelle-intégrale-dérivée. Ce contrôleur est le plus préféré, plus robuste, mise en œuvre facile et simplifié. En appliquant diverses méthodes de réglage du paramètres PID pour contrôler et répondre aux besoins d'un processus : la méthode Ziegler-Nichols, la méthode Cohen Coon et la méthode des critères d'intégration minimale d'erreurs (IAE, ITAE, ISE), en utilisant Simulink/Matlab suivi par une comparaison entre eux pour défini le meilleur index qui affiche les meilleures performances.

Mots-clés : Systèmes hydrauliques, Modélisation mathématique, Commande d'un système à trois réservoirs, **MATLAB-SIMULINK**.

Abstract

Liquid level regulation in three-tank hydraulic systems is a classic problem of industrial regulation. In this system, we considered three reservoirs each with an equal surface area. The overall objective is to follow the set point and stabilize the level by applying various control strategies.

First, we presented the dynamic modelling of two hydraulic systems, a first-class tank system and a three-tank, non-interactive system. This modelling is studied with a non-linear flow and linear flow. A simulation test was then carried out to illustrate the dynamic behaviour of the system as a function of the variations in the discharge coefficient of the outlet valve of each tank.

The PID setting is a control system to improve the performance of a servo contains three different proportional-integral-derived parameters. This controller is the most preferred, more robust, easy to implement and simplified. Applying various PID parameter adjustment methods to control and meet the needs of a process: the Ziegler-Nichols method, the Cohen Coon method and the minimum error integration criteria method (IAE, ITAE, ISE), using Simulink/Matlab followed by a comparison between them to define the best index that displays the best performance.

Keywords: Hydraulic systems, Mathematical modelling, Control of a three-tank system, MATLAB-SIMULINK.

ملخص

يعد تنظيم مستوى السائل في الأنظمة الهيدروليكية ثلاثية الخزانات مشكلة كلاسيكية للتنظيم الصناعي. في هذا النظام، لدينا ثلاثة خزانات لكل منها مساحة سطح متساوية. الهدف العام هو اتباع نقطة التحديد وتثبيت المستوى في الخزانات من خلال تطبيق استراتيجيات مراقبة مختلفة.

أولاً، قدمنا النمذجة الديناميكية لنظامين هيدروليكيين، نظام خزان من الدرجة الأولى ونظام ثلاثي الخزانات غير تفاعلي. تتم دراسة هذه النمذجة بتدفق خطي وغير خطي. تم إجراء اختبار محاكاة لتوضيح السلوك الديناميكي للنظام بدلالة الاختلافات في معاملات التفريغ لكل صهريج.

نقوم بتحسين أداء النظام بواسطة PID والذي هو عبارة عن نظام تحكم يحتوي على ثلاثة معايير مختلفة مشتقة من التكامل النسبي. وحدة التحكم هذه هي التنفيذ الأكثر تفضيلاً وقوة وسهولة وتبسيطاً.

نقوم بتطبيق طرق مختلفة لضبط معاملات PID و التحكم في احتياجات العملية وتثبيتها : طريقة Ziegler-Nichols، طريقة Cohen Coon وطريقة الحد الأدنى من معايير تكامل الخطأ (IAE، ITAE، ISE)، في الأخير نقارن بين الطرق الثلاث لتحديد أفضل مؤشر يعرض أفضل أداء لنظام الهيدروليكي.

الكلمات المفتاحية : الانظم الهيدروليكية، النمذجة الرياضية، التحكم في نظام ثلاثي الخزانات، ماتلاب/سيمولنك