

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En Electrotechnique

Spécialité Commandes électriques

ParFritel Cheikh Yacine

EtDjemai wafaaAmani

Sujet

Commande par mode glissant d'un système hydraulique à deux réservoirs

Soutenu publiquement, le 29 / 09 / 2021 , devant le jury composé de :

M/A. MECHERNENE	Maitre de Conférences 'A'	Univ. Tlemcen	Président
M/A. GORINE	Maitre de Conférences 'B'	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
M/A. MALTI	Maitre de Conférences 'A'	Univ. Tlemcen	Co-Directeur de mémoire
M/S.M MELIANI	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur 1

Remerciements

A l'issue de cette étude, je remercie ALLAH clément et miséricordieux tout puissant qui m'a donné tant de courage, de volonté, de patience, de force, de sagesse et d'abnégation pour mener à terme ce mémoire.

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que je remercie mon encadreur

MR: GORINE ALI

MR : MALTI ABED CHOUAIB

Pour avoir accepté de m'encadrer, pour son aide, Son soutien, ses conseils et ses encouragements.

Mes sincères remerciement à l'ensemble des enseignants et le chef de département qui ont contribué à notre formation avec beaucoup de dévouement et de compétence en n'oubliant jamais les personnes qui ont participés de près ou de loin à ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

La personne la plus chère dans le monde, la lumière de ma vie, la source de tendresse, 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 cher père, le plus noble qui par son courage a consacré tous ses efforts, et ses moyens pour m'aider à accomplir ce mémoire, et pour me faire réussir.

A mes chères frères et sœurs

A tous les amis d'études surtout ceux de génie électrique

Table des matières

Introduction générale	9
Chapitre 1	12
1.1 Introduction	12
1.2 Régulateur PID	12
1.3 La commande optimale	13
1.4 La commande par mode glissant	14
1.4.1 Objectif de la commande par mode glissant	14
1.4.2 Domaines d'application de la commande par mode glissant	14
1.4.3 Avantages et inconvénients de la commande par mode de glissement	15
1.5 Commande par Backstepping	15
1.5.1 Principe de la commande par backstepping	16
1.6 Conclusion	17
Chapitre 2	19
1.1 Introduction.....	19
2.2 Modélisation et contrôle du réservoir couplé:	20
2.2.1 Système à réservoir unique.....	20
2.2.2 Système à deux réservoirs	23
2.3 Conclusion	26
Chapitre 3	29
3.1 Introduction.....	29
3.2 Modélisation de réservoir unique	30
3.2.1 Modélisation de réservoir 1 à une référence constante	31
3.2.2 Modélisation de réservoir 1 à une référence variable	34
3.3 Etude de robustesse	36

3.3.1	Modélisation de réservoir 1 a référence constante avec perturbations	37
3.3.2	Modélisation de réservoir 1 à référence variable avec perturbations	39
3.4	Résultat expérimentaux	41
Chapitre 4	45
4.1	Introduction.....	45
4.2	Modélisation de réservoirs couplés	45
4.2.1	Modélisation de réservoir2 à une référence constante	46
4.2.2	Modélisation de réservoir2 à une référence variable	48
4.3	Etude de robustesse	49
4.3.1	Modélisation de réservoir 2 à référence constante avec perturbations	49
4.3.2	Modélisation de réservoir 2 à référence variable avec perturbations	51
4.4	Résultat expérimentaux	55
4.5	Conclusion	57
Conclusion générale	58

Chapitre 1

Figure 1-1 Schéma bloc de la commande par backstepping appliquée au système hydraulique. 16

Chapitre 2

Figure 2- 1: Configuration du réservoir 1 20

Figure 2- 2: Modèle sumilink d'un seul réservoir..... 22

Figure 2- 3: La réponse indicielle du système à un seul réservoir non corrigé..... 22

Figure 2- 4: Configuration des deux réservoirs..... 23

Figure 2- 5: Modèle sumilink des deux réservoirs..... 26

Figure 2- 6: La réponse indicielle du système à deux réservoirs non corrigé..... 26

Chapitre 3

Figure 3. 1 Configuration du réservoir 1. 30

Figure 3. 2 Schéma bloc de la commande par mode glissant..... 31

Figure 3. 3 Représentation de la fonction « Sign ». 32

Figure 3. 4 Schéma bloc de la commande par mode glissant en présence de perturbations. 37

Figure 3. 5 Résultat expérimentale SMC pour les références constante et variable de la configuration du réservoir 1 42

Figure 3. 6 Résultat expérimentale SMC pour les références constante et variable avec une perturbation de la configuration du réservoir 1..... 43

Chapitre 4

Figure 4. 1 Configuration des deux réservoirs. 45

Figure 4. 2 Résultat expérimental SMC pour la référence constante et variable de configuration du réservoir 2..... 55

Figure 4. 3 Résultat expérimental SMC pour la référence constante et variable de configuration du réservoir 2 avec perturbations. 56

Tableau

Tableau 2-1 : les paramètres du système et ses valeurs en temps réel. 25

Abréviations et Symboles

SMC : sliding mode Controller.

PID : proportionnel intégral dérivé.

LQR : linear-quadratic regulator.

MIMO : multiple-input multiple output.

PI : proportionnel intégral.

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

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 réservoir 1.

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 réservoir 1.

f_{i2} : Débit d'entrée 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 réservoir 2.

A_{t2} : La section transversale interne du réservoir 2.

n : Ordre du système contrôlé.

λ : Constante positive.

e : Erreur.

الملخص :

يعد التحكم في الوضع المنزلق طريقة فعالة للتحكم في الأنظمة غير الخطية. يقدم هذا العمل التحكم في مستوى المائع للنظام الهيدروليكي المكون من خزانين باستخدام التحكم في الوضع الانزلاقي غير الخطي للتحكم في مستوى السوائل في الخزانات.

تتكون هذه الأطروحة من الفصل الأول المخصص لاستدعاء الطرق المختلفة المستخدمة للتحكم في مستوى المياه في الخزانات (التحكم الأمثل ، الوضع المنزلق والخلفية الخلفية). يقدم الفصل الثاني نمذجة النظام في الخزانين ونماذج الحالة الخاصة بهما. يقدم الفصلان 3 و 4 التحكم الذي يسمح بالحفاظ على مستوى المياه للخزانين بمرجع ثابت ومتغير

الكلمات المفتاحية

نمط انزلاقي - النظام الهيدروليكي - التحكم في كلا الخزانين

Résumé :

Le contrôle par mode glissant est une méthode efficace pour commander les systèmes non linéaires. Ce travail présente le contrôle du niveau de liquide d'un système hydraulique composé de deux réservoirs en utilisant une commande non linéaire par mode glissant pour commander le niveau de liquide des réservoirs.

Cette thèse est composée du premier chapitre qui est consacré à rappeler les différentes méthodes utilisées pour commander le niveau d'eau dans les réservoirs (PID, commande optimale, mode glissant et backstepping). Le deuxième chapitre présente la modélisation du système dans les deux réservoirs et leurs modèles d'état. Les chapitres 3 et 4 présentent la commande qui permet de maintenir le niveau d'eau des deux réservoirs à une référence constante et variable.

Les mots clés :

Mode glissant, Système hydraulique, Commande des deux réservoirs

Abstract

Sliding mode control is an effective method of controlling nonlinear systems. This work presents the control of the fluid level of a hydraulic system composed of two reservoirs by using nonlinear sliding mode control to control the fluid level of the reservoirs.

This thesis consists of the first chapter which is devoted to recalling the different methods used to control the water level in reservoirs (PID, optimal control, sliding mode and backstepping).

The second chapter presents the modeling of the system in the two reservoirs and their state models. Chapters 3 and 4 present the control which allows to maintain the water level of the two reservoirs at a constant and variable reference

Keywords:

Sliding mode, Hydraulic system, Control of both tanks

***introduction
générale***

Introduction générale

Le contrôle du niveau de liquide dans les réservoirs est un problème fondamental dans l'industrie de transformation. L'industrie de transformation doit pomper et stocker le liquide dans un réservoir de stockage, puis le pomper vers un autre réservoir de stockage. Plusieurs fois, le liquide sera traité dans le réservoir par traitement chimique ou par mélange, mais le niveau de liquide dans le réservoir doit toujours être contrôlé et le débit entre les réservoirs doit être ajusté. Habituellement, les réservoirs de stockage sont couplés entre eux de sorte que les niveaux de liquide interagissent, qui doivent également être contrôlés. Les industries importantes qui sont indispensables pour le contrôle du niveau de liquide comprennent l'industrie du papier, l'industrie pharmaceutique, l'industrie pétrochimique, etc...[1]

La plupart des méthodes de synthèse des lois de commande sont basées sur le modèle mathématique du système à contrôler. Certaines de ces techniques nécessitent une bonne compréhension du modèle. Mais elles peuvent entraîner une dégradation importante des performances et même une perte de stabilité. Cependant, en raison de changements de paramètres et de phénomènes physiques négligés ainsi que des perturbations externes, les systèmes réels ont souvent des comportements différents des modèles mathématiques.

Même si nous disposons d'un très bon modèle, il arrive souvent qu'il soit trop compliqué et doive être simplifié pour synthétiser une commande. Un remède consiste à calculer la loi de commande d'une série de modèles auxquels le système réel devrait appartenir. Si la loi de commande intégrée répond aux exigences de spécification de tous les modèles de la série, elle est dite robuste.

Parmi les lois de commande robuste, facile à calculer et à mettre en œuvre, même pour des systèmes non linéaires, on peut citer la commande par mode glissant. Au cours des trois dernières décennies, cette commande a fait l'objet de recherches approfondies par des chercheurs des différents pays la discussion entre Neimark et Philipov en 1960 fut décisive, car elle souleva de nouvelles questions sur la théorie des modes glissants.

La technique de contrôle par mode glissant consiste à amener le chemin d'état du système jusqu'à la surface de glissement et à utiliser une logique de commutation appropriée autour de celle-ci pour le basculer vers le point d'équilibre, générant ainsi un phénomène de glissement.[2]

Le système de contrôle par mode glissant (SMC) est un système de contrôle non linéaire discontinu dans lequel la structure du contrôleur change entre les deux structures, et le passage d'une valeur à l'autre est basé sur la surface de glissement dans l'espace d'état qui force le point représentant son mouvement à rester sur cet surface, on l'appelle donc l'état de glissement idéal, dans le but d'obtenir une meilleure stabilité et précision que les régulateurs classiques.[1]

**Chapitre I :
Etat de l'art de la
commande
du niveau d'eau dans
des réservoirs**

Chapitre1

1.1 Introduction :

Dans le cas d'un système linéaire à paramètres constants, la loi de commande classique de type PID est très efficace. Pour les systèmes non linéaires ou les systèmes avec des paramètres non constants, ces lois de commande peuvent ne pas être suffisantes car elles ne sont pas robustes, en particulier lorsque la précision et les autres caractéristiques dynamiques du système sont strictes. Une loi de commande insensible aux changements de paramètres, aux perturbations et aux non-linéarités doit être utilisée. La loi de commande dite "par mode glissant" constitue la solution à ces problèmes.

La commande par mode glissant "SMC" est essentiellement une commande non linéaire. Le principe de la commande consiste à amener le chemin d'état du système d'un point quelconque vers la surface de glissement et d'utiliser une logique de commutation appropriée pour le basculer vers le point d'équilibre, le phénomène de glissement. [3]

1.2 Régulateur PID :

Le régulateur standard le plus utilisé dans l'industrie est le régulateur PID (proportionnel, intégrale, Dérivée) car il permet d'utiliser ses trois paramètres pour ajuster les performances (Amortissement, temps de réponse) d'une régulation du processus de deuxième ordre. Il existe de nombreux systèmes physiques, et malgré leur complexité, leur comportement. Il est proche du deuxième ordre sur une certaine échelle de temps. Par conséquent, Les contrôleurs PID conviennent parfaitement à la plupart des types de processus industriels et sont relativement robuste lorsque vous avez de faibles exigences en matière de modifications des paramètres de processus. Les performances de la boucle fermée sont comparées aux performances de la boucle

ouverte (par exemple, Accélération très importante de la réponse ou augmentation très importante de l'amortissement en boucle fermée). Si la dynamique principale du système est supérieure au second ordre, ou si le système contient un grand retard ou plusieurs modes d'oscillation, le régulateur PID n'est plus applicable et devenir un contrôleur plus complexe (avec plus de paramètres) doit être utilisé, au détriment de la sensibilité de modifications des paramètres de processus.

La réalisation de la boucle de régulation PID est un problème très important car elle impacte sur la qualité et le délai de mise en œuvre de la réglementation des sites industriels.

Il y a deux aspects importants à cette réalisation :

- Réglages du régulateur PID, connaissance de son modèle dynamique d'une part, d'autre part, les performances requises déterminent le choix résoudre la résolution.
- Le régulateur est installé en version analogique ou numérique avec configuration série, parallèle ou mixte. [4]

1.3 La commande optimale :

L'optimisation de la conception du contrôle du système est une fonction importante automatique. Le but de la conception est de réaliser un tel système de contrôle.

Le système en boucle fermée est le même que le système requis (le système est imposé en fonction de normes clairement définies). Obtenir de répondre à ces normes requises en minimisant la norme de performance ou l'indice de performance (note J). Les indicateurs de performance sont généralement spécifiés dans le domaine temporel, il est normal pour nous de vouloir développer un programme de conception pendant le processus de conception dans le domaine temporel.

On considère la conception d'un système de contrôle optimisé décrit par la formule de la variable d'état. Nous envisagerons de mesurer la variable d'état est utilisée pour calculer le signal de commande $u(t)$ de sorte que les performances du système sont optimisées. [5]

Les réservoirs de liquide habituellement utilisés dans les installations industrielles ont une importance stratégique. Dans le processus d'application industrielle, il est souvent nécessaire de le stocker dans un réservoir et de le transférer dans un autre réservoir. Il est souvent nécessaire de maintenir le liquide à une certaine hauteur ou dans un certain niveau, vu que le réservoir de stockage de liquide est une partie importante de la ligne de vie et des installations industrielles. Le système de contrôle du niveau de liquide du réservoir de couplage présente les caractéristiques de non-linéarité et de complexité, et sa précision de contrôle est directement affectée par l'état du système et du système paramètres et algorithmes de contrôle.

La commande optimale résout un problème d'optimisation dynamique car les variables de décision sont en fonction du temps, comme la méthode des itérations sur le vecteur de commande (méthode numérique). [6]

1.4 La commande par mode glissant :

Travaux effectués dans ce domaine de la commande de réservoir couplé :

On peut citer quelques thèses (Sliding Mode Control For a Liquid Level System/ Sliding Mode Control of Nonlinear Coupled Tank System, etc..) qui parle de la commande d'un système hydraulique à deux réservoirs couplés.

1.4.1 Objectif de la commande par mode glissant :

L'objectif du contrôle en mode glissant peut se résumer en deux points principaux :

- Synthétiser une surface $S(x, t)$ pour que toutes les trajectoires du système suivent un Le comportement souhaité de poursuite, de régulation et de stabilité.
- $U(t)$ est une loi de commande permet d'acquérir les trajectoires d'état vers la surface de glissements et garder sur cette surface [7]

1.4.2 Domaines d'application de la commande par mode glissant :

Le réglage par mode glissant est un facteur principal du développement dans tous les domaines de la commande .exemple : commande hydraulique ou pneumatique qui a des valves fonction par tout ou rien, possède deux états stables ou complètement ouvert ou fermé.

Entraînements électriques, entraînements pour moteurs ou robots Besoin d'ajuster la vitesse de rotation ou d'ajuster la position. Dans ces circonstances comportement dynamique performant et facile à restreindre certains quantité (telle que le courant et la vitesse de rotation). Il convient de mentionner que dans certains domaines, tels que les procédés chimiques et Métallurgie, il y a un réglage à l'aide d'un régulateur à deux positions. [7]

1.4.3 Avantages et inconvénients de la commande par mode de glissement :

Reconnaître la robustesse du modèle aux perturbations et aux incertitudes les avantages de la commande en mode glissant sont démontrés. Contrairement à la loi contrôle traditionnel, les performances dynamiques restent inchangées le paramètre change quelle que soit l'ampleur de la perturbation appliquée au système. De plus, la réduction de l'ordre du système est un autre avantage de cet ordre, cela peut simplifier la complexité du système. Cependant, ces performances se font au prix de certains inconvénients

Ces performances sont obtenues au prix de certains inconvénients :

- Un phénomène de tremblement causé par des parties discontinues cette commande peut nuire à l'actionneur.
- Le système est constamment sous contrôle haute fréquence afin d'assurer qu'il converge vers l'état souhaité, cela n'est pas conseillé. [7]

1.5 Commande par Backstepping :

Le backstepping est une méthode récursive utilisée pour synthétiser les lois de commande des systèmes non linéaires. De cette façon, la loi de contrôle par rétroaction d'état et la fonction de Lyapunov associée peuvent être construites systématiquement et simultanément. Il transforme le problème de conception du contrôle d'un système complet en une série de problèmes de conception de systèmes de bas niveau (principalement des systèmes scalaires). [8]

En tirant parti de la simplicité et de la flexibilité fournie par le système scalaire, la méthode de backstepping peut généralement résoudre les problèmes de stabilité et de suivi dans des conditions moins restrictives que les autres méthodes. Le terme backstepping signifie que nous remontons la chaîne de l'intégrateur et construisons progressivement des fonctions de Lyapunov et un contrôle de rétroaction. Cependant, une limitation de cette méthode est qu'elle n'est applicable qu'aux systèmes triangulaires inférieurs. [8]

1.5.1 Principe de la commande par backstepping :

La technologie Backstepping propose une méthode de synthèse de système, qui est conçue pour être utilisée pour des systèmes non linéaires avec des formes triangulaires. Il est basé sur une cascade qui décompose l'ensemble du système de contrôle (généralement de haut niveau) en sous-systèmes de contrôle de premier ordre. Pour chaque sous-système, la loi dite de commande virtuelle est calculée. Ce dernier servira de référence pour le sous-système suivant jusqu'à ce que la loi de commande de l'ensemble du système soit obtenue. La dernière étape résume les lois de commande à appliquer. Elle doit toujours assurer la stabilité globale du système d'indemnisation lorsqu'il est poursuivi ou ajusté. Cette méthode convient aux systèmes avec des triangles dits inférieurs. [8]

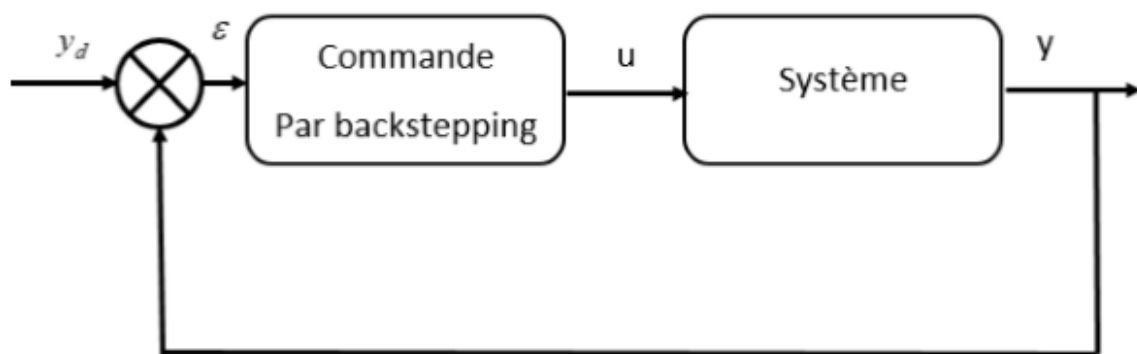


Figure 1-1 Schéma bloc de la commande par backstepping appliquée au système hydraulique.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté des techniques de commande adoptée pour résoudre les problèmes de commande des systèmes non linéaires. La commande par mode glissant est relativement simple à implémenter (par rapport à d'autres approches de commande). [10]

***Chapitre 2 :
Modélisation dédié à la
commande
de niveau d'eau pour
deux réservoirs***

Chapitre 2 :

1.1 Introduction

Le contrôle non linéaire du niveau de liquide d'un système hydraulique composé de plusieurs réservoirs connectés est un problème de contrôle non linéaire typique dans le domaine du contrôle des processus industriels. De nombreux chercheurs du monde entier ont essayé de concevoir et de mettre en œuvre le contrôleur de niveau du système de deux réservoirs. Certains chercheurs utilisent pour le contrôle du système à deux réservoirs des régulateur proportionnels, intégrale, dérivée (PID), ainsi qu'un régulateur de structure parallèle de type PID flou.

Le contrôle par mode glissant est une méthode efficace pour la commande robuste des systèmes non linéaires. L'idée de base du contrôle par mode glissant (SMC) est de permettre au système de converger vers une surface sélectionnée, puis d'y rester malgré les perturbations. La méthode SMC peut être conçue en effectuant deux étapes. La première étape consiste à sélectionner une surface de glissement appropriée et à y contraindre la trajectoire d'état. La deuxième étape consiste à concevoir une loi de commande discontinue pour forcer l'état du système à atteindre la surface de glissement, de préférence à l'infini.

Le degré relatif de la variable glissante (la relativité est définie comme l'ordre de la dérivée de la variable contrôlée dans laquelle l'entrée de contrôle apparaît explicitement) est égal à l'entrée de contrôle qui restreint la sélection de la variable glissante. SMC est également utilisé pour ajuster le niveau de liquide. On utilise une surface de glissement dépendant de l'entrée pour ajuster le niveau de liquide dans le système à deux réservoirs. [1]

2.2 Modélisation et contrôle du réservoir couplé

2.2.1 Système à réservoir unique

Le système à réservoir unique composé du réservoir supérieur est illustré dans Figure 2.1. La pompe alimente le réservoir 1. Le réservoir 2 n'est pas du tout pris en compte. Par conséquent, l'entrée du processus est la tension de la pompe et sa sortie est le niveau d'eau dans le réservoir 1.

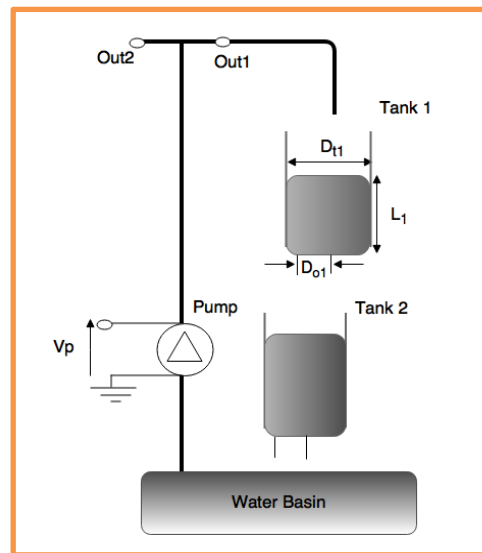


Figure 2- 1: Configuration du réservoir 1.

Le modèle du système à réservoir unique déterminé par :

- **L'entrée** : la tension de la pompe.
- **La sortie** : le niveau d'eau dans le réservoir.

La relation entre la tension d'alimentation de la pompe u et le débit d'entrée peut s'écrire : $f_{i1} =$

$$\eta u(t) \quad (2.1)$$

$$f_{o1} = A_{o1} V_{o1} \quad (2.2)$$

Avec :

f_{i1} : Débit d'entré volumique.

f_{o1} : Débit de sortie.

A_{o1} : La section transversale de sortie.

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

$\eta = \frac{k_p}{A_{t1}}$ Est constante, k_p est la constante de flux volumétrique de la pompe. $u(t) = V_p$

Est l'entrée Tension de la pompe réelle.

La vitesse de sortie utilisant l'équation de Bernoulli

$$V_{o1} = \sqrt{2\sqrt{gl_1}} \quad (2.3)$$

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

$$A_{o1} = \frac{1}{4} \pi D_o^2 \quad (2.4)$$

En remplaçant l'équation (2.3) dans (2.2) Le débit de sortie du réservoir 1 devient :

$$f_{o1} = A_{o1} \sqrt{2\sqrt{gl_1}} \quad (2.5)$$

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

$$A_{t1} \left(\frac{dl_1}{dt} \right) = f_{i1} - f_{o1} \quad (2.6)$$

Avec : A_{t1} la section transversale interne du réservoir 1

En remplaçant les équations (2.1) et (2.2) dans l'équation (2.6) nous obtenons :

$$\frac{dl_1}{dt} = \frac{Kp Vp - A_{o1} \sqrt{2\sqrt{gl_1}}}{A_{t1}} \quad (2.7)$$

$$\frac{dl_1}{dt} = - \frac{A_{o1} \sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{l_1} + \frac{Kp}{A_{t1}} Vp$$

La réponse indicielle de ce système sous logiciel MATLAB/SUMILINK est donnée par la figure suivante :

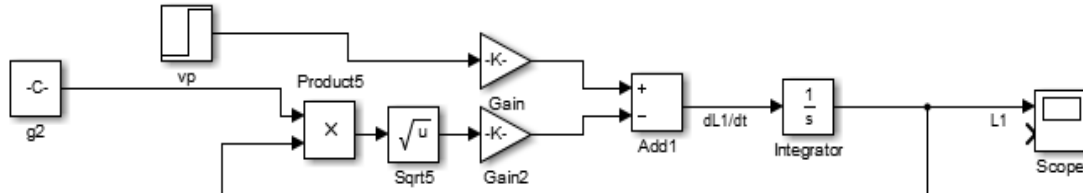


Figure 2- 2:Modèle sumilink d'un seul réservoir.

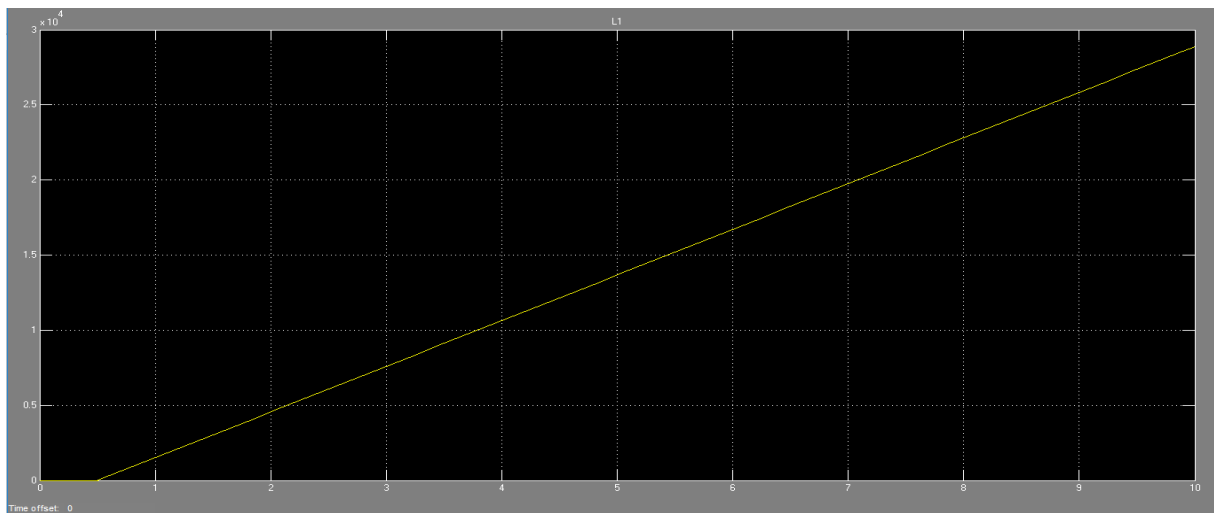


Figure 2- 3:La réponse indicielle du système à un seul réservoir non corrigé.

Commentaire :

On constate que le système d'un seul réservoirs est instable car la réponse diverge vers l'infini.

2.2.2 Système à deux réservoirs

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

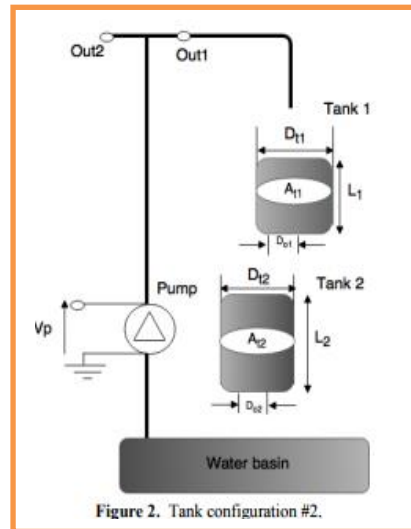


Figure 2- 4: Configuration des deux réservoirs.

Dans cette configuration, la pompe alimente le réservoir 1, qui alimente à son tour le réservoir 2. En ce qui concerne le réservoir 1, les mêmes équations développées dans la section (2.1) sont maintenues.

Cependant, pour modéliser le deuxième réservoir on doit fixer d'abord les variables d'entrée et de sortie de ce sous-système.

L'entrée : le débit de sortie du premier réservoir.

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

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

$$f_{o2} = A_{o2}V_{o2} \quad (2.8)$$

Avec:

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

k_p : Constante de débit volumique

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

$$V_{o2} = \sqrt{2}\sqrt{gl_2} \quad (2.9)$$

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

$$A_{o2} = \frac{1}{4}\pi D_{o2}^2 \quad (2.10)$$

On remplaçant V_{o2} dans l'équation (2.8), nous obtenant :

$$f_{o2} = A_{o2}\sqrt{2}\sqrt{gl_2} \quad (2.11)$$

Le débit entrant dans le réservoir 2 est donné par :

$$f_{i2} = A_{o1}\sqrt{2}\sqrt{gl_1} \quad (2.12)$$

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

$$A_{t2} \left(\frac{dL_1}{dt} \right) = f_{i2} - f_{o2} \quad (2.13)$$

En remplaçant les équations (2.11) et (2.12) dans l'équation (2.13) on obtient :

$$\frac{dL_2}{dt} = \frac{-A_{o2}\sqrt{2}\sqrt{gl_2} + A_{o1}\sqrt{2}\sqrt{gl_1}}{A_{t2}} \quad (2.14)$$

Les paramètres, nominaux et ceux obtenus expérimentalement, du système sont donnés au tableau 1 ci-dessous :

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_{o1}	La section transversale de sortie du premier réservoir	3.8 cm^2
A_{o2}	La section transversale de sortie du deuxième réservoir	3.8 cm^2
k_p	Constante de flux volumétrique de la pompe	$7.687 \times \frac{10^{-4} \text{ m}^3}{\text{s}} \cdot v$
g	Constante de gravité	9.81 m/sec^2
l_1	Niveau de liquide au réservoir 1	/
l_2	Niveau de liquide au réservoir 2	/

Tableau 1 :les paramètres du système et ses valeurs en temps réel.

Le modèle du système non corrigé est donnée par :

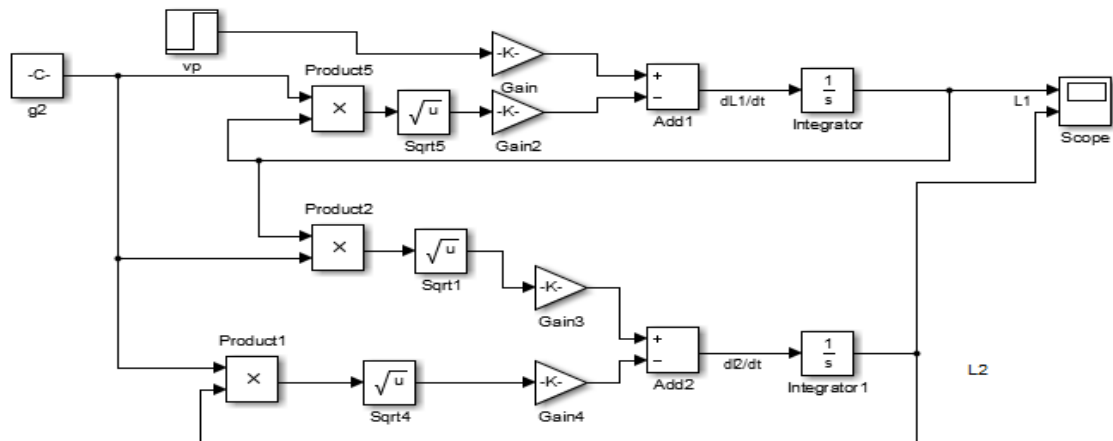


Figure 2- 5: Modèle sumilink des deux réservoirs.

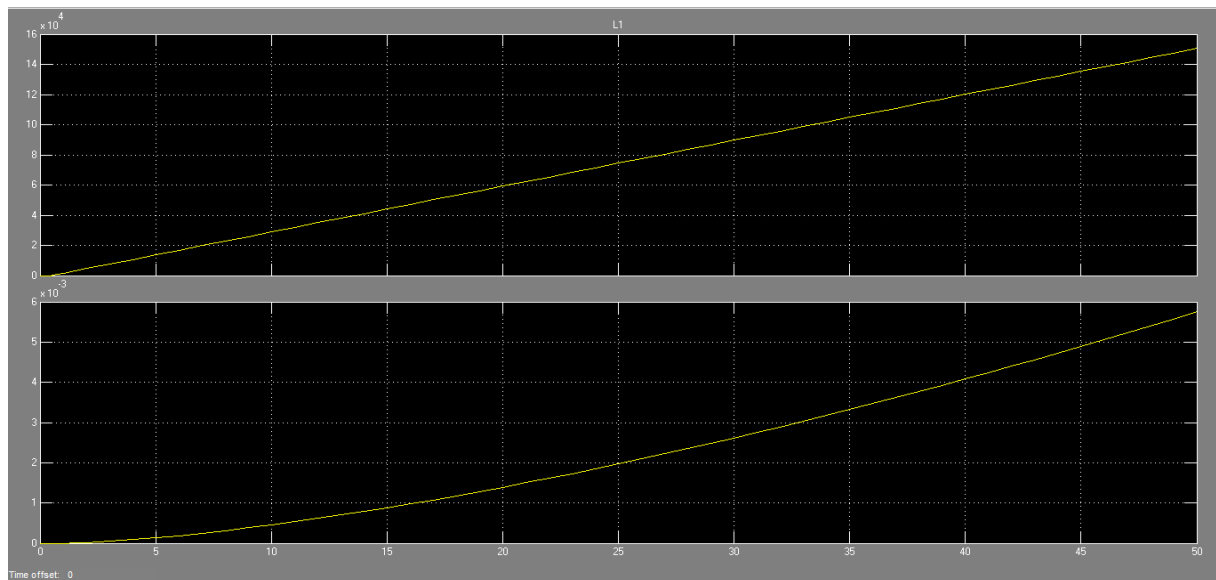


Figure 2- 6: La réponse indicielle du système à deux réservoirs non corrigé.

Commentaire :

On constate que le système de deux réservoirs est instable car la réponse tombe vers l'infini.

2.3 Conclusion

La théorie du contrôle en mode glissant a été utilisée pour contrôler de nombreux systèmes non linéaires avec des paramètres inconnus décrivant le modèle mathématique du système. Par conséquent, des schémas de contrôle non paramétriques doivent être mis en œuvre. Le contrôle

en mode glissant peut résoudre ce problème et fournir un schéma de contrôle robuste qui peut rejeter les perturbations extérieures. En choisissant une surface de glissement appropriée, l'utilisation d'observateurs ou d'estimateurs d'état peut être évitée. Donc pour cette application, la seule variable d'état de rétroaction est la mesure directe du niveau de liquide dans chaque réservoir. [3]

Chapitre 3 :
Commande du niveau
d'eau
d'un réservoir par mode
glissant

Chapitre 3

3.1 Introduction

La technologie des modes glissants consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre, d'où le phénomène de glissement.

La conception du régulateur par mode glissant résout les problèmes suivants : Performances stables et requises de manière systématique.

La méthode de commande nécessite principalement trois étapes :

1. Le choix de la surface.
2. L'établissement des conditions d'existence de la convergence.
3. La détermination de la loi de commande. [8]

Ce chapitre traite de la commande du niveau d'eau d'un réservoir par SMC qui est consacré dans un premier temps à une démonstration à base de la SMC à des différentes références variables et constantes. Dans un second temps, étude de sa robustesse ainsi que ses défauts sont abordés on ajoutant une perturbation. Cette dernière est basée sur le remplacement des valeurs et des conditions pour avoir un système stable et fiable. Cette méthode permet d'obtenir un bon suivi de trajectoire. Enfin, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus de la commande du niveau d'eau d'un réservoir par SMC à l'aide de modèle dynamique déclaré sous logiciel MATLAB avec et sans perturbation et on fait la comparaison pour voir la robustesse de la commande.

3.2 Modélisation de réservoir unique

Dans ce chapitre nous allons présenter la commande qui permet de maintenir le niveau d'eau dans un réservoir à une référence constante et variable.

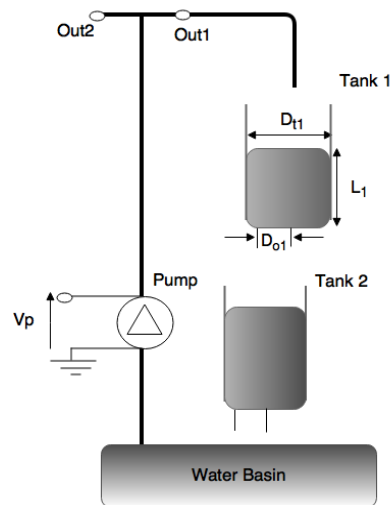


Figure 3. 1 Configuration du réservoir 1.

Le modèle du système à réservoir unique déterminé par :

- **L'entrée** : la tension de la pompe.
- **La sortie** : le niveau d'eau dans le réservoir.

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

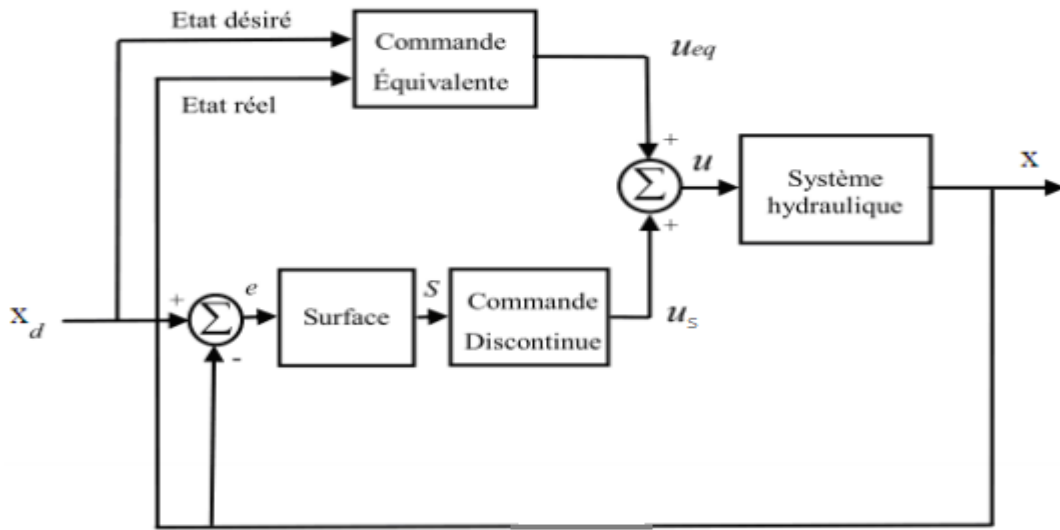


Figure 3. 2 Schéma bloc de la commande par mode glissant.

3.2.1 Modélisation de réservoir 1 à une référence constante

Représentant de la surface de glissement le comportement dynamique requis par un système en boucle fermée. Peut choisir linéaire ou non linéaire.

L'une des formes que la surface peut prendre est donnée par

$$s = \sum_{i=1}^n \lambda (x_{ir} - x_i) = 0$$

Notre objectif de cette commande est de maintenir la surface à zéro ($s=0$), dont l'unique solution est ($x=0$) pour un choix convenable des paramètres.

Alors la surface de glissement s'écrit :

$$s = \lambda(x_{1r} - x_1) = 0 \quad (3.1) \quad x_{1r} = x_1$$

Avec :

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

x_{1r} : La référence désirée.

En remplace x_{1r} dans l'équation (2.7) de la dynamique du réservoir unique de chapitre précédent ce qui donne :

$$\dot{x} = \frac{k_p}{A_{t1}} u_{\dot{e}q} - \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{x_{1r}} = 0 \quad (3.2)$$

Avec :

$$u_{\dot{e}q} = \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{k_p} \sqrt{x_{1r}} \quad (3.3)$$

On sait que :

$$u_s = k_x \text{sgn}(s)$$

Et les deux composants de la commande s'écrivent comme :

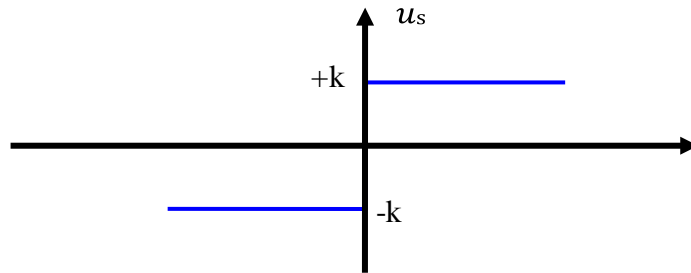
$$u = u_{\acute{e}q} + u_s \quad (3.4)$$

Où

$u_{\acute{e}q}$: Est la commande équilibre qu'elle est déterminée par le modèle du système, dans ce cas il s'agit d'un modèle dynamique d'un réservoir. Cette partie est conçue avec la méthode de la commande équilibre, dont le principe est basé sur la détermination du comportement du système lorsqu'il est sur la surface de glissement.

Et

u_s : Le glissement est utile pour compenser les incertitudes du modèle. Il est constitué de la fonction signe " sgn " de la surface de glissement, multipliée par une constante. La surface de glissement est définie dans l'espace d'état des erreurs afin de garantir la convergence des états [11].



Représentation de la fonction « Sign ». **Figure 3.**

En obtient :

$$u = \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{k_p} \sqrt{x_{1r}} + k_x \text{sgn}(s) \quad (3.5)$$

On pose $z = x_1 - x_{1r}$

Passons à la dérivée :

$$\dot{z} = \dot{x} \quad (3.6)$$

En remplace l'équation (3.2) à (3.6) :

$$\dot{z} = \frac{k_p}{A_{t1}} u - \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{z + x_{1r}} = 0 \quad (3.7)$$

En remplace l'équation (3.5) à (3.7) :

$$\dot{z} = \frac{k_p}{A_{t1}} \left(\frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{k_p} \sqrt{x_{1r}} + k_x \text{sgn}(s) \right) - \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{z + x_{1r}} \quad (3.8)$$

$$\dot{z} = \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}}\sqrt{x_{1r}} - \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}}\sqrt{z + x_{1r}} + \frac{k_p k_x}{A_{t1}} \text{sgn}(s) \quad (3.9)$$

3.2.1.1 Fonction de LYAPUNOV

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

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

$$v(z) = \frac{1}{2} z^2$$

$$\text{Avec } \begin{cases} v(0) = 0 \\ v(z) \geq 0 \end{cases}$$

$$\dot{v}(z) = \dot{z}z \quad (3.10)$$

En remplace l'équation (3.9) à (3.10) :

$$\dot{v}(z) = \left(\frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}}\sqrt{x_{1r}} - \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}}\sqrt{z + x_{1r}} + \frac{k_p k_x}{A_{t1}} \text{sgn}(s) \right) z \quad (3.11)$$

$$\dot{v}(z) = \left(\frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}}\sqrt{x_{1r}} - \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}}\sqrt{z + x_{1r}} \right) z + \left(\frac{k_p k_x}{A_{t1}} \text{sgn}(s) \right) z$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer $\dot{v} < 0$

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

$$\left(\frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}}\sqrt{x_{1r}} - \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}}\sqrt{z + x_{1r}} \right) z + \left(\frac{k_p k_x}{A_{t1}} \text{sgn}(z) \right) z < 0$$

$$\left(\frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}}\sqrt{x_{1r}} - \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}}\sqrt{z + x_{1r}} + \frac{k_p k_x}{A_{t1}} \text{sgn}(z) \right) |z| < 0$$

Avec $z = x_1 - x_{1r}$

x_{1r} : Référence désiré.

$$\left(\frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}}\sqrt{x_{1r}} - \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}}\sqrt{x_{1r}} \right) = 0$$

$$\left(\frac{k_p k_x}{A_{t1}} \text{sgn}(z) \right) |z| < 0$$

$$\frac{k_p k_x}{A_{t1}} \text{sgn}(z) |z| < 0$$

On sait que

$$\frac{k_p}{A_{t1}} \operatorname{sgn}(z) |z| > 0$$

Par conséquent : $k_x < 0$

3.2.2 Modélisation de réservoir 1 à une référence variable

Nous supposons que les débits ne peuvent pas être négatifs et nous sommes d'accord comme suit,

$$f \geq 0$$

Par conséquent, l'équation suivante doit satisfaire comme le débit à être dessus,

$$l_1 \geq l_2$$

Ainsi, l'équation suivante peut s'écrire

$$\frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}} = k_1, \frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}} = k_2$$

$$k_1 = k_2 = k$$

Si l'écriture de ces hypothèses dans le modèle dynamique du système de réservoir, les équations suivantes peuvent être obtenues.

On considère le cas général d'un système non linéaire dont la dynamique s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = l_1 \\ \dot{x}_2 = \frac{dl_1}{dt} \end{cases}$$

Ainsi, la dynamique de la forme combinée du système de réservoir couplé peut s'écrire comme suit,

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 & (3.12) \\ \dot{x}_2 = f + \phi u = \frac{-k}{2\sqrt{x_1}} (-k\sqrt{x_1} + \eta u) & (3.13) \end{cases}$$

Avec :

$$f = \frac{k^2}{2}, \phi = -\frac{k}{2\sqrt{x_1}}\eta$$

Avec f et ϕ deux fonctions non linéaires, avec $\phi \geq \phi(0) > 0$

La surface de glissement est définie :

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} . e = \lambda e + \dot{e} \quad (3.14)$$

Avec :

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

n : Degré relatif, égal au nombre de fois qu'il fait dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

Pour $n = 1$, $s = e$

Pour $n = 2$, $s = \lambda e + \dot{e}$

Pour $n = 3$, $s = \lambda^2 e + 2\lambda \dot{e} + \ddot{e}$

$s = e$: est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e=0$.

e : L'erreur nous prenons l'erreur comme référence désiré et la différence mesurée et nous avons obtenu l'équation suivante.

$$e = l_{1r} - l_1$$

$$e = x_{1r} - x_1$$

On considère la fonction de Lyapunov suivante :

Il s'agit de formuler une fonction scalaire positive $v(x) > 0$ pour les variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction $\dot{v} < 0$

Stabilité asymptotique si:

$$v(s) > 0 \quad \forall s \neq 0$$

Et

$$\dot{v} < 0$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer $\dot{v} < 0$ parce qu'elle est utilisée pour estimer les performances de la commande, l'étude de robustesse et garantit la stabilité du système non linéaire.

$$\dot{v} = s\dot{s}$$

Si on dérive l'équation (3.14) on obtient :

$$\dot{s} = \lambda \dot{e} + \ddot{e} = \lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1r} - f - \Phi u \quad (3.15)$$

En remplace l'équation (3.15) dans la dérivée de la fonction de Lyapunov on obtient:

$$\dot{v} = (\lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1r} - f - \Phi u) s \quad (3.16)$$

Pour assurer la commande équivalente il faut que le système doive être sur la surface de glissement.

Si $\dot{s} = 0$

$$\lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1r} - f - \Phi u_{eq} = 0$$

En obtient

$$u_{eq} = -\frac{f+\lambda\dot{e}+\ddot{x}_{1r}}{\phi(x)} \quad (3.17)$$

Alors la commande u

$$u = u_{eq} + k_x \text{sign}(s)$$

$$u = -\frac{f+\lambda\dot{e}+\ddot{x}_{1r}}{\phi(x)} + k_x \text{sign}(s) \quad (3.18)$$

Passons à la dérivée de Lyapunov en remplaçons l'équation (3.18) à (3.16) :

$$\dot{v} = (\lambda\dot{e} + \ddot{x}_{1r} - f)s - \phi s(u_{eq} + k_x \text{sign}(s)) \quad (3.19)$$

On remplace l'équation de la commande équivalente (3.17) à (3.19) ce qui donne:

$$\dot{v} = (\lambda\dot{e} + \ddot{x}_{1r} - f)s - s(\lambda\dot{e} + \ddot{x}_{1r} - f + \phi k_x \text{sign}(s))$$

$$\dot{v} = -\phi k_x \text{sign}(s)s$$

$$\leq -\phi k_x |s|$$

On sait que :

$$\phi = -\frac{k}{2\sqrt{x_1}}\eta$$

Alors

$$\dot{v} \leq +\frac{k}{2\sqrt{x_1}}\eta k_x |s|$$

\dot{v} Est définie négative car $\phi \geq \phi(0) > 0$ et s valeur absolue

Alors $k_x < 0$

3.3 Etude de robustesse

La plupart des systèmes non linéaires sont caractérisés par des incertitudes adaptées et/ou mal adaptés variant dans le temps, ce qui rend leurs commandes très délicates et complexes à mettre en œuvre. Dans ce qui suit, nous proposons de concevoir une commande par mode de glissant en présence de perturbations.

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

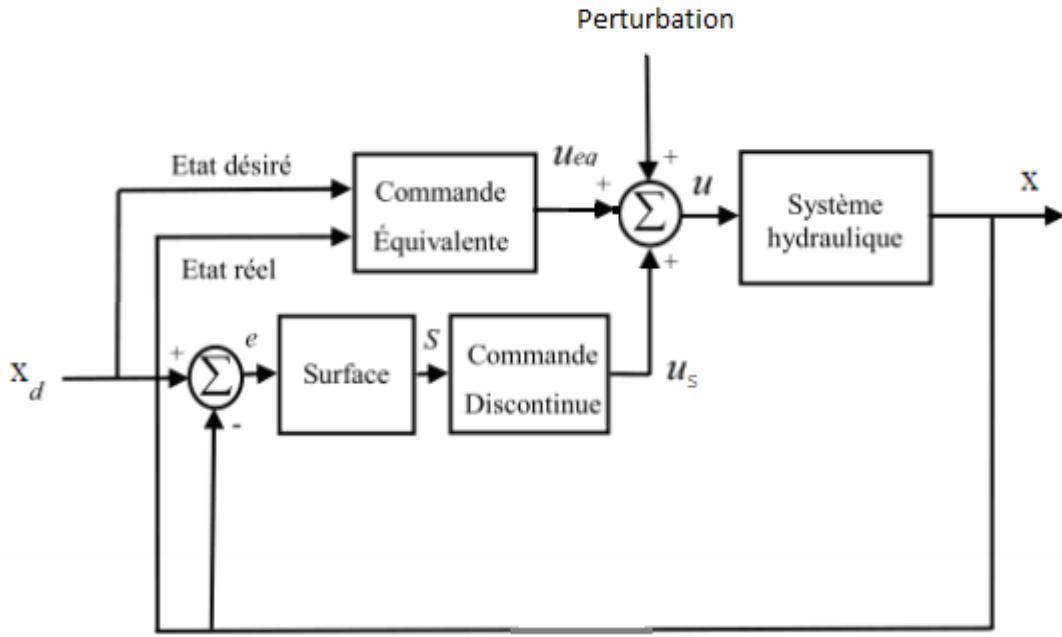


Figure 3. 3 Schéma bloc de la commande par mode glissant en présence de perturbations.

3.3.1 Modélisation de réservoir 1 a référence constante avec perturbations

L'idée de base du contrôle par mode glissant est l'état d'attraction, d'abord le système dans une région de l'espace d'état sélectionnée de manière appropriée, connue sous le nom de la surface de glissement. Par exemple, une fois que le système entre cette zone de l'espace d'état, elle se comportera comme prévu. Puis la deuxième étape y compris la conception d'une loi de commande pour guider le système dans un temps limité dans la zone et l'y maintenir, c'est-à-dire que le commandement doit s'assurer L'attractivité et l'invariance de la surface de glissement.[10]

On place la surface de glissement, le modèle dynamique et la commande telle que la section précédente :

$$s = \lambda(x_{1r} - x_1) = 0 \text{ Avec } x_{1r} = x_1$$

$$\dot{x} = \frac{k_p}{A_{t1}} u_{\acute{e}q} - \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{x_{1r}} = 0$$

$$u_{\acute{e}q} = \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{k_p} \sqrt{x_{1r}}$$

$$u_s = k_x s \operatorname{sgn}(s)$$

Une fois arriver sur cette surface, on calcule la commande \$u\$ du système tel que :

$$u = u_{\acute{e}q} + u_s + P \quad (3.20)$$

On remplace u_s :

$$u = u_{\acute{e}q} + k_x \operatorname{sgn}(s) + P \quad (3.21)$$

On pose :

$$z = x_1 - x_{1r}$$

Passons à la dérivée :

$$\dot{z} = \dot{x}$$

En remplace l'équation de la dynamique dans \dot{z} :

$$\dot{z} = \frac{k_p}{A_{t1}} u - \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{z + x_{1r}} = 0$$

En remplace la commande u dans l'équation précédente et on obtient :

$$\dot{z} = \frac{k_p}{A_{t1}} \left(\frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{k_p} \sqrt{x_{1r}} + k_x \operatorname{sgn}(s) + P \right) - \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{z + x_{1r}} \quad (3.22)$$

$$\dot{z} = \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{x_{1r}} - \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{z + x_{1r}} + \frac{k_p k_x}{A_{t1}} \operatorname{sgn}(s) + \frac{k_p}{A_{t1}} P \quad (3.23)$$

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

$$v(z) = \frac{1}{2} z^2$$

$$\text{Avec } \begin{cases} v(0) = 0 \\ v(z) \geq 0 \end{cases}$$

$$\dot{v}(z) = \dot{z} z \quad (3.24)$$

En remplace l'équation (3.23) à (3.24) :

$$\dot{v}(z) = \left(\frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{x_{1r}} - \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{z + x_{1r}} + \frac{k_p k_x}{A_{t1}} \operatorname{sgn}(s) + \frac{k_p}{A_{t1}} P \right) z \quad (3.25)$$

$$\dot{v}(z) = \left(\frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{x_{1r}} - \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{z + x_{1r}} \right) z + \left(\frac{k_p k_x}{A_{t1}} \operatorname{sgn}(s) + \frac{k_p}{A_{t1}} P \right) z$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer $\dot{v} < 0$:

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

$$\left(\frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{x_{1r}} - \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{z + x_{1r}} \right) z + \left(\frac{k_p k_x}{A_{t1}} \operatorname{sgn}(z) + \frac{k_p}{A_{t1}} P \right) z < 0$$

$$\left(\frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{x_{1r}} - \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{z + x_{1r}} \right) + \left(\frac{k_p k_x}{A_{t1}} \operatorname{sgn}(z) + \frac{k_p}{A_{t1}} P \right) |z| < 0$$

Et $z = x_1 - x_{1r}$

Alors

$$\begin{aligned} \left(\frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{x_{1r}} - \frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{x_{1r}} \right) &= 0 \\ \left(\frac{k_p k_x}{A_{t1}} \operatorname{sgn}(z) + \frac{k_p}{A_{t1}} P \right) |z| &< 0 \\ \frac{k_p}{A_{t1}} (k_x \operatorname{sgn}(z) + P) |z| &< 0 \end{aligned}$$

On sait que : $\frac{k_p}{A_{t1}} > 0, |z| > 0$

Alors

$$\begin{aligned} (k_x \operatorname{sgn}(z) + P) &< 0 \\ k_x \operatorname{sgn}(z) &< -P \end{aligned}$$

Par conséquent : $k_x < -P$

3.3.2 Modélisation de réservoir 1 à référence variable avec perturbations

On rappelle les équations de surface du glissement et de la dynamique du système de la section précédente du réservoir 1 à référence variable.

La dynamique du système s'écrit :

$$\begin{cases} x_1 = l_1 \\ x_2 = \frac{dl_1}{dt} \end{cases}$$

Le modèle d'état :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 & (3.26) \\ \dot{x}_2 = f + \phi u = \frac{-k}{2\sqrt{x_1}}(-k\sqrt{x_1} + \eta u) & (3.27) \end{cases}$$

Avec f et ϕ deux fonctions non linéaires, avec $\phi \geq \phi(0) > 0$

La surface de glissement est définie :

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} . e = \lambda e + \dot{e} \quad (3.28)$$

Avec $\lambda > 0$ et l'erreur $e = x_{1r} - x_1$

Si on dérive l'équation (3.28) ça donne :

$$\dot{s} = \lambda \dot{e} + \ddot{e} = \lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1r} - f - \phi u \quad (3.29)$$

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

Stabilité asymptotique si:

$$v(s) > 0 \quad \forall s \neq 0$$

Et

$$\dot{v} < 0$$

Passons à la dérivée

$$\dot{v} = s\dot{s} \quad (3.30)$$

Alors en remplace l'équation (3.29) dans la dérivée de la fonction de Lyapunov on obtient:

$$\dot{v} = (\lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1r} - f - \phi u) s \quad (3.31)$$

Pour assurer la commande équivalente il faut que le système doive être sur la surface de glissement.

Si la dérivée de surface de glissement $\dot{s} = 0$:

$$\begin{aligned} \lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1r} - f - \phi u_{eq} &= 0 \\ u_{eq} &= -\frac{f + \lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1r}}{\phi(x)} \end{aligned} \quad (3.32)$$

Alors la commande u

$$u = u_{eq} + k_x \text{sign}(s) + P \quad (3.33)$$

Passons à la dérivée de Lyapunov en remplaçons l'équation (3.33) dans (3.31) on obtient :

$$\dot{v} = (\lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1r} - f) s - \phi s (u_{eq} + k_x \text{sign}(s) + P) \quad (3.34)$$

On remplace l'équation (3.32) à (3.34):

$$\begin{aligned} \dot{v} &= (\lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1r} - f) s - s(\lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1r} - f + \phi k_x \text{sign}(s) + \phi P) \\ \dot{v} &= -\phi k_x \text{sign}(s) s - \phi P s \end{aligned}$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer :

$$\begin{aligned} \dot{v}(z) &< 0 \\ &\leq -\emptyset|s|(k_x \text{sign}(s) + P) \end{aligned}$$

On sait que : $\emptyset > 0$ et $|s| > 0$

Ce qui donne :

$$-\emptyset|s| < 0$$

Alors

$$\begin{aligned} k_x \text{sign}(s) + P &\geq 0 \\ k_x \text{sign}(s) &\geq -P \end{aligned}$$

Par conséquent

$$k_x > -P$$

3.4 Résultat expérimentaux:

Les résultats expérimentaux sont présentés dans cette section pour montrer la performance du contrôleur pour le système de réservoir 1. Nous avons appliqué un contrôleur de mode glissant, et les résultats expérimentaux sont montrés dans la Figure 3.5 de la première expérience, les performances du contrôleur de niveau sont testées pour des références constants et variables (step+sinusoidal) pour la configuration d'un seul réservoir. La référence variable est importante parce que le système de contrôle de niveau est testé pour un liquide qui augmente et diminue soudainement dans une période.

Dans la deuxième partie de cette section on a appliqué une perturbation au système de niveau liquide pour tester la robustesse et la fiabilité du système. Les résultats expérimentaux sont montrés dans la Figure 3.6.

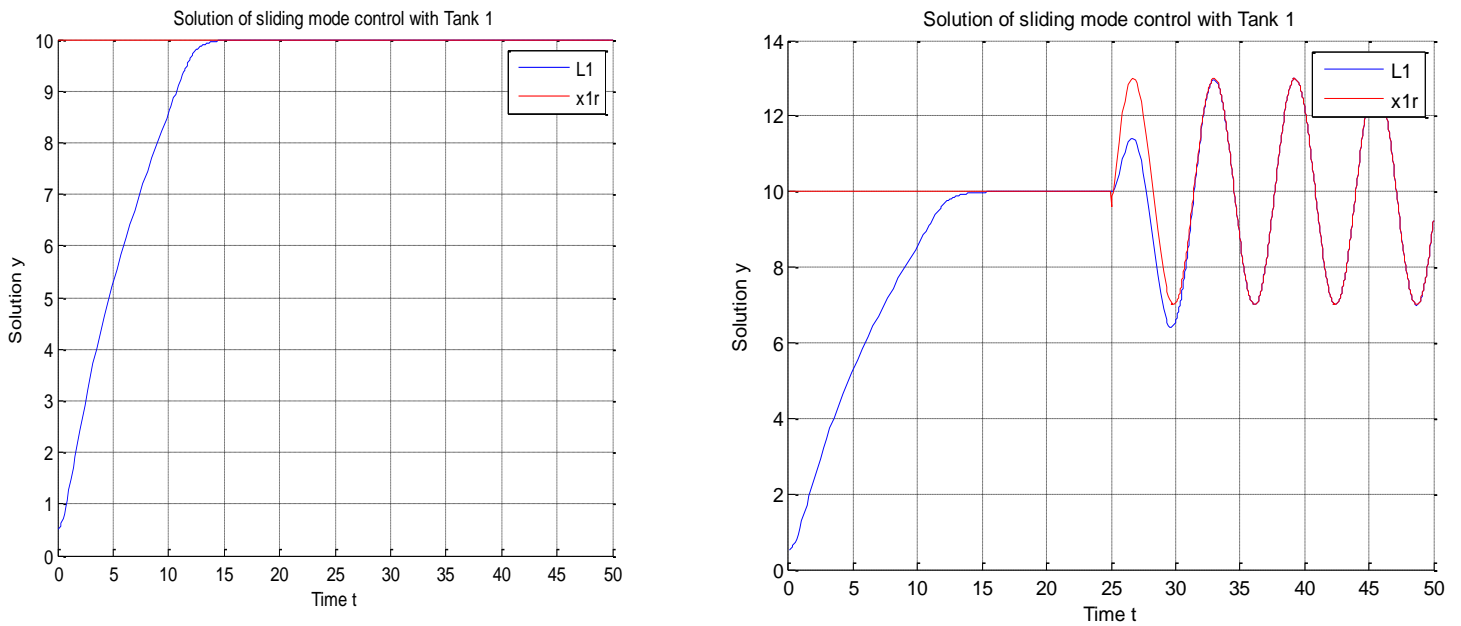


Figure 3. 4 Résultat expérimentale SMC pour les références constante et variable de la configuration du réservoir 1

Commentaire : les résultats expérimentaux de la première expérience du SMC pour les références constantes et variable sont comme le montre la figure 3.5 la commande reprend à 15s. On voit bien Nous avons obtenu des résultats satisfaisants. Comme le montre la partie de référence constante et la partie variable montre un dépassement acceptable et un temps de réponse d'environ 15 secondes, c'est-à-dire elle est liée à la nature du système hydraulique.

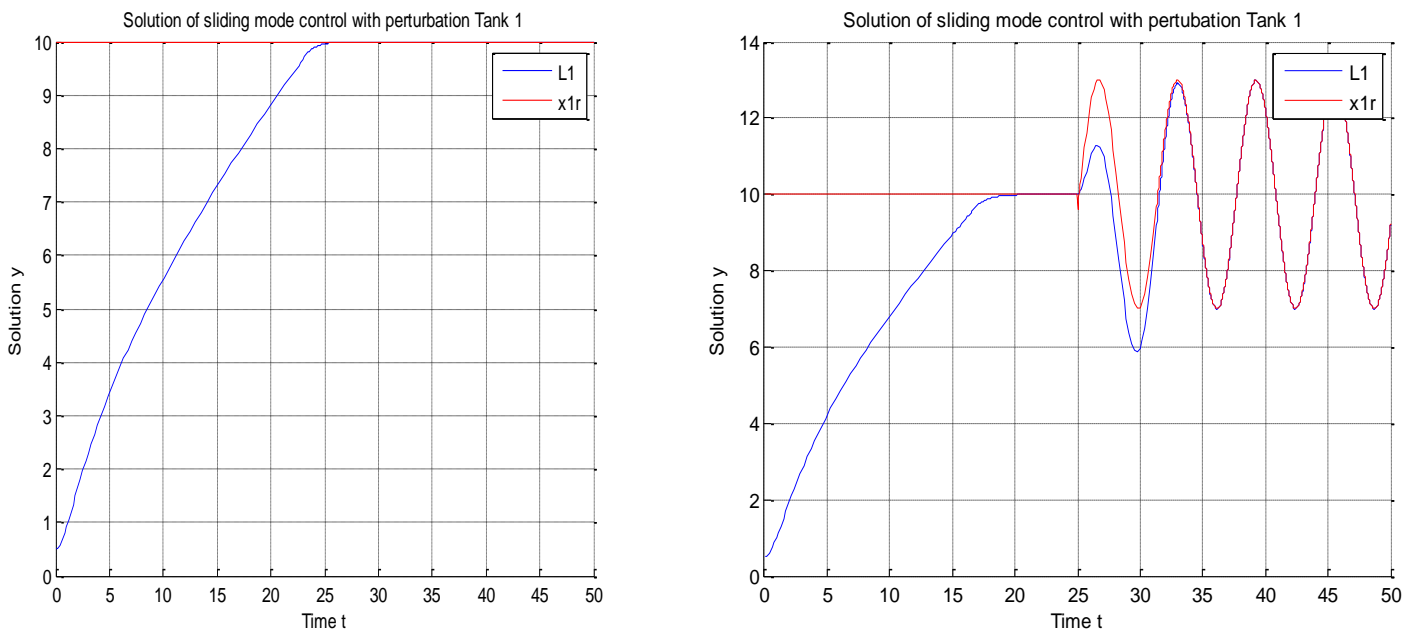


Figure 3. 5 Résultat expérimentale SMC pour les références constante et variable avec une perturbation de la configuration du réservoir 1.

Commentaire : Une perturbation est appliquée dans le système pour montrer les réponses proposées du contrôleur contre les circuits indésirables circonstances on remarque que le temps de réponse est un peu plus long environ 18 secondes et un dépassement dans la partie sinusoïde par rapport à l'expérience précédente mais la suivie à la référence ne change pas. Cette commande fait preuve de robustesse idéale pour modéliser les erreurs. En fait, cet ordre est basé sur un modèle simplifié de système hydraulique.

3.1 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé le problème de la commande par mode de glissant pour le niveau d'eau d'un seul réservoir. La première partie de ce chapitre a été consacrée à traiter de la commande du niveau d'eau d'un réservoir par SMC avec des références constantes et variable. Ce dernier donne des résultats fiables et un suivie à la trajectoire.

La seconde partie de ce chapitre a été dédiée à l'étude de la robustesse qu'elle offre vis-à-vis des perturbations extérieures. On peut cependant noter que les performances de la commande par mode glissant du 1^{er} réservoir garanti une bonne régulation.

Chapitre4 :
Commande du niveau
d'eau
des deux réservoirs par
mode glissant

Chapitre 4

4.1 Introduction

La plupart des systèmes industriels ne sont pas des systèmes linéaires, les lois d'ordre classiques (ex. Types PID) peuvent ne pas suffire car ils ne sont pas robustes, surtout quand la précision et les autres caractéristiques dynamiques du système sont très exigeantes. Les gens doivent réclamer des lois qui ne sont pas sensibles à l'ordre changements de paramètres, interruptions et non-linéarités. L'ordre du mode glissant a ceci robuste. Dans cette recherche, nous avons proposé le modèle procédure et algorithme sélectionné estimations des paramètres. Ensuite, nous développons la commande méthode de glissement. Nous évaluons par des expériences cette technique séquentielle et sa réponse aux effets externes l'interruption est appliquée au système.

4.2 Modélisation de réservoirs couplés

Dans ce chapitre nous allons présenter la commande qui permet de maintenir le niveau d'eau des deux réservoirs à une référence constante et variable.

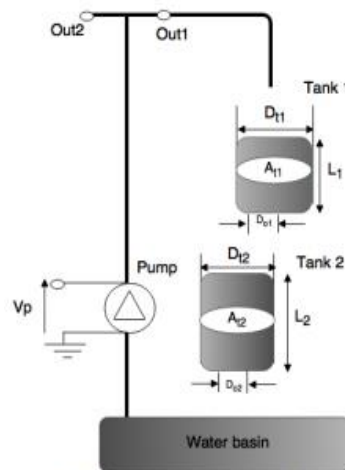


Figure 2. Tank configuration #2.

Figure 4. 1 Configuration des deux réservoirs.

Dans cette configuration, la pompe alimente le réservoir 1, qui alimente à son tour le réservoir 2. Le modèle du système à deux réservoirs déterminé par :

- **L'entrée** : le débit de sortie du premier réservoir.
- **La sortie** : le niveau d'eau dans le deuxième réservoir.

4.2.1 Modélisation de réservoir2 à une référence constante

La surface de glissement pour le modèle du 2^{ème} réservoir s'écrit :

$$s = \lambda(x_{2r} - x_2) = 0 \quad (4.1) \quad x_{2r} = x_2$$

Avec :

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

x_{2r} : La référence désirée.

En remplace x_{2r} dans l'équation dynamique des réservoirs couplés ce qui donne :

$$\dot{x} = \frac{k_p}{A_{t2}} u_{\acute{e}q} - \frac{A_{02}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{x_{2r}} = 0 \quad (4.2)$$

Avec :

$$u_{\acute{e}q} = \frac{A_{02}\sqrt{2g}}{k_p} \sqrt{x_{2r}} \quad (4.3)$$

On sait que :

$$u_s = k_x \operatorname{sgn}(s)$$

Alors :

$$u = u_{\acute{e}q} + u_s \quad (4.4)$$

On remplace u_s et $u_{\acute{e}q}$ dans la commande u :

$$u = \frac{A_{02}\sqrt{2g}}{k_p} \sqrt{x_{2r}} + k_x \operatorname{sgn}(s) \quad (4.5)$$

On pose :

$$z = x_2 - x_{2r}$$

Passons à la dérivée :

$$\dot{z} = \dot{x} \quad (4.6)$$

En remplace l'équation (4.2) à (4.6) :

$$\dot{z} = \frac{k_p}{A_{t2}} u - \frac{A_{02}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{z + x_{2r}} = 0 \quad (4.7)$$

En remplace l'équation (4.5) à (4.7):

$$\dot{z} = \frac{k_p}{A_{t2}} \left(\frac{A_{02}\sqrt{2g}}{k_p} \sqrt{x_{2r}} + k_x \operatorname{sgn}(s) \right) - \frac{A_{02}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{z + x_{2r}} \quad (4.8)$$

$$\dot{z} = \frac{A_{02}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{x_{1r}} - \frac{A_{02}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{z + x_{2r}} + \frac{k_p k_x}{A_{t2}} \operatorname{sgn}(s) \quad (4.9)$$

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

$$\dot{v}(z) = \dot{z} z \quad (4.10)$$

En remplace l'équation (4.9) à (4.10) :

$$\dot{v}(z) = \left(\frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{x_{1r}} - \frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{z + x_{2r}} + \frac{k_p k_x}{A_{t2}} \text{sgn}(s) \right) z \quad (4.11)$$

$$\dot{v}(z) = \left(\frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{x_{2r}} - \frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{z + x_{2r}} \right) z + \left(\frac{k_p k_x}{A_{t2}} \text{sgn}(s) \right) z$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer:

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

$$\left(\frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{x_{1r}} - \frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{z + x_{2r}} \right) z + \left(\frac{k_p k_x}{A_{t2}} \text{sgn}(z) \right) z < 0$$

$$\left(\frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{x_{2r}} - \frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{z + x_{2r}} \right) + \left(\frac{k_p k_x}{A_{t1}} \text{sgn}(z) \right) |z| < 0$$

Avec $z = x_2 - x_{2r}$

Ce qui donne :

$$\left(\frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{x_{2r}} - \frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{x_{2r}} \right) = 0$$

Et

$$\left(\frac{k_p k_x}{A_{t2}} \text{sgn}(z) \right) |z| < 0$$

On sait que $\frac{k_p}{A_{t2}} > 0$ et $|z| > 0$ alors :

$$\frac{k_p}{A_{t2}} \text{sgn}(z) |z| > 0$$

Par conséquent : $k_x < 0$

4.2.2 Modélisation de réservoir 2 à une référence variable

Considérant le modèle dynamique pour le réservoir 2, la suite des équations sont considérées pour contrôler le réservoir 2

$$\frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{A_{t1}} = k_1, \frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}} = k_2$$

$$k_1 = k_2 = k$$

Le cas général d'un système non linéaire dont la dynamique s'écrit :

$$\begin{cases} x_3 = l_2 \\ x_4 = \frac{dl_2}{dt} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f + \phi u = -\frac{k^2\sqrt{x_1}}{2\sqrt{x_3}} + \frac{k\eta u}{2\sqrt{x_1}} \end{cases} \quad (4.12)$$

$$\quad (4.13)$$

Avec : $f = -\frac{k^2\sqrt{x_1}}{2\sqrt{x_3}}$, et $\phi = \frac{k}{2\sqrt{x_1}}\eta$

Avec f et ϕ deux fonctions non linéaires, avec $\phi \geq \phi(0) > 0$

La surface de glissement est définie par:

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} . e = \lambda e + \dot{e} \quad (4.14)$$

Avec $\lambda > 0$ et l'erreur $\begin{cases} e = l_{2r} - l_2 \\ e = x_{1r} - x_1 \end{cases}$

Si on dérive l'équation (4.14) ça donne :

$$\dot{s} = \lambda \dot{e}_2 + \ddot{e}_2 = \lambda \dot{e}_2 + \ddot{x}_{1r} - f - \phi u \quad (4.15)$$

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

Stabilité asymptotique :

$$v(s) > 0 \quad \forall s \neq 0$$

Si

$$\dot{v} < 0$$

Passons à la dérivée

$$\dot{v} = s\dot{s}$$

De l'équation (4.15) on obtient :

$$\dot{v} = (\lambda \dot{e}_2 + \ddot{x}_{1r} - f - \Phi u) s \quad (4.16)$$

Pour assurer la commande équivalente il faut que le système doive être sur la surface de glissement.

Si la dérivée de surface de glissement $\dot{s} = 0$ donne :

$$\begin{aligned} \lambda \dot{e}_2 + \ddot{x}_{1r} - f - \Phi u_{eq} &= 0 \\ u_{eq} &= -\frac{f + \lambda \dot{e}_2 + \ddot{x}_{1r}}{\Phi(x)} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Alors la commande u

$$u = u_{eq} + k_x \text{sign}(s) \quad (4.18)$$

$$u = -\frac{f + \lambda \dot{e}_2 + \ddot{x}_{1r}}{\Phi(x)} + k_x \text{sgn}(s) \quad (4.19)$$

En remplace l'équation (4.19) à (4.16) :

$$\begin{aligned} \dot{v} &= (\lambda \dot{e}_2 + \ddot{x}_{1r} - f) s - s (\lambda \dot{e}_2 + \ddot{x}_{1r} - f + \Phi k_x \text{sign}(s)) \\ \dot{v} &= -\Phi k_x \text{sign}(s) s \end{aligned}$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer :

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

Alors

$$\leq -\Phi k_x |s|$$

On sait que : $\Phi = \frac{k}{2\sqrt{x_1}} \eta > 0$ et $|s| > 0$

Alors

$$-\Phi |s| < 0$$

Par conséquent $k_x > 0$

4.3 Etude de robustesse

Dans ce qui suit, nous proposons de concevoir une commande par mode de glissant de niveau d'eau des deux réservoirs en présence de perturbations.

4.3.1 Modélisation de réservoir 2 à référence constante avec perturbations

On rappelle les équations de surface du glissement et de la dynamique du système de la section précédente.

La surface de glissement pour le modèle du 2^e réservoir s'écrit

$$s = \lambda(x_{2r} - x_2) = 0 \quad x_{2r} = x_2$$

Avec :

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

x_{2r} : La référence désirée.

En remplace x_{2r} dans l'équation dynamique des réservoirs couplés ce qui donne :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{k_p}{A_{t2}} u_{\acute{e}q} - \frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{x_{2r}} = 0 \\ u_{\acute{e}q} &= \frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{k_p} \sqrt{x_{2r}} \end{aligned}$$

Et

$$u_s = k_x \operatorname{sgn}(s)$$

On met :

$$u = u_{\acute{e}q} + u_s + P \quad (4.20)$$

On remplace u_s :

$$u = u_{\acute{e}q} + k_x \operatorname{sgn}(s) + P \quad (4.21)$$

On pose :

$$z = x_2 - x_{2r}$$

Passons à la dérivée :

$$\dot{z} = \dot{x}$$

Ce qui donne

$$\dot{z} = \frac{k_p}{A_{t2}} u - \frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{z + x_{2r}} = 0$$

En remplace (4.21) à l'équation z on obtient :

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \frac{k_p}{A_{t2}} \left(\frac{A_{o1}\sqrt{2g}}{k_p} \sqrt{x_{2r}} + k_x \operatorname{sgn}(s) + P \right) - \frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{z + x_{1r}} \\ \dot{z} &= \frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{x_{2r}} - \frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{z + x_{2r}} + \frac{k_p k_x}{A_{t2}} \operatorname{sgn}(s) + \frac{k_p}{A_{t2}} P \end{aligned} \quad (4.22)$$

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

$$\dot{v}(z) = \dot{z} z$$

En remplace l'équation (4.22) dans l'équation de la dérivée de Lyapunov:

$$\dot{v}(z) = \left(\frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{x_{2r}} - \frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}} \sqrt{z + x_{2r}} + \frac{k_p k_x}{A_{t2}} \operatorname{sgn}(s) + \frac{k_p}{A_{t2}} P \right) z \quad (4.23)$$

$$\dot{v}(z) = \left(\frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}}\sqrt{x_{2r}} - \frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}}\sqrt{z + x_{2r}} \right) z + \left(\frac{k_p k_x}{A_{t2}} \text{sgn}(s) + \frac{k_p}{A_{t2}} P \right) z$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer:

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

$$\left(\frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}}\sqrt{x_{2r}} - \frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}}\sqrt{z + x_{2r}} \right) z + \left(\frac{k_p k_x}{A_{t2}} \text{sgn}(z) + \frac{k_p}{A_{t2}} P \right) z < 0$$

$$\left(\frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}}\sqrt{x_{2r}} - \frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}}\sqrt{z + x_{2r}} \right) + \left(\frac{k_p k_x}{A_{t2}} \text{sgn}(z) + \frac{k_p}{A_{t2}} P \right) |z| < 0$$

Avec $z = x_2 - x_{2r}$

Ce qui donne :

$$\left(\frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}}\sqrt{x_{2r}} - \frac{A_{o2}\sqrt{2g}}{A_{t2}}\sqrt{x_{2r}} \right) = 0$$

$$\left(\frac{k_p k_x}{A_{t2}} \text{sgn}(z) + \frac{k_p}{A_{t2}} P \right) |z| < 0$$

$$\frac{k_p}{A_{t2}} |z| (k_x \text{sgn}(z) + P) < 0$$

On sait que : $\frac{k_p}{A_{t2}} > 0$ et $|z| > 0$

$$\frac{k_p}{A_{t2}} |z| > 0$$

Alors

$$k_x \text{sgn}(z) + P < 0$$

Par conséquent : $k_x < -P$

4.3.2 Modélisation de réservoir 2 à référence variable avec perturbations

On rappelle les équations de la dynamique et de surface de glissement de notre système de la section précédente de mode glissant pour réservoir 2 à une référence variable.

$$\begin{cases} x_3 = l_2 \\ x_4 = \frac{dl_2}{dt} \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f + \Phi u = -\frac{k^2 \sqrt{x_1}}{2\sqrt{x_3}} + \frac{k\eta u}{2\sqrt{x_1}} \end{cases}$$

$$\text{Avec : } f = -\frac{k^2\sqrt{x_1}}{2\sqrt{x_3}}, \quad \phi = \frac{k}{2\sqrt{x_1}}\eta$$

Avec f et ϕ deux fonctions non linéaires, avec $\phi \geq \phi(0) > 0$.

Et la surface de glissement est définie :

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} . e = \lambda e + \dot{e}$$

$$\text{Avec } \lambda > 0 \text{ et l'erreur } \begin{cases} e = l_{2r} - l_2 \\ e = x_{1r} - x_1 \end{cases}$$

La dérivée de surface de glissement ça donne :

$$\dot{s} = \lambda \dot{e}_2 + \ddot{e}_2 = \lambda \dot{e}_2 + \ddot{x}_{1r} - f - \phi u$$

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

Stabilité asymptotique :

$$v(s) > 0 \quad \forall s \neq 0$$

Si

$$\dot{v} < 0$$

Passons à la dérivée

$$\dot{v} = s \dot{s}$$

En remplace la dérivée de surface du glissement dans la dérivée de Lyapunov et on obtient :

$$\dot{v} = (\lambda \dot{e}_2 + \ddot{x}_{1r} - f - \phi u) s$$

Pour assurer la commande équivalente il faut que le système doive être sur la surface de glissement.

Si la dérivée de surface de glissement $\dot{s} = 0$ donne :

$$\lambda \dot{e}_2 + \ddot{x}_{1r} - f - \phi u_{eq} = 0$$

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

En raison des deux étapes de conception du processus SMC, la commande comporte deux parties, à savoir une partie continue et une partie discontinue. Du fait des deux parties de commande, la technologie SMC comporte deux phases, à savoir une phase d'atteinte et une phase de glissement. Dans la phase d'atteinte, les états de la plante sont forcés d'atteindre la surface de glissement spécifiée en un temps fini, ce qui est fait par, interrompt la loi de commande.

Une fois que l'état de l'appareil atteint la surface de glissement, il passera de manière adaptative au mode de glissement, de sorte que la dynamique du système glisse le long de la surface de glissement jusqu'à l'origine.

Cependant, parmi la phase d'atteinte, l'invariance de SMC n'est pas garantie et le système reste sensible aux perturbations. En réalité, les bruits d'échantillonnage, la discrétisation, les retards et

les effets d'hystérésis fournissent généralement des oscillations dans les trajectoires d'état du système.[12]

Alors la commande u

$$u = u_{eq} + k_x \text{sign}(s) + P$$

$$u = -\frac{f + \lambda \dot{e}_2 + \ddot{x}_{1r}}{\phi(x)} + k_x \text{sign}(s) + P \quad (4.24)$$

En remplace (4.24) dans la dérivée de Lyapunov ce qui donne :

$$\dot{v} = (\lambda \dot{e}_2 + \ddot{x}_{1r} - f)s - s(\lambda \dot{e}_2 + \ddot{x}_{1r} - f + \phi k_x \text{sign}(s) + \phi P)$$

$$\dot{v} = -\phi k_x \text{sign}(s)s - \phi Ps$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer :

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

Alors

$$\leq -\phi(k_x \text{sign}(s)s + Ps)$$

$$\leq -\phi(k_x \text{sign}(s) + P)|s|$$

On sait que : $\phi = \frac{k}{2\sqrt{x_1}}\eta > 0$ et $|s| > 0$

Alors

$$-\phi|s| < 0$$

Et

$$k_x \text{sign}(s) + P > 0$$

Alors $k_x \text{sign}(s) > -P$

Où, $k_x \text{sgn}(s)$ est la fonction de contrôle de commutation. k_x C'est le gain de commutation et la fonction signe est définie comme [2] :

$$\text{sgn}(s) \begin{cases} 1 & \text{si } s > 0 \\ 0 & \text{si } s = 0 \\ -1 & \text{si } s < 0 \end{cases}$$

En utilisant la loi du contrôleur donnée, il s'ensuit que :

$$\dot{s} = -w_s \text{sgn}(s) \quad (4.25)$$

- **Pour le réservoir 1 :**

En considérant la loi de commande donnée dans l'équation (3.18) au chapitre 3, nous avons la loi de commande glissante finale u pour le contrôle de niveau dans le réservoir 1 comme suit

$$u = -\frac{f + \lambda \dot{e}_2 + \ddot{x}_{1r}}{\phi(x)} + k_x \text{sign}(s) \quad (3.18)$$

De l'équation (3.15)

$$\begin{aligned}\dot{s} &= \lambda \dot{e} + \ddot{e} = \lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1r} - f - \Phi u \quad (3.15) \\ u &= \frac{w_s \operatorname{sgn}(s) + \lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1r} - f}{\Phi}\end{aligned}$$

Considérons la dérivée de la fonction de Lyapunov comme :

$$\begin{aligned}\dot{v} &= \left(\lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1r} - f - \Phi \left(\frac{w_s \operatorname{sgn}(s) + \lambda \dot{e}_2 + \ddot{x}_{1r} - f}{\Phi} \right) \right) s \\ \dot{v} &= (\lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1r} - f - w_s \operatorname{sgn}(s) - \lambda \dot{e} - \ddot{x}_{1r} + f) s \\ \dot{v} &= -w_s \operatorname{sgn}(s) s\end{aligned}$$

Alors

$$\dot{v} = -w_s |s|$$

- **Pour le réservoir 2**

En considérant la loi de commande donnée dans l'équation (4.19) au chapitre 4, nous avons la loi de commande par mode glissant finale u pour le contrôle de niveau dans le réservoir 2 comme suit :

$$u = -\frac{f + \lambda \dot{e}_2 + \ddot{x}_{1r}}{\Phi(x)} + k_x \operatorname{sgn}(s)$$

On considérant l'équation (4.15)

$$\begin{aligned}\dot{s} &= \lambda \dot{e}_2 + (\ddot{x}_{1r} - \ddot{x}_1) \quad (4.15) \\ u &= \frac{w_s \operatorname{sgn}(s) + \lambda \dot{e}_2 + \ddot{x}_{1r} - f}{\Phi}\end{aligned}$$

Considérons la dérivée de la fonction de Lyapunov comme :

$$\begin{aligned}\dot{v} &= \left(\lambda \dot{e}_2 + \ddot{x}_{1r} - f - \Phi \left(\frac{w_s \operatorname{sgn}(s) + \lambda \dot{e}_2 + \ddot{x}_{1r} - f}{\Phi} \right) \right) s \\ \dot{v} &= (\lambda \dot{e}_2 + \ddot{x}_{1r} - f - w_s \operatorname{sgn}(s) - \lambda \dot{e}_2 - \ddot{x}_{1r} + f) s \\ \dot{v} &= -w_s \operatorname{sgn}(s) s\end{aligned}$$

Alors

$$\dot{v} = -w_s |s|$$

Dans la phase d'atteinte, les états de la plante sont forcés pour atteindre la surface de glissement sélectionnée en un temps fini. Si les points de fonctionnement du système dans le plan de phase ont des valeurs négatives, la loi de commande doit forcer les trajectoires d'état de la plante soient

positives et si il a un signe positif, la loi de commande le forcera à être négatif. Pour atteindre cet objectif de conception, nous avons le arrête la loi de contrôle.

4.4 Résultat expérimentaux :

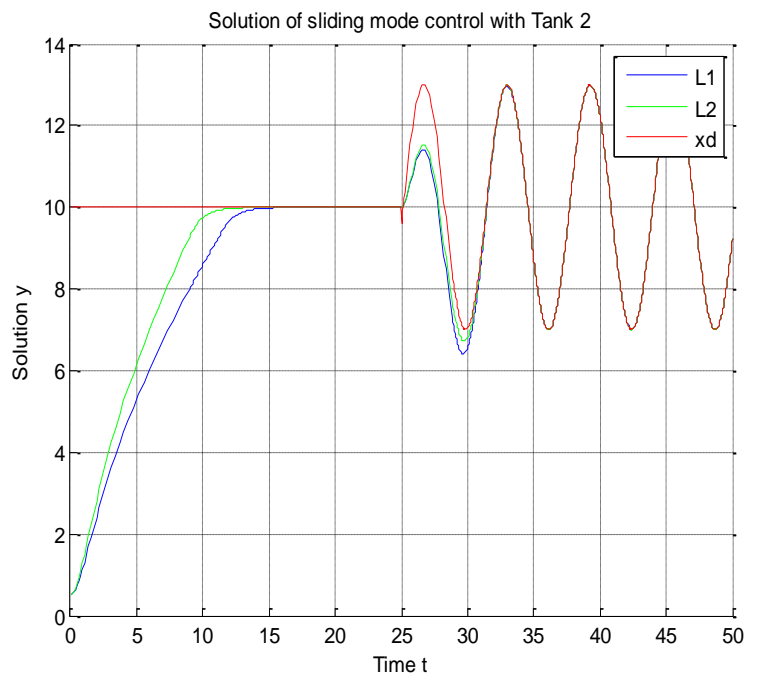
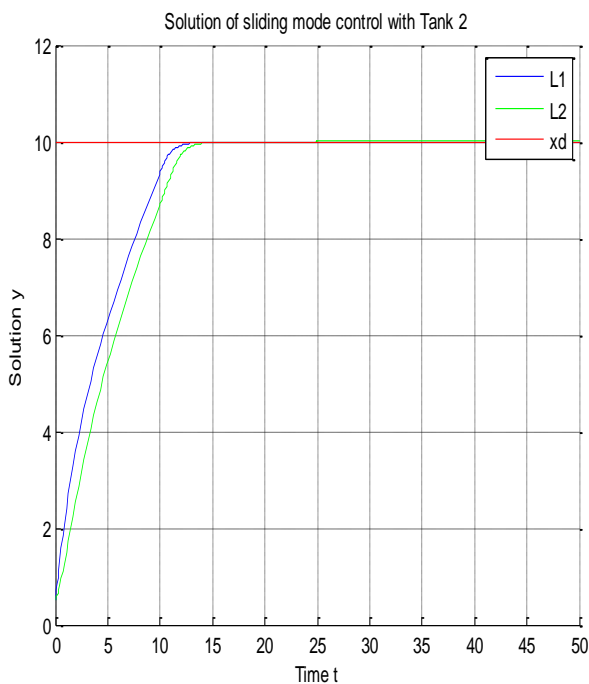


Figure 4. 2 Résultat SMC pour la référence constante et variable de configuration du réservoir 2.

Commentaire :

Dans la deuxième expérience, un niveau de référence constant et variable est choisi pour le réservoir 2 pour montrer le comportement des réservoirs couplés. Le contrôleur proposé produit le niveau de référence du réservoir 1 et commande de tension de la pompe pour garantir que le niveau liquide réel du réservoir 2 suive la référence donnée. Il peut être observé sur la Figure 4.2 et la Figure 4.3 que les niveaux réels du réservoir 1 et du réservoir 2 suivent les références. Les résultats expérimentaux montrés que le programme de contrôle proposé est capable d'améliorer le suivi efficacement la précision et les réponses du niveau de liquide sont très bons et satisfaisants.

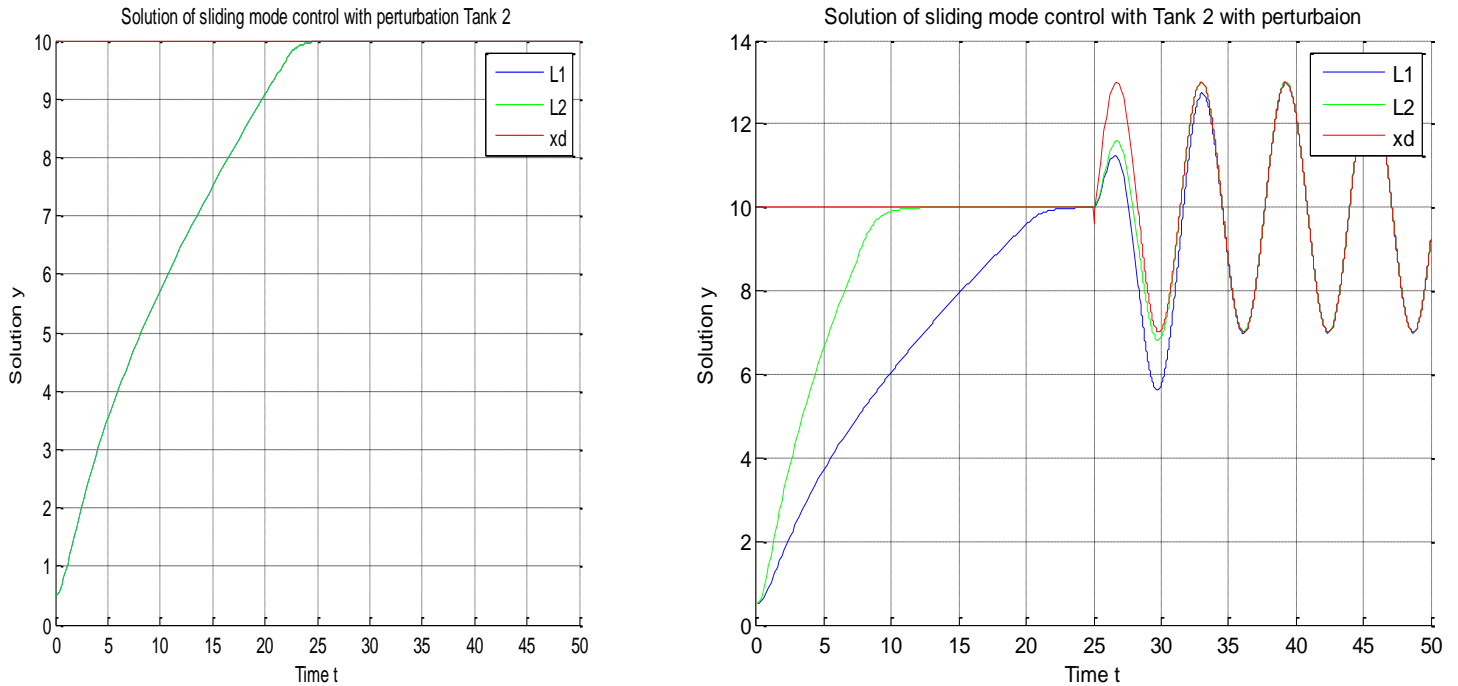


Figure 4. 3 Résultat expérimental SMC pour la référence constante et variable de configuration du réservoir 2 avec perturbations.

Commentaire :

Une perturbation est appliquée dans le système pour montrer les réponses proposées du contrôleur contre les circuits indésirables causés de la pompe. Les résultats de la simulation sont présentés dans les figures 4.2 et 4.3. Nous avons obtenu des résultats satisfaisants dans notre poursuite, un temps de réponse d'environ 23 secondes, et un taux de dépassement autorisé et acceptable dans un système hydraulique. Le changement soudain de la valeur de consigne montre un dépassement et des pointes apparaissent sur la surface de glissement, ceci est dû à la perturbation. De plus, cette commande fait preuve de robustesse et la perturbation appliquée à la commande n'influe pas sur les performances de cette commande. Ce qui affirme que notre commande est robuste.

4.5 Conclusion

En conclusion dans cette étude, SMC a été conçu et appliqué pour commander le niveau de liquide du réservoir afin de maintenir une référence stable suivi de différents signaux de référence pour les deux configurations. Les résultats expérimentaux indiquent que le contrôleur proposé a meilleures performances en termes de capacité d'élimination des erreurs, bonne suivi du signal de référence, robustesse aux variations de paramètres. Il peut également être remarqué à partir des résultats obtenus que SMC est raisonnablement pour les niveaux qui doit être maintenu à un niveau constant et dans le temps suivant varier très bien les signaux de référence.[13]

Conclusion générale

Cette thèse présente la commande par mode glissant pour contrôler le niveau d'eau d'un réservoir couplé dans le premier chapitre l'état de l'art qui parle de certain nombre de stratégies de contrôle du niveau d'eau à un réservoir couplés. Ces stratégies de contrôle ont été conçue pour atteindre les objectifs de contrôle, c'est-à-dire maintenir le niveau de liquide souhaité dans les deux réservoirs du système de réservoirs couplés ainsi que satisfaire également les contraintes physiques dans l'entrée de contrôle.

Le développement de la stratégie de contrôle par mode glissant présentée a été mis en œuvre avec succès à l'aide de modèle dynamique sur MATLAB en considérant le couplage des réservoirs verticaux du système de réservoir couplé. Dans le chapitre 2, Modélisation dédié à la commande du niveau d'eau de deux réservoirs qui présente les variables et les structures de notre modèle et on le conclure par le modèle d'état. Par conséquent, pour contrôler le modèle, aux chapitres 3 et 4, un contrôle en mode glissant pour le réservoir1 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. Il s'est observé que les résultats obtenus à partir du contrôleur que, l'algorithme de contrôle développé assure les meilleures performances robustes ainsi qu'au rejet des perturbations et qu'il nécessite également moins de temps pour s'installer au niveau stable souhaité dans les deux réservoirs.

En effet, la commande par mode glissant réalise la méthode de synthèse malgré la caractérisation de la non-linéarité de la surface, c'est comme dans le cas d'une surface linéaire. Expériences menées d'un système hydraulique à deux réservoirs.

Bibliographie :

- [1] F. Abu Khadra1J.AbuQudeiri , second order sliding mode control of the coupled tanks system, research article, mathematical problems in engineering ,2015
- [2] H. Tuğba Sekban, K. Can, A.Basci , real -time Application of sliding mode controller for coupled tank liquidlevel system , international journal of applied mathematics, electronics and computers, 3rdSeptember 2016
- [3] S. Ramos Paz, J. Anzurez Marin, E. EspinosaJuarez, sliding mode control for a liquid level system, faculty of electrical engineering, universidad michoacana de sannicolas de hidalgo, international conference on computational science and computational intelligence 2016.
- [4] Melle F. Douadi, méthodologie d'optimisation par les techniques intelligentes d'un contrôleur pid pour un système cstr , mémoire de master automatique, spécialité : commande des processus industriels, 06/2014.
- [5]H. Merabet Boulouiha , notes de cours: techniques de commande avancée , centre universitaire de rélizane ahmed zabana faculté des sciences et de la technologie stdépartement d'électrotechnique, année : 2014/2015.
- [6] N.Djennane , résolution d'un problème de commande optimale par la méthode de l'itération sur le vecteur de commande, mémoire De fin D'études de master académique ,spécialité : commande des systèmes.
- [7] M. Sahraoui ,commandes non linéaires de la machine asynchrone, , 2012/2013.
- [8] H. Mokrani - W.Bouloudnine , sur la commande d'un système hydraulique à deux réservoirs couplés , projet de fin d'étude pour l'option du diplôme master en automatique ,option : automatique et informatique industrielle, 2019.

[9] H Abderezzak , contribution à la commande robuste des systèmes non linéaires ,
,diplôme de magister, option: automatique,le 02 / 10 /2014.

[10] A. Chemori , Commande robuste par mode glissant , départementeea master 2
: robotique,université montpellier 2, 2014 / 2015.

[11]H. Khebbache ,tolérance aux défauts via la méthode backstepping des systèmes non
linéaires, mémoire de magistère en automatique, université ferhat Abbas de Setif, 2011.

[12] M. Saad_A.Ramahdan , sliding mode control of nonlinear coupled tank
system ,département of control
engineering college of electronic technology/baniwalid libya, 18/ 2019.

[13] , R. Gamoudi, M. Ellouze, et A. Mami, A Sliding mode command for a system
of coupled reservoirs, superiorinstitute of technology and
data processing , department of physics, faculty of Sciences of
tunis, electronic laboratory ,2008 science publications.

