

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Électrotechnique

Spécialité : Commandes Électriques

Par : SLAMA Souad et MENOUAR Samiya

Sujet

Commande non linéaire d'un système hydraulique à deux réservoirs

Soutenu en vidéo conférence le 23 / 06 / 2022 , devant le jury composé de :

Mme. BERAZZAK Nawal	MAA	Université de Tlemcen	Président
M.LOUCIF Mourad	MCB	Université de Tlemcen	Examinateur
Mr. GORINE Ali	MCB	Université de Tlemcen	Encadreur
M. BENHABIB Mohamed Choukri	Professeur	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2021 /2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

Nous tenons à remercier tout d'abord « Allah », le tout puissant, qui nous a donné le courage, la force et la patience pour bien mener ce modeste travail.

Nous exprimons nos profonds remerciements à nos encadreurs,

GORINE ALI

Mr BENHABIB MOHAMED CHOUKRI

pour la confiance qui nous a accordé, pour sa patience, son entière disponibilité, ses encouragements et ses précieux conseils pour structurer le travail, nous le remercions vivement.

Nous remercions vivement Monsieur BOUMEDIENNE ABDELMADJID le chef de département de génie électrique pour sa disponibilité et sa générosité.

Nous remercions également tous les membres de jury d'avoir accepté de juger notre travail.

Enfin, que tous ceux qui ont attribués de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire trouvent ici l'expression de nos profondes gratitude.

Mes vives salutations.

Dédicaces

Je désire dédier les fruits de ce modeste travail

A celle qui est dans mon cœur, qui a veillé pour notre confort Et qui a sacrifié beaucoup pour notre réussite : Ma chère Mère HALIMA.

A celui qui m'a toujours appris comment réfléchir avant D'agir,
à celui qui m'a soutenu tout au long de ma vie scolaire et universitaire, à
celui qui n'a jamais épargné un effort pour mon bien :

Mon cher Père MOHAMED.

Qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années De sacrifices
et de privations pour m'aider à avancer dans
la vie A ma belle-sœur zahriya et souad et ses fille iman et zineb et zakiya
et sa famille

à mes chers frère, à mes anges neveu et nièces et ma petite fille
particulièrement fadwa

à toute la famille SLAMA

A mes chères amis de fédération nationale de la société civil Tlemcen
(anes,adam,kader ,nassim et khalifa ,zineb ,kaltoum,ghizlan,kheirachiraz,
iman ,siham,farah et bohra) et amies qui m'ont accompagné tout au
Long de ce parcours universitaire

Ma binôme SAMYA

Et à tous ceux qui me sont chères

SOUAD

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :
La personne la plus chère dans le monde, la lumière de
ma vie, celle qui a sacrifié et a souffert les plus belles
années de sa vie pour me voir un jour réussir :

♥♥ Ma chère mère♥♥

A mon très cher frère houari et ma très chère sœurs
fatima.

A mon bras droit dans ma vie et dans ce travail slama
souad.

A mes amis mekki zineb, Guenoune Boumedienne
(diden)

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

Tous mes camarades de la promotion Master II ELT et
tous les autres sans exception.

samya

Table de Matières

Liste Des Tableaux.....	I
Liste des Figures.....	II
Notation et symbols.....	III
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Présentation des systèmes hydrauliqueà deux réservoirs couplé	2
I. Introduction.....	3
I.1 Systèmes hydrauliques	3
I.2 Présentation des systèmes hydraulique à réservoir couplé.....	4
1. Un cas de SISO avec 2 réservoirs	4
2. Un cas de système à trois réservoirs	5
3. Un cas de MIMO avec des réservoirs quadruples	6
I.3 Description du système hydraulique à deux réservoirs couplés.....	6
Conclusion.....	7
Chapitre 02 Modélisation dédié à la commande de niveau d'eau pour deux réservoirs	8
II. Introduction	9
II.1 Modélisation et contrôle du réservoir couple non corrigé	9
II.1.1 Système a réservoir unique	9
2.2 Système à deux réservoirs.....	10
3. Synthèse de loi de commande par mode glissant	12
3.1. idée de base de la commande par mode glissant.....	13
3.2. Méthode générale de synthèse par mode glissant	13
3.3Cas du système à réservoir unique.....	15
3.4 Cas du système à réservoirs couplés	19
4. Synthèse loi commande par backstepping :.....	22

4.1. Généralités sur le principe du backstepping	22
5. conclusion :	29
Chapitre 03 Simulations et interprétation des résultats	30
3.1 Introduction	31
3.2 Simulation du système hydraulique a deux réservoirs non corrigée	31
3.2.1 Système a réservoir unique	31
3.2.2 Système à deux réservoirs.....	32
3.3 Simulation des systèmes hydrauliques a deux réservoirs corrigés par mode glissant....	33
3.3.1 Système a réservoir unique	33
3.3.2 Système a deux réservoirs couplé	34
3.4 Simulation du système hydraulique à deux réservoirs corrigés par backstepping	35
Conclusion.....	36
Conclusion générale	37
Bibliographie.....	39

Liste Des Tableaux

Table 1 les paramètres du système hydraulique à deux réservoir	12
--	----

Liste des Figures

Figure I-1 Schéma de principe du système réservoirs couplés	5
Figure I-2 Schéma de principe du système a trois réservoirs.....	6
Figure I-3 Schéma de principe du système à quatre réservoirs	6
Figure I-4 Système hydraulique à deux réservoirs	7
Figure II-1 configuration du réservoir 1	9
Figure II-2 Configuration des deux réservoirs	11
Figure II-3 la surface de glissement	13
Figure II-4 Schéma bloc de la commande du système par mode glissant.....	15
Figure II-5 Schéma de principe de la commande par backstepping	23
Figure III-1 système à un seul modèle	31
Figure III-2 Modèle à réservoir unique non corrigé.....	32
Figure III-3 modèle deux réservoirs.....	32
Figure III-4 Modèle de réservoir couplé	33
Figure III-5 Système à réservoir unique corrigée par mode glissant	34
figure III-6 erreur entre la référence et la référence corrigé par mode glissant	35
Figure III-7 Système à deux réservoirs couplés corrigée par mode glissants	35
Figure III-8 Système hydraulique a deux réservoirs corrigé par backstepping.....	36

Notation et symbols

SMC:sliding mode controller .

PID:proportionnel intégral dérivé.

MIMO :multiple-input multiple output.

SISO: mono_input mono output.

f_{i1} : Débit d'entré volumique du réservoir1.

η : Constante.

k_p : La constante de flux volumétrique de la pompe.

A_{t1} : La section transversale interne du réservoir 1.

V_p : L'entrée Tension de la pompe réelle.

f_{o1} : Débit de sortie du réservoir1.

A_{o1} : la section transversale de sortie.

V_{o1} : vitesse de sortie du réservoir 1.

g : Constante gravitationnelle sur terre.

L_1 : Le niveau d'eau dans le réservoir 1.

D_{o1} : Le diamètre de sortie du réservoir1.

f_{i2} : Débit d'entré du deuxième réservoir.

f_{o2} : Débit de sortie du deuxième réservoir.

A_{o2} : La section transversale de sortie du deuxième réservoir.

v_{o2} : vitesse de sortie du deuxième réservoir.

L_2 : Le niveau d'eau dans le réservoir 2.

D_{o2} : Le diamètre de sortie du réservoir2.

At2: La section transversale interne du réservoir 2.

n: Ordre du système contrôlé.

λ : Constante positive.

e : Erreur.

Introduction générale

La régulation du niveau de liquide dans les systèmes hydrauliques aux réservoirs couplés est un problème classique de la régulation industrielle. Elle doit pomper et stocker des liquides dans un réservoir de stockage, puis les pomper vers un autre réservoir de stockage. Souvent, les liquides sont traités chimiquement ou mélangés dans le réservoir, mais le niveau du réservoir doit être vérifié fréquemment et le débit entre les réservoirs doit être ajusté. Ces réservoirs sont couplés entre eux de sorte que les niveaux de liquide interagissent, ce qui doit également être contrôlé. Les industries importantes qui sont indispensables pour le contrôle du niveau du liquide comprennent l'industrie du papier, l'industrie pharmaceutique, l'industrie pétrochimique, etc..... [11]

Il existe de nombreuses stratégies et méthodes de régulation et de commande du niveau du liquide dans les systèmes à réservoirs couplés, parmi lesquelles on peut citer : les régulateurs PID à boucle simple et multiples, la commande non-linéaire, la commande par mode glissant, la commande par Backstepping, etc. Plusieurs méthodes de synthèse de lois de commande sont basées sur des modèles mathématiques du système commandé. Certaines de ces techniques nécessitent une bonne compréhension du modèle. Mais ils peuvent entraîner une dégradation significative des performances et même une perte de stabilité. Cependant, les systèmes réels se comportent souvent différemment des modèles mathématiques en raison des variations de paramètres et des phénomènes physiques négligés ainsi que des perturbations externes. [1] et [11].

L'objectif de ce travail consiste à présenter et simuler le système hydraulique à deux réservoirs couplés, puis nous essayons d'implémenter une loi de commande par mode glissant pour ce système [25], puis nous appliquons une loi de commande Backstepping. Ensuite, nous allons simuler le système avec les différentes commandes à l'aide du logiciel Matlab .Enfin ce projet sera terminé par une comparaison entre les résultats obtenu par les deux commandes qu'on a appliquées.

Chapitre 1

**Présentation des systèmes hydraulique à
deux réservoirs couplé**

I. Introduction

La régulation du niveau du liquide dans les systèmes hydrauliques à réservoirs couplés est un problème classique et fondamental de la régulation industrielle. En général, de nombreuses applications industrielles sont concernées par la régulation de niveau tel que la colonne à distillation et les chaudières dans les industries pétrochimiques, la fabrication du papier et le traitement des eaux exigent que les liquides soient pompés, stockés dans des réservoirs.[1]

Dans ce chapitre, nous allons décrire les différents systèmes utilisant des réservoirs pour le stockage de liquides qui existe.

I.1 Systèmes hydrauliques

Les systèmes hydrauliques sont utilisés dans de nombreux domaines industriels tels que le domaine énergétique d'une centrale électrique, le domaine mécanique d'un cylindre, et même une zone de stockage avec réservoirs. Ces domaines sont les plus couramment utilisés. [02]

L'origine du mot hydraulique vient du grec qui (HYDRAULIKOS) ce sont deux mots (HYDOR) pour l'eau et (AULOS) pour les tuyaux [03]. Le premier système, s'appelé la fontaine CLAUDE DENIS, c'est une pompe à eau près de l'étang de CLAGNY Conduit par des chevaux. Le système a été créé par CLAUDE DENIS en 1639, témoin de nombreux développements. Depuis le XVIIe siècle, les scientifiques essayez d'imaginer une machine qui amène l'eau de la Seine à Versailles. En 1817, la machine de MARLY est remplacée par une machine à vapeur conçue par CECILE et MARTN. Et depuis le XXe siècle les ingénieurs utilisent des pompes pour créer un système qui utilise des fluides [04].

L'objectif d'un système hydraulique spécifique peut varier, mais tous les systèmes hydrauliques fonctionnent selon le même concept de base. Définis simplement, les systèmes hydrauliques fonctionnent et exécutent des tâches en utilisant un fluide sous pression. On peut aussi dire que le fluide sous pression fait fonctionner les choses.

Les principaux composants d'un système hydraulique sont le réservoir, la pompe, la ou les vannes et le ou les actionneurs (moteur, cylindre, etc.). Commençons par :

- **Réservoir** : Le but du réservoir hydraulique est de contenir un volume de fluide, de transférer la chaleur du système, de permettre aux contaminants solides de se déposer et de faciliter l'évacuation de l'air et de l'humidité du fluide.

- **Pompe** : La pompe hydraulique transmet l'énergie mécanique en énergie hydraulique. Cela se fait par le mouvement du fluide qui est le moyen de transmission. Il existe plusieurs types de pompes hydrauliques, notamment à engrenages, à palettes et à pistons. Toutes ces pompes ont des sous-types différents destinés à des applications spécifiques, comme une pompe à piston à axe courbe ou une pompe à palettes à déplacement variable. Toutes les pompes hydrauliques fonctionnent sur le même principe, qui consiste à déplacer un volume de fluide contre une charge ou une pression résistante.
- **Valves** : Les valves hydrauliques sont utilisées dans un système pour démarrer, arrêter et diriger l'écoulement du fluide. Les valves hydrauliques sont constituées de clapets ou de tiroirs et peuvent être actionnées par des moyens pneumatiques, hydrauliques, électriques, manuels ou mécaniques.
- **Actionneurs** : Les actionneurs hydrauliques sont le résultat final de la loi de Pascal. C'est là que l'énergie hydraulique est reconvertie en énergie mécanique. Cela peut se faire à l'aide d'un cylindre hydraulique qui convertit l'énergie hydraulique en mouvement linéaire et en travail, ou d'un moteur hydraulique qui convertit l'énergie hydraulique en mouvement rotatif et en travail. Comme pour les pompes hydrauliques, les cylindres hydrauliques et les moteurs hydrauliques comportent plusieurs sous-types différents, chacun étant destiné à des applications spécifiques.

I.2 Présentation des systèmes hydraulique à réservoir couplé

Un problème important dans l'industrie des procédés est le contrôle du niveau de liquide et du débit entre les réservoirs dans un système de réservoirs couplés, ce problème a été étudié par certains chercheurs, dont voici trois cas d'études qui ont été fait :

1. Un cas de SISO avec 2 réservoirs : C'est un système relativement quadratique, qui peut être contrôlé par un PID saturé à gain élevé. Le modèle dynamique du système couplé à deux réservoirs est illustré sur la figure I.1. Le débit dans le réservoir 1 est q_1 , le débit entre les deux réservoirs 1 et 2 à travers la vanne est q_{12} , en fin le débit de sortie du réservoir 2 à travers la vanne est q_2 est le débit. Les variables h_1 et h_2 représentent le niveau de liquide dans les réservoirs 1 et 2 respectivement. La vanne

reliant les deux réservoirs permet à l'eau de s'écouler du réservoir 1 vers le réservoir 2, et la vanne reliée à la sortie du réservoir 2 permet une sortie d'eau vers un autre réservoir. L'entrée de contrôle de l'unité est le débit q_1 , la sortie contrôlée du système est le niveau du liquide dans le réservoir 2 h_2 . Une pompe centrifuge est utilisée pour alimenter le premier réservoir à partir du réservoir principal [25].

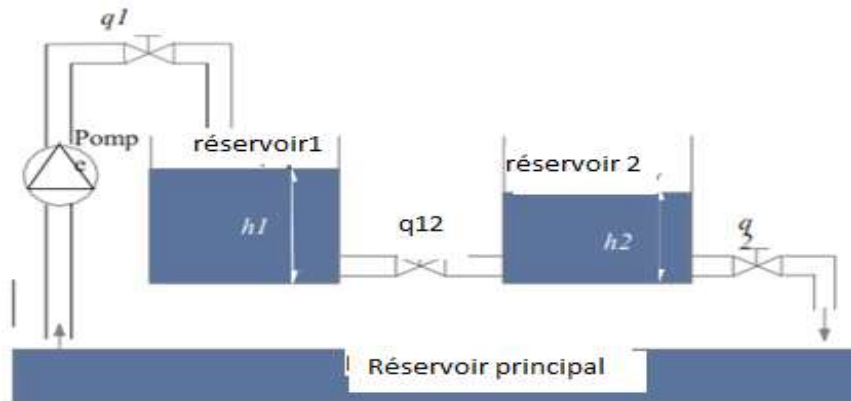


Figure 0-1 Schéma de principe du système réservoirs couplés

2. Un cas de système à trois réservoirs : Le système à trois réservoirs se compose de trois réservoirs cylindriques, L'alimentation en eau distillée une section A, et est connectée en série par des tuyaux cylindriques de la même section S_n . La ligne de liaison entre les réservoirs T_1 et T_2 est équipée d'un dispositif de réglage manuel pour contrôler le débit de la ligne de liaison à l'aide des vannes à bille a_{z1} et a_{z2} . L'unité dispose d'un tuyau de sortie qui est situé au fond du réservoir T_3 . Il y a également trois tuyaux installés au fond de chaque réservoir, qui sont directement connectés (sortie) au réservoir par des vannes à bille b_{z1} , b_{z2} et b_{z3} , qui ne peuvent être actionnées que manuellement. Les pompes 1 et 2 sont alimentées par l'eau d'un réservoir situé en dessous des trois réservoirs avec des débits $q_1(t)$ et $q_2(t)$ respectivement. Les mesures de mesures de niveau $h_1(t)$, $h_2(t)$ et $h_3(t)$ nécessaires sont effectuées par des capteurs de pression différentielle piézo-résistifs [28].

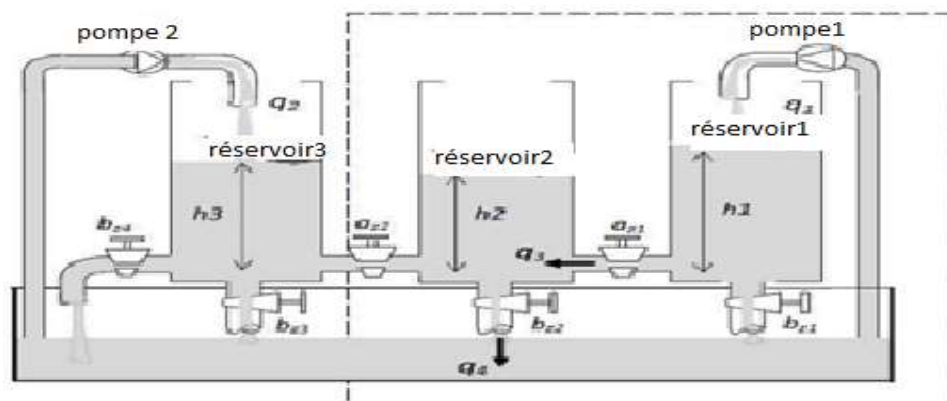


Figure 0-2 Schéma de principe du système à trois réservoirs

3. Un cas de MIMO avec des réservoirs quadruples : Le diagramme de système à quatre réservoirs est présenté sur la figure ci-dessous. Les variables h_1 à h_4 désignent les niveaux de liquide dans les quatre réservoirs respectivement. L'objectif est de contrôler les niveaux h_1 et h_2 dans les réservoirs inférieurs avec deux pompes centrifuges dont les entrées des processus sont les tensions d'entrée des pompes u_1 et u_2 . D'un autre côté nous avons deux réservoirs en haut avec un contrôle des niveaux h_3 et h_4 [25].

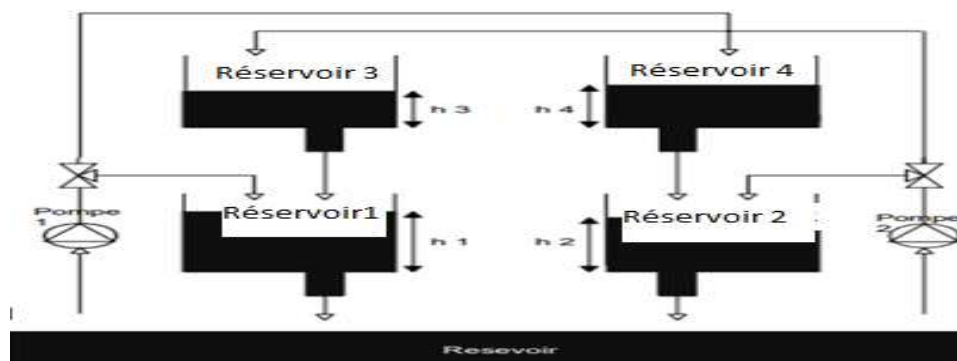


Figure 0-3 Schéma de principe du système à quatre réservoirs

I.3 Description du système hydraulique à deux réservoirs couplés

L'étude de contrôle de niveau de liquide dans un ou deux réservoirs est considérée comme un type d'étude et d'analyse de contrôle des systèmes hydrauliques. Le réglage du niveau peut être effectué dans un ou deux réservoirs en modifiant le débit de la pompe. Le système à réservoir

unique composé du réservoir supérieur est illustré par la figure ci-dessous dont la quelle la pompe alimente le réservoir 1, le réservoir 2 n'est pas du tout pris en compte. Dans ce système, on peut considérer la tension de la pompe comme l'entrée du processus et sa sortie est le niveau de liquide dans le réservoir 1. Le modèle du système à réservoir unique déterminé en rapportant le débit volumétrique d'entrée f_{i1} dans le réservoir et le débit d'écoulement f_{o1} sortant par le trou au niveau du réservoir.[5]

Concernant le réservoir couplé, en plus des variables d'entrée et de sortie du système, nous considérons le niveau L_1 dans le réservoir 1 et le niveau L_2 dans le réservoir 2 comme des variables d'états du système.

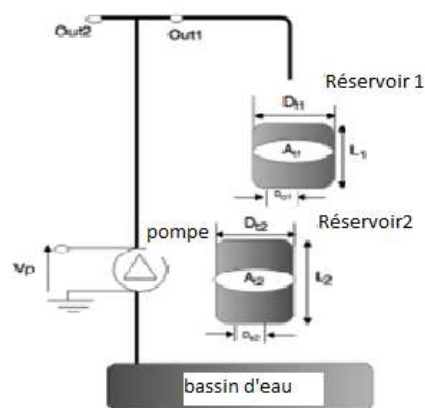


Figure 0-4 Système hydraulique à deux réservoirs

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes structures de systèmes à base de réservoir avec une description des cas d'étude qui ont été déjà réalisés. De plus dans ce chapitre, nous avons donné un bref aperçu de l'état de l'art des systèmes hydrauliques. Pour terminer de ce chapitre on a parlé des systèmes hydrauliques à deux réservoirs.

Chapitre02

**Modélisation dédié à la commande de
niveau d'eau pour deux réservoirs**

II. Introduction

Le contrôle non linéaire du niveau de liquide dans un système hydraulique composé de plusieurs réservoirs est un problème de contrôle non linéaire typique. De nombreux chercheurs du monde entier ont proposé le contrôle de niveau de liquide dans un système à deux réservoirs. Certains chercheurs utilisent des régulateurs classiques tels que le régulateur Proportionnel, Intégral, Dérivé (PID) ainsi que d'autres types de régulateurs dont on peut citer le régulateur en configuration parallèle PID flou pour contrôler les systèmes à deux réservoirs. Le contrôle non linéaire tel que mode glissant et le contrôle par backstepping sont des méthodes efficaces pour un contrôle robuste de ce type de système.

Dans ce chapitre, nous présentons un modèle dynamique non linéaire du système hydraulique à deux réservoirs non corrigé. Nous appliquons ensuite deux techniques de contrôle au système hydraulique, la première commandée par le mode glissant [12], et la deuxième basée sur la commande backstepping [12].

II.1 Modélisation et contrôle du réservoir couple non corrigé

II.1.1 Système à réservoir unique

Un système à réservoir unique composé d'un réservoir supérieur est illustré sur la figure 1. Ce réservoir d'alimentation de la pompe 1. Donc, l'entrée de ce processus est la tension de la pompe et sa sortie est le niveau d'eau dans le réservoir 1.

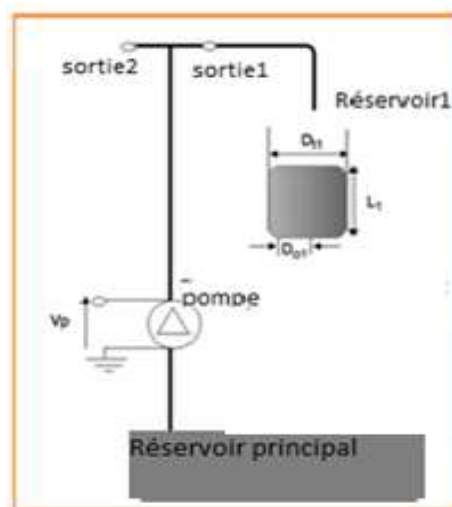


Figure 0-1 configuration du réservoir 1

Le modèle du système à réservoir unique déterminé par :

L'entrée : la tension de la pompe $u(t)$.

La sortie : le niveau d'eau dans le réservoir $L_1(t)$.

La relation entre la tension d'alimentation de la pompe $u(t)$ et le débit d'entrée peut s'écrire :

$$f_{i1} = \eta u(t) \quad (1)$$

$$f_{o1} = A_{o1} \cdot V_{o1} \quad (2)$$

Avec :

f_{i1} : Débit volumique d'entrée du réservoir 1.

f_{o1} : Débit volumique de sortie du réservoir 1.

A_{o1} : La section transversale de sortie du réservoir 1

V_{o1} : vitesse de sortie du premier réservoir 1.

$\eta = \frac{K_p}{A_{t1}}$ est une constante.

K_p est la constante de flux volumétrique de la pompe

$u(t) = V_p$ est la tension d'entrée de la pompe.

On utilisant l'équation de Bernoulli :

$$V_{o1} = \sqrt{2g L_1} \quad (3)$$

La section transversale du sortie du réservoir 1 est donnée par :

$$A_{o1} = \frac{1}{4} \pi D_{o1}^2 \quad (4)$$

En remplaçant l'équation (3) dans (2) Le débit de sortie du réservoir 1 devient :

$$f_{o1} = A_{o1} \sqrt{2g L_1} \quad (5)$$

De plus, en utilisant le principe du bilan massique du réservoir 1, on obtient l'équation différentielle du premier ordre suivante :

$$A_{t1} \left(\frac{dL_1}{dt} \right) = f_{i1} - f_{o1} \quad (6)$$

Avec :

A_{t1} La section transversale interne du réservoir 1

En remplaçant les équations (1) et (2) dans l'équation (6) nous obtenons :

$$\frac{dL_1}{dt} = \frac{\eta V_p - A_{o1} \sqrt{2g L_1}}{A_{t1}} \quad (7)$$

$$\frac{dL_1}{dt} = - \frac{A_{o1} \sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{L_1} + \frac{K_p}{A_{t1}^2} V_p \quad (8)$$

2.2 Système à deux réservoirs

Un schéma de l'installation de réservoirs couplés est représenté par la suivante :

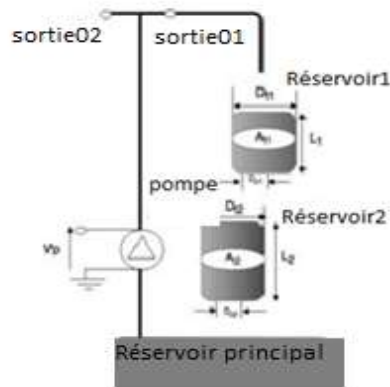


Figure 0-2 Configuration des deux réservoirs

Dans cette configuration, la pompe alimente en liquide le réservoir 1, qui à son tour alimente en liquide le réservoir 2. Pour le réservoir 1, nous conservons la même équation différentielle représentée dans la section (1). Cependant, pour modéliser le système à deux réservoirs, nous considérons les variables d'entrée et de sortie du sous-système contenant le deuxième réservoir assavoir :

L'entrée : le débit de sortie du premier réservoir f_{01} .

La sortie : le niveau d'eau dans le deuxième réservoir L_2 .

Le débit de sortie le réservoir 2 peut être exprimé comme :

$$f_{02} = A_{02}V_{02} \quad (9)$$

Avec :

f_{02} : Débit de sortie du deuxième réservoir.

A_{02} : La section transversale de sortie du deuxième réservoir.

V_{02} : vitesse de sortie du deuxième réservoir.

En utilisant l'équation de Bernoulli, vitesse de sortie du réservoir 2 est donnée par :

$$V_{02} = \sqrt{2}\sqrt{gl_2} \quad (10)$$

La section transversale de sortie du réservoir 2 peut être calculé par :

$$A_{02} = \frac{1}{4}\pi D_{02}^2 \quad (11)$$

On remplaçant V_{02} dans l'équation (8), nous obtenons :

$$f_{01} = A_{02}\sqrt{2}\sqrt{gl_2} \quad (12)$$

Le débit entrant dans le réservoir 2 est donné par :

$$f_{i2} = A_{01} \sqrt{2g} \sqrt{l_1} \quad (13)$$

De plus en utilisant le principe du bilan massique pour le réservoir 2, nous obtenons l'équation différentielle du premier ordre suivante :

$$A_{t2} \left(\frac{dL_2}{dt} \right) = f_{i2} - f_{o2} \quad (14)$$

En remplaçant les équations (12) et (13) dans l'équation (14) on obtient :

$$\frac{dL_2}{dt} = \frac{A_{01} \sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{L_1} - \frac{A_{02} \sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{L_2} \quad (15)$$

Les paramètres du système sont donnés au tableau 1 ci-dessous [26].

Table 1 les paramètres du système hydraulique à deux réservoir

Symbole	Nom	Valeur paramétrique
A_{t1}	La section transversale interne du réservoir 1	20 cm ²
A_{t2}	La section transversale interne du réservoir 2	20 cm ²
A_{01}	La section transversale de sortie du premier réservoir	3.8 cm ²
A_{02}	La section transversale de sortie du deuxième réservoir	3.8 cm ²
K_p	Constante de flux volumétrique de la pompe	$7.687 \times \frac{10^{-4} m^3}{s} . v$
g	Constante de gravité	9.81 m/sec ²
l_1	Niveau de liquide au réservoir 01	/
l_2	Niveau de liquide au réservoir 02	/

3. Synthèse de loi de commande par mode glissant

La commande par mode glissant est une méthode relativement simple à implémenter (par rapport à d'autres approches de commande) elle fait partie des commandes dites à structure variable.

Cette méthode s'applique à la fois aux systèmes linéaires et aux systèmes non linéaires

Utilisé dans différents application : Régulation, suivie de trajectoires, suivie de modèle, observateurs, etc

La commande par mode glissant est une suite logique de la commande discontinue (dans sa forme la plus facile : commande bang-bang).

3.1. Idée de base de la commande par mode glissant

Le principe de ce type de commande se compose de deux étapes :

1. Amener le système sur un hyperplan de commutation stable (surface de glissement) il est claire dans figure ci-dessous numéro 01.
2. Converger vers le d'équilibre désiré en suivant la surface de glissement (numéro 02 dans la figure ci-dessus) [27].

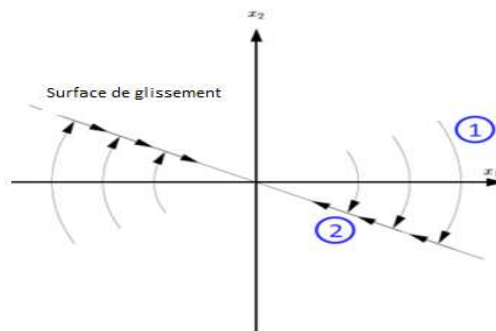


Figure 0-3la surface de glissement

3.2. Méthode générale de synthèse par mode glissant

- **Dynamique du système à commander**

On considère la représentation d'état du système non linéaire donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x) + g(x).u \end{cases}$$

Avec : $f(x)$, $g(x)$ deux fonctions non linéaires, avec $g(x) \geq g_0 > 0$

- L'objectif de la commande est de stabiliser le système autour de son point d'équilibre :

$$x_d = (x_{1d}, x_{2d}) = (0, 0)$$

- **Dynamique de glissement**

La dynamique de x_1 est stable pour : $\dot{x}_2 = -\alpha x_1$, $\alpha > 0$

Soit la variété : $s = x_2 + \alpha x_1$, $\alpha > 0$

Donc : $\dot{x}_1 = x_2 = -\alpha x_1 + s$

La dynamique de x_1 est stable si $s=0$

- S : est une surface appelée surface de commutation ou surface de glissement.
- Sur la surface de glissement définie par $s=0$
- La vitesse de convergence dépend de la valeur de α
- Mais sur cette surface $\dot{x}_2 = -\alpha x_1$ donc x_2 converge aussi vers 0
- L'évolution sur la surface de glissement est indépendante de $f(x)$ et $g(x)$.
- Si au départ, le point initial n'est pas sur la surface de glissement, il faudra amener le système sur cette surface [27].

- **Dynamique de convergence vers la surface de glissement**

On a $s=x_2 + \alpha x_1$ avec $\alpha > 0$

$$\dot{s} = \dot{x}_2 + \alpha \dot{x}_1 = f(x) + g(x)u + \alpha x_2$$

$$V(s) = \frac{1}{2}s^2$$

Stabilité asymptotique si $\begin{cases} V(s) \text{ doit être définie positive} \\ \dot{V}(s) \text{ doit être définie négative} \end{cases}$

$$V(s) \text{ définie positive} \Rightarrow \begin{cases} V(0) = 0 \\ V(s) > 0 \quad \forall s \neq 0 \end{cases}$$

Alors on Calcule maintenant sa première dérivée [27] :

$$\dot{V}(s) = \frac{dV(s)}{dt} = \frac{\partial V(s)}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial t} = s\dot{s} = s[f(x) + g(x)u + \alpha x_2]$$

- **La loi de commande**

$$\dot{V}(s) = s[f(x) + g(x)u + \alpha x_2]$$

La commande équivalente est donnée par :

$$\dot{s} = 0 \Rightarrow f(x) + g(x)u_{eq} + \alpha x_2 = 0$$

$$\text{Donc : } u_{eq} = -\frac{f(x) + \alpha x_2}{g(x)} = \beta(x)$$

La commande équivalente est définie par :

$$u_{eq} = \beta(x)$$

La commande discontinue

La commande discontinue et le deuxième terme de l'expression de u c'est-à-dire $-\text{Ksign}(s)$

La commande globale

La commande proposée comporte deux termes : le premier correspond à une commande continue et le deuxième correspond à une commande discontinue.

$$U = u_{eq} + u_s$$

$$u_s = k_s \text{sign}(s)$$

u_s La commande discontinue [28]

Pour quel condition $\dot{V}(s)$ est définie négative ?

$$\dot{V}(s) = sk_s \text{sign}(s) = sk_s \frac{|s|}{s} = k_s |s|$$

On voit bien que $\dot{V}(0) = 0$

Pour que $\dot{V}(s)$ soit négative il faut que k_s soit négative.

3.3 Cas du système à réservoir unique

La figure ci-dessous présente le schéma bloc de la commande du système par mode glissant

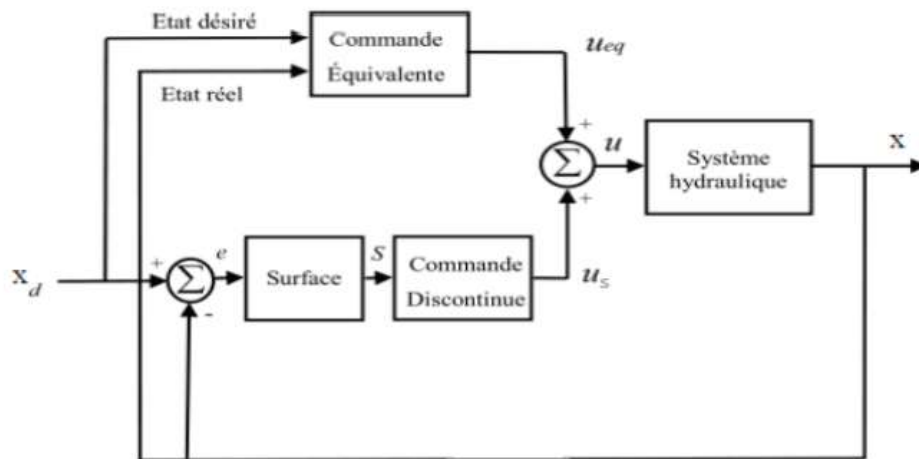


Figure 0-4 Schéma bloc de la commande du système par mode glissant

Conception d'un contrôleur à mode glissant pour réservoir 1 :

On pose que :

$$f \geq 0 \quad (16)$$

Par conséquent :

$$L_1 \geq L_2 \quad (17)$$

On pose :

$$L_1 = Z_1, \quad L_2 = Z_2 \quad (18)$$

$$\begin{cases} K_1 = \frac{A_{01}\sqrt{2g}}{A_{t1}} \\ K_2 = \frac{A_{02}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \end{cases} \quad (19)$$

Nous supposons que :

$$\begin{cases} A_{01} = A_{02} \\ A_{t1} = A_{t2} \end{cases} \Rightarrow K_1 = K_2 = K$$

Le modèle d'état du système devient :

$$\begin{cases} \frac{dL_1}{dt} = -K\sqrt{Z_1} + \eta u \\ \frac{dL_2}{dt} = K\sqrt{Z_1} - K\sqrt{Z_2} \end{cases} \quad (20)$$

$$Y = Z_1 \quad (21)$$

On considère les variables X tel que :

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

Qui nous permet d'effectuer la transformation $x = T(L)$ la représentation d'état du système devient :

$$\begin{cases} x_1 = L_1 \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} x_2 = \dot{x}_1 = -K\sqrt{L_1} + \eta u \end{cases} \quad (24)$$

Finalement la dynamique du système à réservoir couplé peut être réécrite comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = \frac{k}{2\sqrt{x_1}} \dot{x}_1 \end{cases} \quad (26)$$

Donc :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{k}{2\sqrt{x_1}} (k\sqrt{x_1} + \eta u) \end{cases} \quad (27)$$

Cette dernière représentation est de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f + \phi u \end{cases} \quad (28)$$

Avec :

$$\begin{cases} f = \frac{K^2}{2} \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} \phi = -\frac{K^2}{2\sqrt{x_1}} \eta \end{cases} \quad (30)$$

La surface de glissement est donnée par :

$$S(x) = \left[\left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right) \right]^{n-1} e \quad (31)$$

Pour $n = 2$ la surface de glissement est donnée par :

$$s = \frac{de}{dt} + \lambda e = \lambda e + \dot{e} \quad (32)$$

Avec :

λ : Constante positive qui interprète la bande passante du contrôle désiré.

e : l'erreur entre la sortie et la référence.

Soit :

$$\begin{aligned} e &= l_{1r} - l_1 \\ e &= x_{1r} - x_1 \end{aligned} \quad (33)$$

x_{1r} : La référence du débit du premier réservoir.

La dérivée de l'équation (41) nous donne :

$$\dot{s} = \lambda \frac{de}{dt} + \ddot{e} = \lambda \dot{e} + \ddot{e} \quad (34)$$

D'où :

$$\dot{s} = \lambda \dot{e} + (\ddot{x}_{1r} - \ddot{x}_1) \quad (35)$$

Afin de trouver la commande équivalente, en considère que la dérivée de la surface de glissement est nul :

$$\dot{s} = 0 \Rightarrow \lambda \dot{e} + (\ddot{x}_{1r} - \ddot{x}_1) = 0 \quad (36)$$

D'après équation (28) : $\ddot{x}_1 = \dot{x}_2$

En remplaçant (29) dans (45):

$$\lambda \dot{e} + (\ddot{x}_{1r} - (f + \phi u_{eq})) = 0 \quad (37)$$

$$\lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1r} - \frac{-k}{2\sqrt{l_1}} (-K_1 \sqrt{l_1} + \eta U_{eq}) = 0 \quad (38)$$

$$\text{Donc :} \quad u_{eq} = \frac{-f(x)}{\phi(x)} + \frac{\lambda \dot{e}}{\phi(x)} + \frac{\ddot{x}_{1r}}{\phi(x)} \quad (39)$$

A cause des paramètres du système et des perturbations, nous pouvons

Obtenir le signal de contrôle comme suit :

$$U = u_{eq} + u_s \quad (40)$$

$$\text{Avec :} \quad u_s = K_x \cdot \text{sgn}(s) \quad (41)$$

u_{eq} : est une consigne d'équilibrage déterminée par le modèle du système, dans ce cas Il s'agit d'un modèle dynamique d'un réservoir. Cette partie est conçue de la manière suivante Contrôle d'équilibre dont le principe repose sur la détermination du comportement du système sur la surface de glissement.

u_s : Le glissement aide à compenser l'incertitude du modèle. Cela consiste en La fonction symbolique " sgn " de la surface de glissement est multipliée par une constante. Surface de glissement [17].

En obtient :

En substituant équation u dans l'équation (49) et on peut la réarranger sous la forme suivante qui est le signal de commande pour le système du réservoir 1 :

$$u = \frac{K_1 \sqrt{l_1}}{\eta} - \frac{2\lambda \sqrt{l_1} \dot{e}_1}{k\eta} - \frac{x_1 r \ddot{2} \sqrt{l_1}}{k\eta} + k_x \operatorname{sgn}(s) \quad (42)$$

Fonction de LYAPUNOV

Il s'agit de formuler une fonction scalaire positive pour les variables du système $(x) > 0$, et sélectionnez la loi de commutation $v(x) < 0$, l'idée est de choisir une fonction scalaire $S(x)$ pour s'assurer que les paires de variables contrôler sa valeur de référence et concevoir une commande v telle que la surface correspond à une fonction de Lyapunov, qui est généralement utilisée assurer la stabilité des systèmes non linéaires.

Pour évaluer la stabilité, on considère la fonction de Lyapunov suivante :

$$V(s) = \frac{1}{2} (s)^2$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} V(0) = 0 \\ V(s) \geq 0 \end{cases}$$

$$\dot{V}(s) = \dot{s}s \quad (43)$$

En remplace l'équation (42) à (43) :

$$\dot{V}(s) = \left(\frac{K_1 \sqrt{l_1}}{\eta} - \frac{2\lambda \sqrt{l_1} \dot{e}_1}{k\eta} - \frac{x_1 r \ddot{2} \sqrt{l_1}}{k\eta} + k_x \operatorname{sgn}(s) \right) \cdot s \quad (44)$$

On à l'erreur statique est nulle donc : $x_1 r = 0$

On obtient:

$$\dot{V}(s) = k_x \operatorname{sgn}(s) \cdot s \quad (45)$$

On sait que $\operatorname{sgn}(s) = \frac{|s|}{s}$

$$\dot{V}(s) = k_x \operatorname{sgn}|s| \quad (46)$$

Par conséquent, $K_x > 0$

3.4 Cas du système à réservoirs couplés

En considérant la dynamique de l'égalité pour le réservoir 2, les équations suivantes sont considérées pour contrôler le réservoir 2.

$$\frac{dL_2}{dt} = \frac{-A_{02}\sqrt{2}\sqrt{gl_2}}{A_{t2}} + \frac{A_{01}\sqrt{2}\sqrt{gl_1}}{A_{t2}} \quad (47)$$

On pose :

$$k_3 : \frac{A_{01}\sqrt{2g}}{A_{t2}}, \quad k_4 : \frac{A_{02}\sqrt{2g}}{A_{t2}}$$

$$\text{et} : k_3 = k_4 = k$$

Les équations du modèle dynamique du système sont obtenues à partir de l'équation suivante :

On pose : $L_1 = z_2$

$L_2 = z_1$

$$\dot{z}_2 = -k \cdot \sqrt{z_2} + \eta \cdot u \quad (48)$$

$$\dot{z}_1 = k \cdot \sqrt{z_2} - k \cdot \sqrt{z_1} \quad (49)$$

$$Y = L_2 \quad (50)$$

Le modèle d'état :

$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$ Qui nous permet d'effectuer la transformation $x = T(L)$ la représentation d'état du système devient :

Donc :

$$X_1 = L_2 \quad (51)$$

$$X_2 = k \cdot \sqrt{L_1} - k \cdot \sqrt{L_2} \quad (52)$$

Ainsi, la dynamique de la forme combinée du système de réservoir couplé

Peut-être écrite comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{k}{2\sqrt{z_2}} \dot{z}_2 - \frac{k}{2\sqrt{z_1}} \dot{z}_1 \end{cases} \quad (53)$$

en remplace \dot{z}_2 et \dot{z}_1 par sa valeur :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 & (54) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = \frac{k}{2\sqrt{L_1}} [-k \cdot \sqrt{L_1} + \eta \cdot u] - \frac{k}{2\sqrt{L_2}} [k \cdot \sqrt{L_1} - k \cdot \sqrt{L_2}] & (55) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = \frac{k\eta \cdot u}{2\sqrt{L_1}} - \frac{k^2 \cdot \sqrt{L_1}}{2\sqrt{L_2}} & (56) \end{cases}$$

On a :

$$\dot{x}_1 = X_2 \quad (57)$$

$$\dot{x}_2 = f + \emptyset \cdot u = -\frac{k^2 \cdot \sqrt{L_1}}{2\sqrt{L_2}} + \frac{k\eta \cdot u}{2\sqrt{L_1}} \quad (58)$$

donc :

$$f = -\frac{k^2 \cdot \sqrt{L_1}}{2\sqrt{L_2}} \quad \text{et} \quad \emptyset = \frac{k\eta \cdot u}{2\sqrt{L_1}} \quad (59)$$

Elle peut être exprimée. Définir une surface de glissements(t)

Comme :

$$S = \left[\left(\frac{d}{dt} + \lambda \right) \right]^{n-1} \quad e = \lambda e + e' \quad (60)$$

Avec :

λ : constante positive qui interprète la bonde passante du contrôle désiré .

e : l'erreur, que nous prenons comme référence mesurée, et nous avons obtenus l'équations suivante :

$$e = L_{2r} - L_2 \quad (61)$$

$$e = x_{1r} - x_1 \quad (62)$$

Si nous prenons la dérivée des deux côtés de l'équation, on trouve :

$$S = \lambda \dot{e}_2 + \dot{e}_2 \quad (63)$$

La dérivée de second ordre de l'erreur est obtenue l'équation suivante :

$$\dot{S} = \lambda \dot{e}_2 + (\dot{x}_{1r} - \ddot{x}_1) \quad (64)$$

Idéalement, nous voulons que la surface de glissement soit égale à zéro. Si la surface de glissement est nulle, alors la dérivée de la surface de glissement sera nulle, comme le montrent les équations suivantes :

$$\lambda \dot{e}_2 + (\dot{x}_{1r} - \ddot{x}_1) = 0 \quad (65)$$

$$\lambda \dot{e}_2 + \dot{x}_{1r} - f(x) + \emptyset(x) \cdot u_{eq} = 0$$

$$u_{eq} = \frac{-f(x) + \lambda \dot{e}_2 + \dot{x}_{1r}}{\emptyset(x)} \quad (66)$$

En considérant les paramètres du système et les perturbateurs, nous pouvons obtenir notre signal de commande comme suit :

$$U = u_{eq} + k_x \operatorname{sgn}(s) \quad (67)$$

En substituant u_{eq} dans l'équation, on obtient l'équation suivante qui est le signal de commande du réservoir 2 peut être obtenu :

$$U = \frac{kL_1}{\eta\sqrt{L_2}} + \frac{2\lambda\sqrt{L_2}\dot{e}}{k\eta} + \frac{x_{1r} \cdot 2\sqrt{L_1}}{k\eta} + k_x \operatorname{sgn}(s) \quad (68)$$

Fonction de LYAPUNOV

Pour évaluer la stabilité, on considère la fonction de Lyapunov suivante :

$$V(s) = \frac{1}{2} (s)^2$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} V(0) = 0 \\ V(s) \geq 0 \end{cases}$$

$$\dot{V}(s) = \dot{s}s \quad (69)$$

En remplace (68) à (69)

$$\dot{V}(s) = \left(\frac{kL_1}{\eta\sqrt{L_2}} + \frac{2\lambda\sqrt{L_2}\dot{e}}{k\eta} + \frac{x_{1r} \cdot 2\sqrt{L_1}}{k\eta} + k_x \operatorname{sgn}(s) \right) \cdot s \quad (70)$$

$$\dot{V}(s) = \left(\frac{kL_1}{\eta\sqrt{L_2}} + \frac{2\lambda\sqrt{L_2}\dot{e}}{k\eta} + \frac{x_{1r} \cdot 2\sqrt{L_1}}{k\eta} \right) \cdot s + (k_x \operatorname{sgn}(s)) \cdot s \quad (71)$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroissante, il faut

$$\dot{v}(s) < 0$$

$$\dot{V}(s) = \left(\frac{kL_1}{\eta\sqrt{L_2}} + \frac{2\lambda\sqrt{L_2}\dot{e}}{k\eta} + \frac{x_{1r} \cdot 2\sqrt{L_1}}{k\eta} + k_x \operatorname{sgn}(s) \right) \cdot |s| \quad (72)$$

On à l'erreur statique est nulle donc : $x_{1r} = 0$

$$k_x \operatorname{sgn}(s) \cdot |s| < 0$$

On sait que :

$$\operatorname{sgn}(s) = \frac{|s|}{s} > 0 \quad (73)$$

Donc pour que $\dot{v}(s) < 0$

$$\text{Il faut que } k_x < 0 \quad (74)$$

$\operatorname{Sgn}(s)$ Peut être exprimé comme suite :

$$\text{Sgn}(s) \begin{cases} 1 & s(t) > 0 \\ 0 & s(t) = 0 \\ -1 & s(t) < 0 \end{cases} \quad (75)$$

4. Synthèse loi commande par backstepping :

Le backstepping est une méthode récursive utilisée pour synthétiser le contrôle des systèmes non linéaires. De cette façon, la loi est construite. Les commandes de type retour d'état et les fonctions Lyapunov associées sont exécutées d'une manière ou d'une autre systématiquement simultanément. Il transforme le problème de conception de contrôle. Une gamme de problèmes de conception allant d'un système complet à un système de commande inférieur (principalement scalaire) [18,19].

En profitant de la simplicité et de la flexibilité offertes par le système scalaire, le repli résout souvent les problèmes de stabilité et de suivi. Moins de contraintes que les autres méthodes.

Le terme backstepping signifie remonter la chaîne des intégrateurs pour le contrôle, par la mise en place pas à pas des fonctions de Lyapunov et du contrôle par retour d'état.

Cependant, une limitation de cette approche est qu'elle n'est applicable qu'aux systèmes de la forme triangle inférieur [19].

4.1. Généralités sur le principe du backstepping

4.1.1 Principe de la commande par backstepping

La technologie de backstepping fournit une approche systématique et complète pour une classe de systèmes non linéaires avec des formes triangulaires. C'est basé sur l'ensemble du système de contrôle, généralement d'ordre supérieur, est décomposé en une mise en cascade des sous-systèmes de contrôle de premier ordre. Pour chaque sous-système, une loi dite contrôle virtuel est calculée. Ce dernier servira de référence pour les sous-systèmes suivants jusqu'à l'obtention de la loi de commande du système complet. La loi de commande à appliquer est synthétisée dans la dernière étape. Il doit s'assurer qu'à tout moment, la stabilité globale du système de régulation lors du suivi ou de la régulation des travaux.

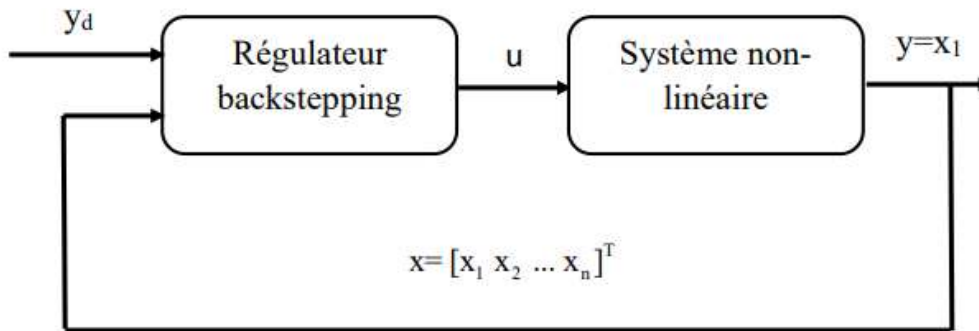


Figure 0-5 Schéma de principe de la commande par backstepping

4.2 Les principaux avantages et inconvénients posés par la commande Backstepping

Comme avantages la commande Backstepping assure :

- Simplicité dans la démarche de la conception d'une telle commande.
- Utilisable en non linéaire.
- Suivi de consigne avec rejet de perturbation de manière satisfaisante. → Assure la stabilité du système commandé, (elle est basée sur la théorie de Lyapunov)

Inconvénients : L'utilisation de la technique de Backstepping pour la commande non linéaire d'un système d'ordre n , peut provoquer des difficultés qui présentent des obstacles pour les convergences des grandeurs du système, parmi ces difficultés les principaux problèmes posés par la commande par Backstepping sont :

- **Le choix des gains :** Le grand problème de cette technique de commande non linéaire, c'est le choix des gains positives pour obtenir la convergence de la majorité des grandeurs de système au même temps, par ce que le choix de certain gain améliorera convergence de certain grandeur et perturbé les convergences des autres grandeurs. Ce qui nécessite faire plusieurs essais pour le choix de ces gains, et plus l'ordre de système est supérieur plus le choix est difficile.
- **L'algorithme de calcul :** Pour obtenir des bon résultats, il faut choisir par Précision de l'algorithme des pas précises de calcul après l'initialisation des valeurs de système.
- **la limitation des valeurs de la commande :** Les saturations des grandeurs de la commande peu perturbé la convergence du système, il faut d'abord choisir des valeurs minimales des grandeurs de commande qui assurés la convergence [24].

4.3. Méthode générale de synthèse backstepping

Cette méthode convient aux systèmes avec des triangles dits inférieurs, par exemple. Comme indiqué ci-dessous [19] :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_n = f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)u \end{cases} \quad (76)$$

$$y = x_1$$

Avec :

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T, \quad X \in \mathbb{R}, u \in \mathbb{R}$$

Pour illustrer le processus récursif d'inférence inverse, nous considérons la sortie système désire suivre le signal de référence y_d le système étant d'orden n , la mise en ouvre s'effectué alors en n étapes [13.14].

Etape 01 :

Commençons par la première équation du système (76) ou x_2 Il sera considéré Commandes virtuelles intermédiaires. Notez la première référence requise :

$$x_{1d} = \alpha_0 = y_d \quad (77)$$

Ce qui conduit à l'erreur de poursuite suivante :

$$e_1 = x_1 - \alpha_0 \quad (78)$$

Ainsi sa dérivée est :

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{\alpha}_0$$

$$\dot{e}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0 \quad (79)$$

Pour un tel système, nous proposant d'abord la fonction de Lyapunov v_1 sous une forme quadratique :

$$v_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (80)$$

Sa dérivée temporelle est :

$$\dot{v}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0 \quad (81)$$

Le choix de x_2 nous permet d'assurer la stabilité du système (la condition \dot{v}_1 défini négative).

Pour cela, prenons $x_2 = \alpha_1$ telle que :

$$f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0 = -K_{1B}e_1 \quad (82)$$

$K_{1B} > 0$ est une constante de conception.

Ainsi, la loi de commande pour le système(79) sera donné par :

$$\alpha_1 = x_2 = \frac{1}{g_1(x_1)} (-K_{1B}e_1 - f_1(x_1) + \dot{\alpha}_0) \quad (83)$$

Ce qui implique :

$$\dot{v}_1 = -K_{1B}e_1^2 \quad (84)$$

Etape 2 :

La nouvelle référence désirée sera la variable de commande pour le sous-système précédent :

$$x_{2d} = \alpha_1 \quad (85)$$

L'erreur de régulation :

$$e_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (86)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 = f_2(x_1, x_2)x_3 - \dot{\alpha}_1 \quad (87)$$

Pour le système (87), la fonction de Lyapunov étendue est :

$$v_2 = v_1 + \frac{1}{2}e_2^2 = -\frac{1}{2}(e_1^2 - e_2^2) \quad (88)$$

Dont la dérivée est :

$$\dot{v}_2 = \dot{v}_1 - e_2\dot{e}_2 = -K_1e_1^2 + g_1(x)e_1e_2 + f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 - \dot{\alpha}_1 \quad (89)$$

Le choix de x_3 qui stabilisera la dynamique du système(87), et rendra \dot{v}_2 définit négative est :

$$x_3 = \alpha_2 \quad (90)$$

Tel que :

$$g_1(x_1)e_1 + f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 - \dot{\alpha}_1 = -K_{2B}e_2^2 \quad (91)$$

$K_{2B} > 0$ est une constante de conception.

Ainsi, la loi de commande pour le système (91) sera donnée par :

$$\alpha_2 = \frac{1}{g_2(x_1, x_2)}(-K_2e_2 + \dot{\alpha}_1 - f_2(x_1, x_2) - g_1(x_1)e_1) \quad (92)$$

Avec :

$$\dot{\alpha}_1 = \frac{g_1(x_1)[-K_1\dot{e}_1\ddot{\alpha}_0 - \dot{f}_1(x_1)] - [-K_1e_1 + \dot{\alpha}_0 - f_1(x_1)]g_1(x_1)}{g_1^2(x_1)} \quad (93)$$

Un tel choix implique que :

$$\dot{v}_1 = (-K_1e_1^2 - K_2e_2^2) \quad (94)$$

Etape n :

De la même façon, pour cette étape, la référence à suivre sera :

$$x_{(n)d} = \alpha_{n-1} \quad (95)$$

D'où l'erreur de poursuite :

$$e_n = x_n - \alpha_{n-1} \quad (96)$$

Sa dérivée temporelle est :

$$\dot{e}_n = \dot{x}_n - \dot{\alpha}_{n-1} = f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)u - \dot{\alpha}_{n-1} \quad (97)$$

La fonction de Lyapunov étendue est :

$$\mathbf{v}_n = \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2 + \dots + \frac{1}{2} \mathbf{e}_n^2 = \frac{1}{2} (\mathbf{e}_1^2 + \mathbf{e}_2^2 + \dots + \mathbf{e}_n^2) \quad (98)$$

Sa dérivée est :

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{v}}_n &= \dot{\mathbf{v}}_1 + \dot{\mathbf{v}}_2 + \dots + \mathbf{e}_n \dot{\mathbf{e}} \\ &= -K_1 \mathbf{e}_1^2 - K_2 \mathbf{e}_2^2 + \dots + g_{n-1}(x_1, \dots, x_{n-1}) \mathbf{e}_{n-1} \mathbf{e}_n + \mathbf{e}_n (f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)u - \alpha_{n-1} \dot{\mathbf{e}}_{n-1}) \end{aligned} \quad (99)$$

Dans cette dernière étape, on est arrivé à déduire la loi de commande pour le système entier.

Un bon choix doit satisfaire :

$$g_{n-1}(x_1, \dots, x_{n-1}) \mathbf{e}_{n-1} + f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)u - \alpha_{n-1} \dot{\mathbf{e}}_{n-1} \quad (100)$$

Où $K_n > 0$ est une constante de conception.

Ainsi, la loi de commande pour le système entier sera donnée par :

$$u = \frac{1}{g_n(x_1, \dots, x_n)} (-K_n \mathbf{e}_n + \alpha_{n-1} \dot{\mathbf{e}}_{n-1} - f_n(x_1, \dots, x_n) - g_{n-1}(x_1, \dots, x_n) \mathbf{e}_{n-1}) \quad (101)$$

Ce qui garantit la négativité de la dérivée de la fonction de Lyapunov étendue :

$$\dot{\mathbf{v}}_n = -K_1 \mathbf{e}_1^2 - K_2 \mathbf{e}_2^2 - \dots - K_n \mathbf{e}_n^2 \quad (102)$$

Cette fonction est définie négative, ce qui implique la convergence de toutes les erreurs vers zéros.

Donc, la commande par le Backstepping, qui est une méthode basée sur la méthode directe de Lyapunov. On a constaté que la synthèse des lois de commande par cette technique récursives est systématique, et simple, tous en stabilisant notre système [19].

4.4. Application de la commande par backstepping au système hydraulique

Le but de cette section est d'utiliser la technique de backstepping pour la commande du système hydraulique à deux réservoirs

D'après l'équation différentielle du premier ordre du bilan massique du réservoir 1 on a :

$$A_{t1} \left(\frac{dL_1}{dt} \right) = f_{i1} - f_{o1} \quad (103)$$

Avec :

$$f_{i1} = f_{o2} = A_{o2} V_{o2} \quad (104)$$

$$V_{o2} = \sqrt{2} \sqrt{g l_2} \quad (105)$$

$$f_{o1} = A_{o1} \cdot V_{o1} \quad (106)$$

$$V_{o1} = \sqrt{2} \sqrt{g l_1}$$

Et pour l'équation différentielle du premier ordre du bilan massique du réservoir 1 on a :

$$A_{t2} \left(\frac{dL_2}{dt} \right) = f_{i2} - f_{o2} \quad (107)$$

En remplaçant les équations (104) et (106) dans l'équation (103) nous obtenons :

$$\frac{dL_1}{dt} = \frac{-A_{01}\sqrt{2g}}{A_{t1}}\sqrt{l_1} + \frac{A_{01}\sqrt{2g}}{A_{t1}}\sqrt{l_2} \quad (108)$$

Avec :

$$f_{i2} = \eta \cdot u(t) \quad \text{et} \quad \Gamma : \frac{K_p}{A_{t2}} \quad (109)$$

$$f_{i2} = \frac{K_p}{A_{t2}} \cdot u(t) \quad (110)$$

$$f_{02} = A_{02}\sqrt{2}\sqrt{gl_2}$$

En remplaçant les équations (109) et (110) dans l'équation (107) nous obtenons :

$$\frac{dL_2}{dt} = \frac{-A_{01}\sqrt{2g}}{A_{t2}}\sqrt{l_2} + \frac{K_p}{A_{t2^2}} \cdot u(t) \quad (111)$$

Donc :

Systeme à réservoir unique :

$$\frac{dL_1}{dt} = \frac{-A_{01}\sqrt{2g}}{A_{t1}}\sqrt{l_1} + \frac{A_{01}\sqrt{2g}}{A_{t1}}\sqrt{l_2} \quad (112)$$

Systeme à réservoir couplé :

$$\frac{dL_2}{dt} = \frac{-A_{01}\sqrt{2g}}{A_{t2}}\sqrt{l_2} + \frac{K_p}{A_{t2^2}} \cdot u(t) \quad (113)$$

On pose :

$$k_1 : \frac{-A_{01}\sqrt{2g}}{A_{t1}}, \quad k_2 : \frac{A_{01}\sqrt{2g}}{A_{t1}}$$

$$k_3 : \frac{-A_{02}\sqrt{2g}}{A_{t2}}, \quad k_4 : \frac{K_p}{A_{t2^2}}$$

alors :

$$\frac{dL_1}{dt} = k_1 \cdot \sqrt{l_1} + k_2 \cdot \sqrt{l_2} \quad (114)$$

$$\frac{dL_2}{dt} = k_3 \cdot \sqrt{l_2} + k_4 \cdot u(t) \quad (115)$$

Le modèle de Backstepping :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = k_1 \cdot \sqrt{x_1} + x_2 & (116) \\ \dot{x}_2 = u & (117) \end{cases}$$

Etape 01 :

On commence par le premier système :

$$\dot{x}_1 = k_1 \cdot \sqrt{x_1} + x_2$$

On a l'erreur de régulation suivante :

$$e_1 = x_{1r} - x_1 \quad (118)$$

Sa dérivée :

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_{1r} - \dot{x}_1 \quad (119)$$

En remplace \dot{x}_1 par sa valeur dans \dot{e}_1

Donc :

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_{1r} - [k_1 \cdot \sqrt{x_1} + x_2]$$

$e_1 \rightarrow 0$ on considère fonction Lyapunov

$$v_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (120)$$

Sa dérivée temporelle :

$$\dot{v}_1 = e_1 \cdot \dot{e}_1 \quad (121)$$

En remplace \dot{e}_1 par sa valeur :

$$\dot{v}_1 = e_1 \cdot [\dot{x}_{1r} - (k_1 \cdot \sqrt{x_1} + x_2)] \quad (122)$$

La dérivée de la fonction de Lyapunov doit prendre la valeur suivante pour qu'elle soit négative :

$$\dot{v}_1(e_1) < 0 :$$

$$\dot{v}_1(e_1) = -K_{b1} \cdot e_1^2 \quad (123)$$

avec $K_{b1} > 0$

Par identification (122) et (123) on obtient :

$$\dot{v}_1 = e_1 \cdot [\dot{x}_{1r} - (k_1 \cdot \sqrt{x_1} + x_2)] = e_1 (-K_{b1} \cdot e_1) \quad (124)$$

$$\dot{x}_{1r} - (k_1 \cdot \sqrt{x_1} + x_2) = -K_{b1} \cdot e_1 \quad (125)$$

$$x_2 = \alpha_1 = -K_{b1} \cdot e_1 - \dot{x}_{1r} - k_1 \cdot \sqrt{x_1} \quad (126)$$

Etape 02 :

$$\dot{x}_{2r} = \alpha_1 \text{ et } \dot{x}_2 = u$$

D'où l'erreur de régulation :

$$e_2 = x_2 + \alpha_1 \quad (127)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 \quad (128)$$

$$\dot{e}_2 = u - \dot{\alpha}_1$$

La fonction de Lyapunov étendue est :

$$v = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 \quad (129)$$

Avec $v > 0$

Sa dérivée est :

$$\dot{v} = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 \quad (130)$$

$$\dot{v} = -k_{1B} e_1^2 + e_2 [\dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1] \quad (131)$$

$$\dot{v} = -k_{1B} e_1^2 + e_2 [u - \dot{\alpha}_1] \quad (132)$$

Par identification (132) on obtient :

$$[u - \dot{\alpha}_1] = -k_{1B} e_2^2 \quad (133)$$

Donc on trouve la commande :

$$u = \dot{\alpha}_1 - k_{1B} e_2^2 \quad (134)$$

D'après l'étape 1 :

$$\alpha_1 = -k_{1B} e_1 - \dot{x}_{1r} - k_1 \sqrt{x_1}$$

La dérivée :

$$\dot{\alpha}_1 = -k_{1B} \dot{e}_1 - \ddot{x}_{1r} - \frac{k_1}{2\sqrt{x_1}} \quad (135)$$

En remplace \dot{e}_1 on obtient :

$$\dot{\alpha}_1 = -k_{1B} [k_1 \sqrt{x_1} + x_2 - \dot{x}_{1r}] + \ddot{x}_{1r} - \frac{k_1}{2\sqrt{x_1}} \quad (136)$$

5. conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, la modélisation d'un système hydraulique a deux réservoirs son modèle dynamique est un modèle dynamique non linéaire non corrigé. Donc pour corriger le modèle nous avons dédié à l'étude les deux types de commandes la commande par mode glissant et la commande par Backstepping.

Pour la première commande un contrôle en mode glissant pour les réservoirs 1 et 2 conçu en vue d'obtenir, car c'est une approche efficace pour contrôler un système non linéaire en présence de perturbations du modèle. Après mise en œuvre en temps réel, on constate qu'il donne des bons résultats et on conclure par le problème de vibration on proposant un contrôle adaptatif en mode de glissant où la conception de la surface de glissement implique une variable pour l'amélioration du problème de vibration.

Chapitre03

Simulations et interprétation des résultats

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons faire les simulations de notre système qui représente système hydraulique à deux réservoirs en utilisant le logiciel Matlab. Nous avons lors de nos simulations présentées le système à deux réservoirs sans correction puis nous avons fait avec corrections. Puis nous avons interprété les résultats de simulation.

3.2 Simulation du système hydraulique a deux réservoirs non corrigée

Nous avons dans un premier temps présenté les résultats de simulation d'un système constitué d'un seul réservoir et sans correction puis nous avons présenté les résultats de simulation sans correction lorsque nous avons deux réservoirs couplés.

3.2.1 Système a réservoir unique

Le système à un seul réservoir est représenté par la figure suivante :

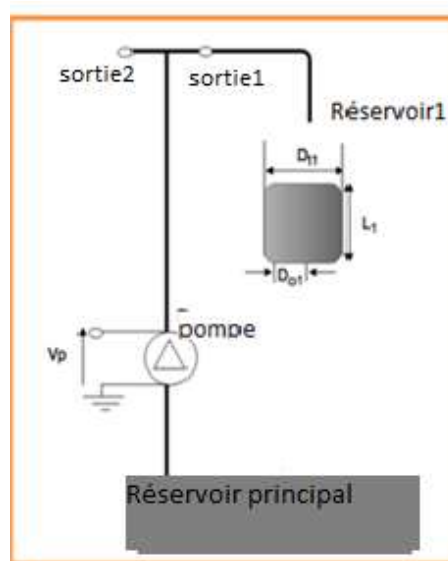


Figure 0-1 système à un seul modèle

La simulation que nous avons obtenue est illustrée par la figure suivante :

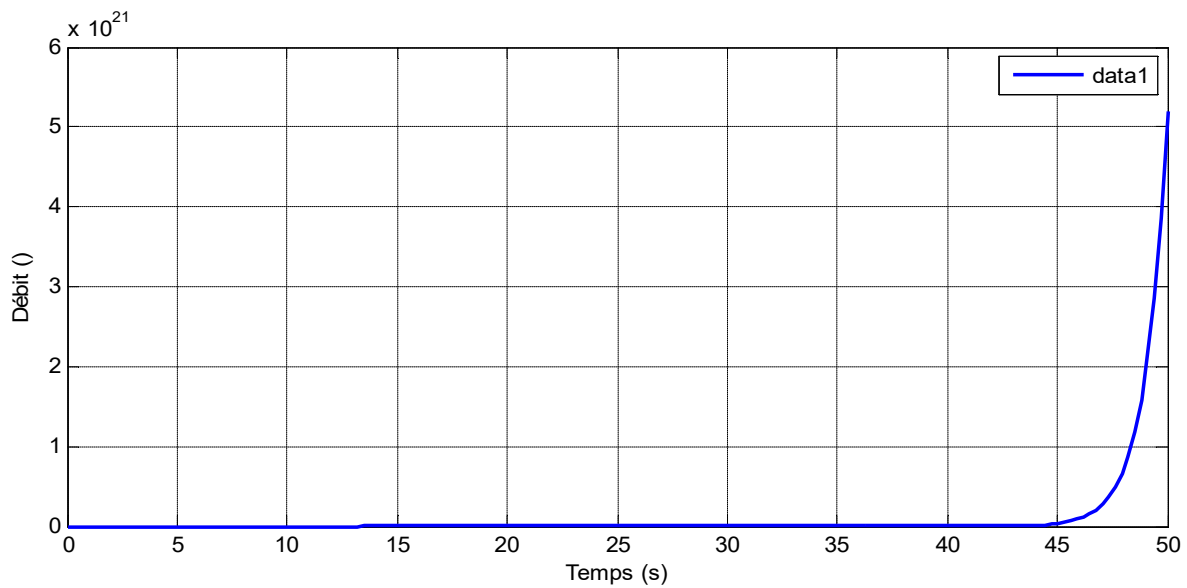


Figure 0-2 Modèle à réservoir unique non corrigé

On remarque de la figure 0-2 que le débit d'un seul réservoir est instable car la réponse diverge vers l'infini. Cette divergence est due du faite qu'il n'y a aucune correction pour corriger le système.

3.2.2 Système à deux réservoirs

Le système à un deux réservoirs est cette fois ci représenté par la figure suivante :

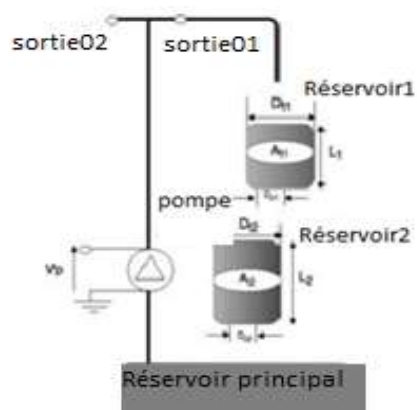


Figure 0-3 modèle deux réservoirs

La simulation que nous avons obtenue est illustrée par la figure suivante :

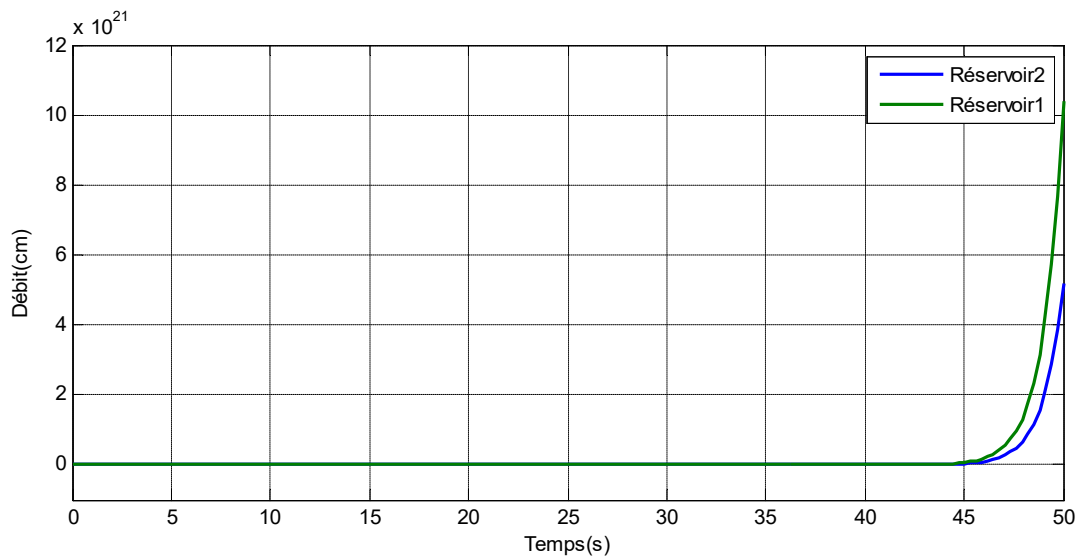


Figure 0-4Modèle de réservoir couplé

On constate de la figure ci-dessus que le débit de deux réservoirs est également instable car la réponse tend vers l'infini. Cette divergence est également due du faite qu'il n'y a aucune correction pour corriger le système.

3.3 Simulation des systèmes hydrauliques a deux réservoirs corrigés par mode glissant

Nous avons présenté dans cette section les résultats de simulation d'un système constitué d'un seul réservoir avec correction en utilisant un régulateur par mode glissant puis nous avons présenté les résultats de simulation avec correction en utilisant toujours un régulateur par mode glissant lorsque nous avons deux réservoirs couplés.

3.3.1 Système a réservoir unique

Pour éliminer la divergence du système à un réservoir et le rendre stable, nous avons utilisé un régulateur par mode glissant pour corriger notre système. Le résultat obtenu après simulation est montré sur la figure suivante :

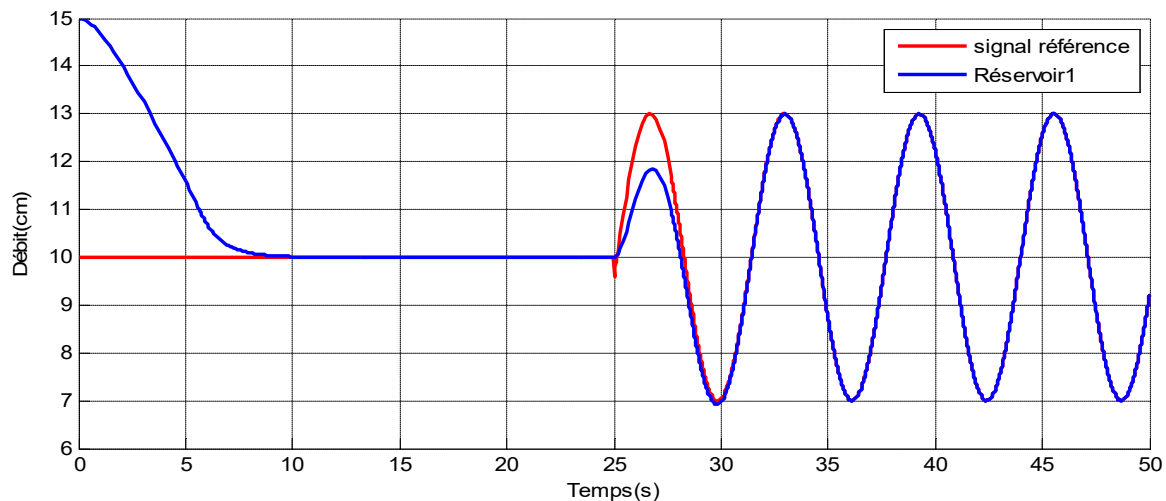


Figure 0-5 Système à réservoir unique corrigée par mode glissant

Le résultat de simulation montré sur la figure 0-5 représente le débit d'un réservoir unique corrigé par mode glissant. Dans l'intervalle de 0 à 25s on remarque que la partie référence est constante et que le système suit le signal de référence au bout de $t=10s$. Concernant l'intervalle de 25s à 50s, le résultat de simulation nous montre que la sortie converge vers la référence en un temps réduit (cinq second) ainsi qu'une erreur statique nulle. De plus nous remarquons que le système est stable et suit bien la référence. Donc le régulateur par mode glissant nous a donné un bon résultat.

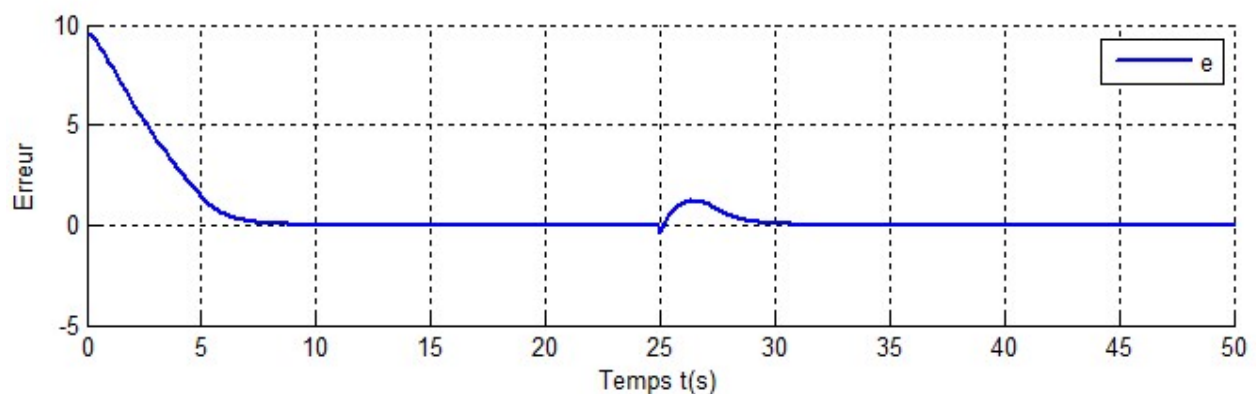


Figure 0-6 erreur entre la référence et la réponse du système corrigé par mode glissant

Le résultats de simulation montre sur la figure 0-6 représente l'erreur entre la référence et la réponse du système corrigé par mode glissant on remarque que l'erreur presque nul

3.3.2 Système a deux réservoirs couplé

Pour éliminer maintenant la divergence du système à deux réservoirs couplé et le rendre stable, nous avons toujours utilisé un régulateur par mode glissant pour corriger notre système. Le résultat de simulation est montré sur la figure suivante :

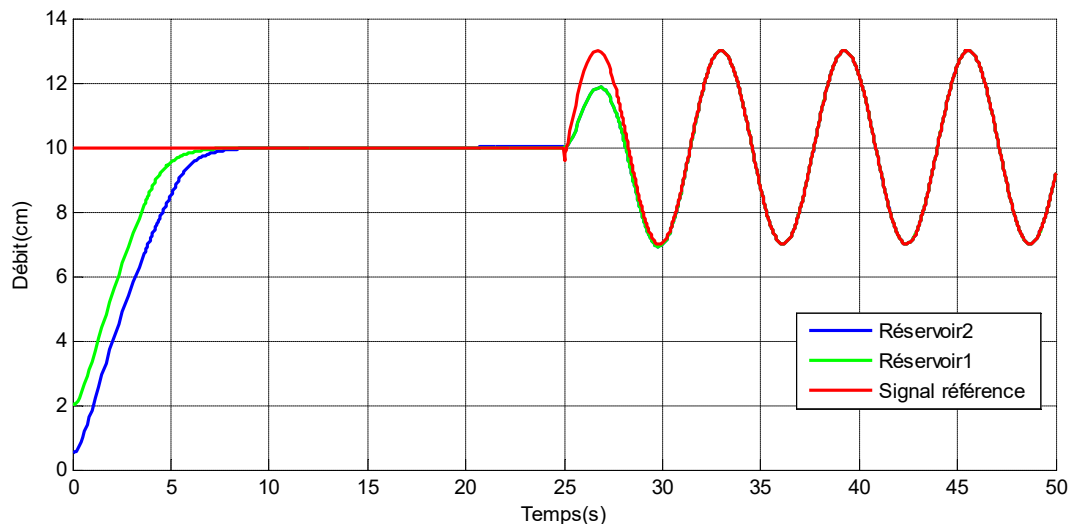


Figure 0-7 Système à deux réservoirs couplés corrigée par mode glissant

Le résultat de simulation montré sur la figure 0-7 représente le débit de deux réservoirs couplé corrigé par mode glissant. Dans l'intervalle de 0 à 25s on remarque que la partie référence est constante et que le système suit la référence au bout de $t=9s$. Cependant, nous remarquons que le réservoir 1 arrive plus rapidement à la référence par rapport au réservoir 2. Concernant l'intervalle de 25s à 50s, le résultat de simulation nous montre que la sortie converge vers la référence en un temps réduit (trois second) ainsi qu'une erreur statique nulle. De plus nous remarquons que le système est stable et suit bien la référence. Donc le régulateur par mode glissant nous a donné un bon résultat. Ces résultats montre que le système de contrôle proposé est capable d'améliorer le suivi efficacement la précision et les réponses du niveau de liquide sont très satisfaisant.

3.4 Simulation du système hydraulique à deux réservoirs corrigés par backstepping

Nous allons présenter dans cette partie le résultat de simulation du système hydraulique à deux réservoirs en utilisant cette fois ci la méthode de régulation appelé backstepping. Nous obtenons après simulation le résultat suivant :

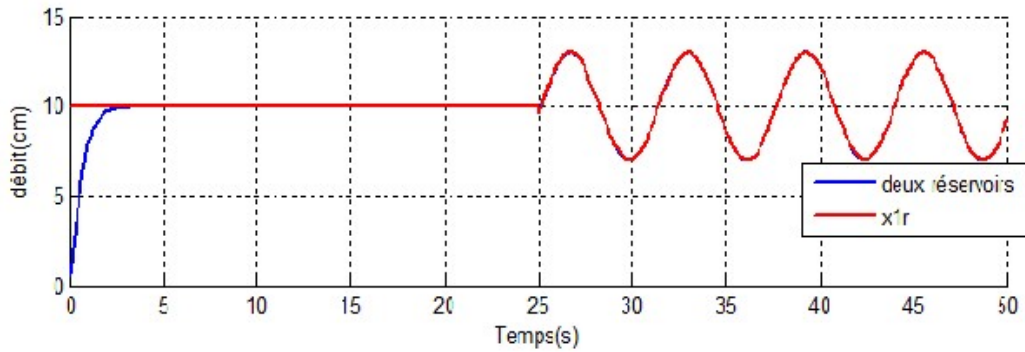


Figure 0-8 Système hydraulique a deux réservoirs corrigé par backstepping

Le résultat de simulation montré sur la figure 0-8 représente le débit de deux réservoirs couplé corrigé par la méthode backstepping. Dans l'intervalle de 0 à 25s on remarque que la partie référence est constante et que le système suit la référence. Cependant, nous remarquons qu'il y a une erreur statique qui apparait entre le signal généré par notre système et la référence, ce que nous n'avons pas observé lorsque nous avons corrigé notre système par mode glissant. Concernant l'intervalle de 25s à 50s, le résultat de simulation nous montre que la sortie converge vers la référence en un temps réduit (trois second) par contre nous avons toujours une erreur statique non nulle.

Comparaison entre le backstepping et mode glissant

D'après les résultats de simulation obtenus par les deux techniques de commande (commande par mode glissant et le backstepping) on conclut que le contrôleur par backstepping fournit une réponse rapide et une erreur statique nulle. Cependant le contrôleur par mode glissant, donne des résultats moins satisfaisants car une erreur statique apparait.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les tests de simulation des lois de commande en utilisant un contrôleur par mode glissant pour un réservoir et deux réservoirs couplé. Puis nous avons fait la simulation pour le backstepping. Puis nous avons montré l'efficacité de l'un par rapport à l'autre.

Conclusion

générale

Dans ce mémoire nous nous sommes intéressés à l'étude d'un système hydraulique à deux réservoirs.

En premier lieu, nous avons présenté la description de ce système hydraulique à deux réservoirs, puis nous avons appliqué au systèmes deux techniques de commande, en l'occurrence, la commande basée sur le mode glissant et la commande par backstepping.

Après avoir fait un état de l'art, puis la modélisation d'un système hydraulique à un réservoir puis à deux réservoirs couplés. Nous avons montré le modèle d'état obtenu qui est un modèle dynamique non linéaire de deuxième ordre où les variables d'état sont les niveaux du liquide dans les deux réservoirs. La variable de sortie étant le niveau dans le deuxième réservoir. La variable d'entrée de commande étant la tension d'alimentation de la pompe qui alimente le premier réservoir.

Après la modélisation du système, nous avons étudié la commande par mode glissant qui a été présentée en deuxième chapitre. Cette approche est basée sur la conception de la surface de glissement. Par la suite et toujours dans le chapitre deux nous avons fait l'étude de la commande backstepping pour ce même système.

Pour terminer nous avons montré les résultats de simulation de notre système sans correction puis avec correction en premier par mode glissant puis ensuite par backstepping. Pour terminer, nous avons interprété les résultats de simulation et montré celui qui à donner les meilleurs résultats.

Bibliographie

-
- [1] P. Wellstead, TecQuipment CE105 Coupled Tanks Apparatus, Control Systems Centre, Manchester, U.K, 1993.
- [02] A. Mahir « Système hydraulique », Université Lille1 Projet IMA4
- [03] https://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_drive_system
- [04]
http://ressources.chateauversailles.fr/IMG/pdf/le_systeme_hydraulique_chronologie_des_travaux_d_adduction.pdf
- [05] 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.
- [06] 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
- [07] J. Pierre Babarry et W. Pelczewski. Commande optimale des systèmes continus déterministes. Edition Masson, Paris, 1985.
- [08] M. Sahraoui, commandes non linéaires de la machine asynchrone, 2012/2013.
- [09] BELKHEIR Med elamine ; HAMDJ Mohamed ; ROUMAIR Triq " Synthèse de lois de commande par mode de glissement avec une surface de glissement non linéaire appliquées à un système Hydraulique " Mémoire d'Ingénierie Université de M'SILA, 2010.
- [10] DJERIOUI Ali ; KHELIFI Faris "Commande et observation par mode glissant des convertisseurs multicellulaires séries " Mémoire d'Ingénierie Université de M'SILA, 2009.
- [11] F.AbuKhadra J.AbuQudeiri, second order sliding mode control of the coupled tanks system, research article, mathematical problems in engineering, 2015
- [12] F. Abu Khadra J.Abu Qudeiri , second order sliding mode control of the coupled tanks system, research article, mathematical problems in engineering ,2015.
- [13] ZORIG Abdelaziz ; BELOUADAH Ahmed hamza " Commande en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone à aimant permanent " Mémoire d'Ingénierie Université de M'SILA, 2006.
- [14] IHADDADENE Kerim ; CHAIBI Madani ; ABDELATIF Billal " Etude comparative entre la commande pi et celle par mode glissant d'un moteur asynchrone triphasé" Mémoire d'Ingénierie Université de M'SILA, 2009.
- [15] NAIDJI Omar "Commande à structure variable appliquée au simulateur de vol d'hélicoptère" mémoire de master Université de M'SILA, JUIN 2012.

-
- [16] AMGHAR Billal ; HEDID Abdelkader "Commande par Fuzzy Sliding Mode d'un variateur de vitesse hydrodynamique" Mémoire d'Ingéniorat Ecole Nationale Polytechnique 2007.
- [17] H. Khebbache, tolérance aux défauts via la méthode backstepping des systèmes non linéaires, mémoire de magistère en automatique, université ferhat Abbas de Setif, 2011.
- [18] L. Douha, Commande adaptative par backstepping en utilisant les réseaux de neurones, Mémoire de magister, Université de Batna, 2004.
- [19] M. Krstic, I. Kannellakopoulos and P. Kokotovic, Nonlinear and adaptive control design, Wiley and Sons Inc, New York, 1995.
- [20] DOUMBIA. M.L, « Outil d'aide à la conception des systèmes d'entraînement de machine électrique, exemple d'application ». Thèse de Ph.D de l'école polytechnique de Montréal. Mai 2000.
- [21] MOHAN. N, UNDELAND. T et ROBBINS. W, « Simulation of Power Electronic and Motion Control Systems – An Overview ». Proceeding of the IEEE, Vol. 82, No 8, August, 1989.
- [22] <https://www.vectorsolutions.com/resources/blogs/what-is-a-hydraulic-system-definition-design-and-components/>
- [23] DJERIOUI Ali ; KHELIFI Faris "Commande et observation par mode glissant des convertisseurs multicellulaires séries " Mémoire d'Ingéniorat Université de M'SILA, 2009.
- [24] Badraoui Mourad «Etude et modélisation du moteur synchrone simple et double étoile avec application de la commande backstepping à la machine synchrone», République Algérienne Démocratique et Populaire, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen Faculté de Technologie Département de Génie Electrique et Electronique.
- [25] Hayriye Tuğba SEKBAN, Kaan CAN , Abdullah BAŞÇI « Real-Time Application of Sliding Mode Controller for Coupled Tank Liquid Level System ». International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers, ISSN: 2147-8228, 2016.
- [26] Houssemeddine Goutaa , Salim Hadj Saida & Faouzi M'sahlia “Predictive and Backstepping Control of Double Tank Process: A Comparative Study”, a Department of Electrical Engineering, National Engineering School of Monastir, University of Monastir, Road Ibn Eljazzar, 5019 Monastir, Tunisia Published online: 24 Jul 2015.
- [27] A. Chemori LIRMM - UMR 5506 161, Rue Ada 34095, Montpellier Cedex 05
- [28] R. BENAYACHE1, S. MAHIEDDINE MAHMOUD, L. CHRIFI ALAOUI, P. BUSSY and J-M. CASTELAIN « Controller design using second order sliding mode algorithm with

an application to a coupled-tank liquid-level » system Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI, EA 3899) Université de Picardie Jules Verne, 13 avenue Francois Mitterrand, F-02880 Cuffies, France. 2Commission Européenne B-1049 Bruxelles, Belgium.

Résumé :

Le travail réalisé dans cette mémoire concerne la commande non linéaire d'un système hydraulique à deux réservoirs, en utilisant des approches issues de la théorie de la commande par mode glissant et backstepping et leurs applications sur le système hydraulique à deux réservoirs. Dans une première partie, on a présenté un bref tour d'horizon sur les systèmes hydrauliques et la description d'un système à deux réservoirs la deuxième partie consiste à la modélisation d'un système non corrigé, ce système sera corrigé par mode glissant et le backstepping. La troisième partie, Des tests de simulations sont effectuées pour valider chaque commande.

Les mots clés : système hydraulique, commande deux réservoirs, mode glissant, backstepping.

Abstract:

The work carried out in this thesis concerns the nonlinear control of a hydraulic system with two tanks, using approaches from the theory of control by sliding mode, backstepping, and their applications on the hydraulic system with two tanks. In the first part, a brief overview of hydraulic systems and the description of a two-tank system is presented. The second part consists of the modeling of an uncorrected system; this system will be corrected by sliding mode and backstepping. The third part, tests simulations are carried out to validate each control.

Key words: hydraulic system, two-tank control, sliding mode, backstepping.

ملخص :

يتعلق العمل المنفذ في هذه الأطروحة بالتحكم غير الخطي في نظام هيدروليكي بخزانين ، باستخدام مناهج من نظرية التحكم عن طريق وضع الانزلاق والخلفية وتطبيقاتها على النظام الهيدروليكي مع خزانين. في الجزء الأول ، قدمنا لمحة موجزة عن الأنظمة الهيدروليكية ووصف نظام به خزانان ، الجزء الثاني يتكون من نمذجة نظام غير مصحح ، وسيتم تصحيح هذا النظام عن طريق وضع الانزلاق والخطوة الخلفية. الجزء الثالث ، يتم إجراء اختبارات المحاكاة للتحقق من صحة كل طلب.

الكلمات الأساسية: النظام الهيدروليكي ، التحكم ثنائي الخزان ، الوضع المنزلق ، الظهر.