

Commande à structure variable d'un procédé hydrographique

[Variable structure control of a hydrographic process]

Slimene Hatem¹, M'sahli Faouzi², and Ben Abdennour Ridha³

¹Mechanical Engineering Department,
Higher Institute of Technological Studies,
Ksar Hellal, Tunisia

²Electrical Engineering Department,
National Engineering School of Monastir,
Monastir, Tunisia

³Electrical Engineering Department,
National Engineering School of Gabes,
Gabes, Tunisia

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This paper deals another viewpoint of the variable structure control for the nonlinear systems. The implementation of the variable structure controller on a hydrographic system consisting four tanks shows the effectiveness of the method chosen for systems having a high nonlinearity. To reduce the reluctance effect on the control member is acted upon the switching gain, which depends on the upper limits of the uncertainties of the system. A comparison of variable structure controller with that proportional integral regulator is done to highlight importance of this control technique.

KEYWORDS: Sliding mode control, robustness, educational tool, level regulation, nonlinear, gain switching.

RESUME: Ce papier traite un autre point de vue de la commande à structure variable des systèmes non linéaires. L'implantation du régulateur à structure variable sur un système hydrographique constitué de quatre réservoirs montre l'efficacité de la méthode choisie même pour les systèmes ayant une forte non linéarité. Afin de diminuer l'effet de réticence sur l'organe de commande on agit sur le gain de commutation, qui dépend des limites supérieures des incertitudes du système. Une comparaison du régulateur à structure variable avec celui du régulateur Proportionnel Intégral est effectuée pour mettre en évidence l'importance de cette technique de commande.

MOTS-CLEFS: Commande par mode de glissement, robustesse, outil pédagogique, régulation de niveau, non linéaire, gain de commutation.

1 INTRODUCTION

La théorie des systèmes à structure variable et des modes glissants associés a fait l'objet d'études détaillées au cours de ces trente dernières années [1], [2], [3]. La technique des modes glissants consiste à amener la trajectoire d'état du système considéré vers une surface de glissement où une logique de commutation adaptée la fera osciller de part et d'autre de celle-ci jusqu'à convergence vers le point d'équilibre situé sur cette surface [4]. La commande par mode de glissement présente

des avantages par rapport aux autres approches d'un point de vue simplicité d'implantation et robustesse. Dans ce papier, on exploite la technique de commande par mode de glissement pour synthétiser une loi de commande permettant la régulation de niveau d'eau d'un système hydrographique comme la montre la figure1 [5].

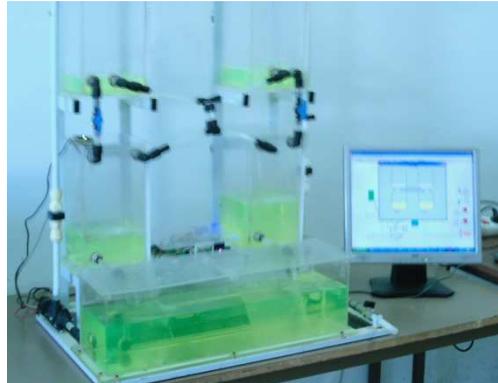


Fig. 1. Système hydrographique

Ce processus se compose de quatre réservoirs en cascade, une cuve de récupération, deux capteurs de niveau, deux capteurs de débit, deux pompes, une carte de puissance pour alimenter en puissance les deux motopompes et une carte de commande et de traitement de données basée sur le microcontrôleur 16F877 qui sert comme interface entre le système physique et l'ordinateur (communication entre MATLAB et carte de commande à travers le port série). Ce système a été utilisé en particulier comme un outil pédagogique dans l'enseignement des stratégies avancées de commande des systèmes multivariables, tel que la réduction de l'effet d'interaction par l'utilisation des compensateurs dans le cas linéaire et la conception décentralisée des contrôleurs [6]. Cependant, la conception particulière du processus considéré ici tient en comptes de la réalité des processus réels dans les raffineries et l'industrie chimique par exemple où le processus de régulation des liquides est plus que demandé.

Le système hydrographique présenté par la figure 1 est une version modifiée de celle présentée par Aström en 1992 [7]. Les niveaux de liquide dans les deux réservoirs inférieurs sont mesurés avec deux capteurs ultrasoniques. L'objectif de la présente étude est de concevoir un contrôleur robuste et stable qui fournit des performances acceptables de point de vu poursuite et régulation.

2 CONCEPTION DE LA COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT POUR LES SYSTEMES NON LINEAIRES

Cette section traite les procédures de conception des contrôleurs en mode de glissement des systèmes dont les entrées / sorties sont linéarisables [8]. On considère un système SISO (Single Input Single Output) non linéaire d'ordre n , décrit par la représentation d'état de la forme :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x) \cdot u \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (1)$$

Avec : x est un vecteur d'état d'ordre n , u est l'entrée de commande, y est une sortie scalaire, $h(x)$ est un champ scalaire régulier appartenant à \mathfrak{R}^n , $f(x)$ et $g(x)$ sont deux champs de vecteurs réguliers appartenant à \mathfrak{R}^n .

En utilisant la dérivée de Lie, ce système peut se transformer sous la forme normale suivante [9] :

$$\begin{aligned}
 \dot{z}_1 &= z_2 \\
 \dot{z}_2 &= z_3 \\
 &\vdots \\
 \dot{z}_{r-1} &= z_r \\
 \dot{z}_r &= -b(z) + a(z)u \\
 \dot{z}_{r+1} &= q_1(z) \\
 &\vdots \\
 \dot{z}_n &= q_{n-r}(z) \\
 y &= z_1
 \end{aligned} \tag{2}$$

Avec $a(z)$, $b(z)$ et $q_i(z)$ sont des fonctions non linéaires dérivées du model d'équations du système, r est un degré relatif du système et z est la variable d'état transformée.

De la forme normale du système, la fonction de commutation (surface de glissement) peut choisir une équation différentielle linéaire d'ordre $r-1$, qui décrit l'évolution de l'erreur $e(t)$ comme sortie :

$$\begin{aligned}
 e(t) &= y(t) - y_d(t) \\
 s &= e^{(r-1)} + c_{r-2}e^{(r-2)} + \dots + c_1\dot{e} + c_0e
 \end{aligned} \tag{3}$$

Avec : c_i sont les paramètres qui décrivent les dynamiques de la surface de commutation $s = 0$.

Les paramètres décrivant la surface de glissement sont donnés pour garantir les racines désirées du polynôme caractéristique $p(\lambda)$.

$$p(\lambda) = \lambda^{(r-1)} + c_{r-2}\lambda^{(r-2)} + \dots + c_1\lambda + c_0 \tag{4}$$

Les valeurs propres du polynôme sont déterminées par un placement de pôle désiré et admettent une partie réelle négative.

La loi de commande est donnée par la relation suivante [10] :

$$u = \frac{1}{a(z)}(b(z) + y_d^{(r)} - \sum_{k=0}^{r-2} c_k e^{(k+1)} - \alpha \cdot \text{sat}(s / L)) \tag{5}$$

Avec :

α : gain de commutation.

e : sortie d'erreur.

y_d : sortie désirée.

$a(z)$ et $b(z)$: sont les fonctions non linéaires trouvées en utilisant la dérivée de Lie.

La fonction saturation donnée par :

$$\text{sat}(s / L) = \begin{cases} (s / L) & \text{si } |s / L| \leq 1 \\ \text{sgn}(s / L) & \text{ailleurs} \end{cases} \tag{6}$$

Où L est l'épaisseur de la fonction de saturation.

3 APPLICATION SUR UN SYSTEME HYDROGRAPHIQUE NON LINEAIRE

Il s'agit d'un processus MIMO (Multi Input Multi Output) composé de quatre réservoirs rectangulaires (figure 2). Le système étudié est composé de deux entrées Q_1 et Q_2 qui sont les débits délivrés par deux motopompes indépendantes l'une de l'autre et de quatre sorties h_1 , h_2 , h_3 et h_4 qui sont les niveaux de liquide de chaque réservoir.

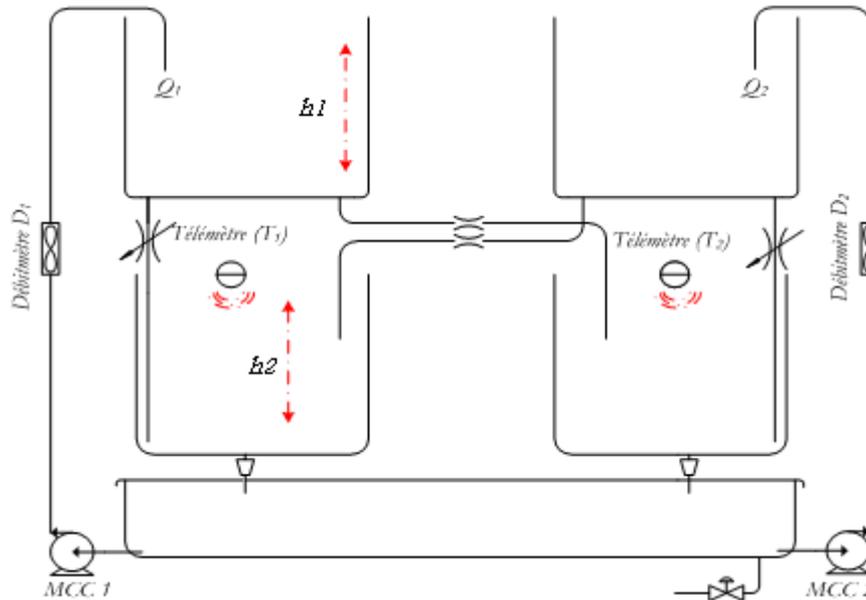


Fig. 2. Système de régulation de niveau d'eau

Dans cette section, on commande seulement la hauteur h_2 . Le modèle d'équations est décrit par la relation suivante:

$$\begin{cases} S \frac{\partial h_1}{\partial t} = Q_{in 1} - Q_{out 1}; \text{ avec } Q_{in 1} = Q_1 \text{ et } Q_{out 1} = c_1 \sqrt{h_1} \\ S \frac{\partial h_2}{\partial t} = Q_{in 2} - Q_{out 2}; \text{ avec } Q_{in 2} = Q_{out 1} \text{ et } Q_{out 2} = c_2 \sqrt{h_2} \end{cases} \quad (7)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} S \frac{\partial h_1}{\partial t} = Q_1 - c_1 \sqrt{h_1} \\ S \frac{\partial h_2}{\partial t} = c_1 \sqrt{h_1} - c_2 \sqrt{h_2} \end{cases}$$

Les constantes du système sont données sur le tableau suivant :

Tableau 1. Valeurs des constantes du système

Constantes	Valeurs numériques (S.I)
c_1	3.479 e-4
c_2	2.226e-4
S	235.6e-4

3.1 COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT DU SYSTEME HYDROGRAPHIQUE

Représentation d'état :

$$\begin{cases} S \frac{\partial h_1}{\partial t} = Q_1 - c_1 \sqrt{h_1} \\ S \frac{\partial h_2}{\partial t} = c_1 \sqrt{h_1} - c_2 \sqrt{h_2} \end{cases}$$

Le vecteur d'état du système $x = [h_1 \quad h_2]^T$, le vecteur de commande $u = Q_1$ et la variable de sortie $y = h_2$.

La forme normale du système :

Le degré relatif du système est $r = 2$. La forme normale du système est décrite par :

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= -b(z) + a(z)u \\ y &= z_1 \end{aligned} \tag{8}$$

La méthode de détermination de la forme normale du système consiste à dériver chaque composante y_i du vecteur de sortie jusqu'à faire apparaître le vecteur de commande.

Les fonctions non linéaires du système transformé sont :

$$\begin{aligned} a(z) &= \frac{c_1^2}{2S^2(S \cdot z_2 + c_2 z_1^{1/2})} \\ b(z) &= \frac{c_1^2}{2S^2} + \frac{c_2}{2S} \left(\frac{z_2}{z_1^{1/2}} \right) \end{aligned} \tag{9}$$

Avec un système de degré relatif $r = 2$, la surface de glissement d'après la relation (3) prend la forme suivante :

$$s = \dot{e} + c_0 e \tag{10}$$

3.2 VALIDATION EXPÉRIMENTALE

Afin de valider les performances de la commande par mode de glissement des systèmes non linéaires, on applique cette technique de commande sur le système hydrographique.

L'application de simulation consiste à :

- relever les allures de la sortie h_2 , la commande u et la surface de glissement s , en appliquant deux commandes différentes : la commande par mode de glissement (Sliding mode control) et le régulateur Proportionnel Intégral.
- comparer les résultats trouvés en variant le gain de commutation α par deux valeurs 1 et 5.

Les paramètres utilisés de l'application sont :

$$\begin{aligned} c_0 &= 0.42 \\ \alpha &= 1 \text{ ou } \alpha = 5 \\ L &= 0.015. \end{aligned}$$

Les résultats obtenus sont présentés sur les figures ci-dessous :

Résultats obtenus pour $\alpha = 1$

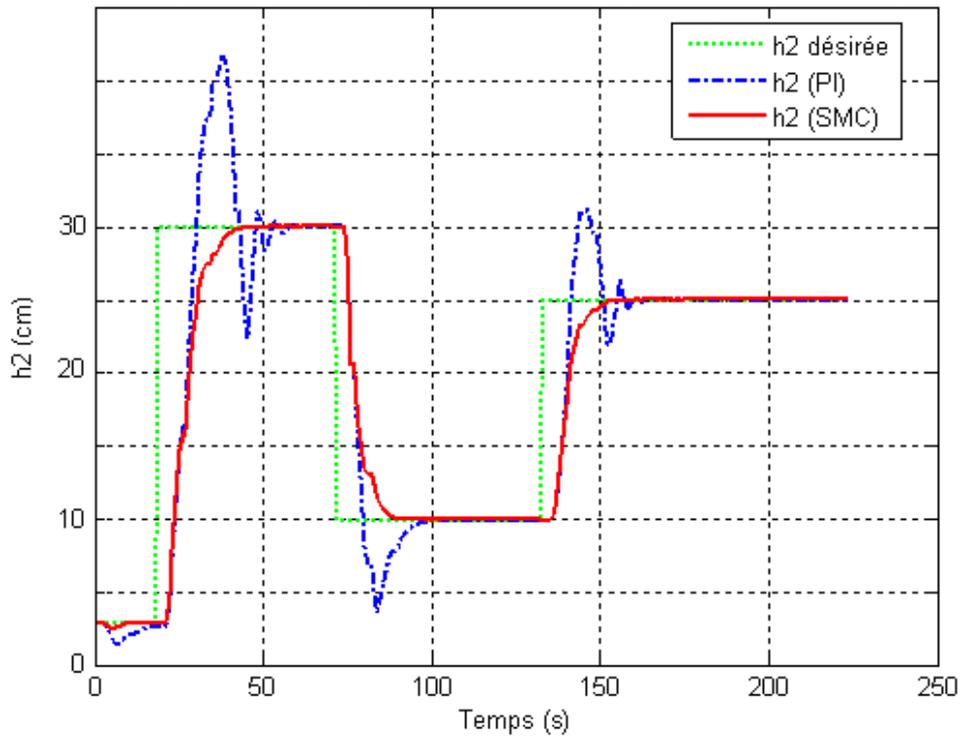


Fig. 3. Allures du niveau h_2

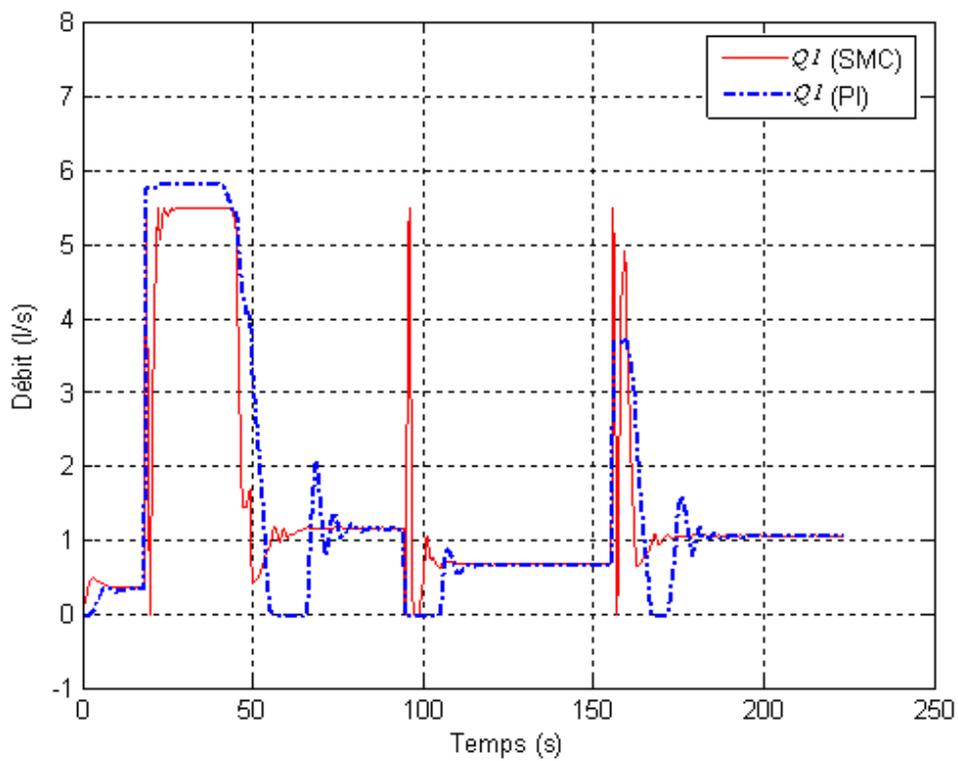


Fig. 4. Allures de la commande Q_1

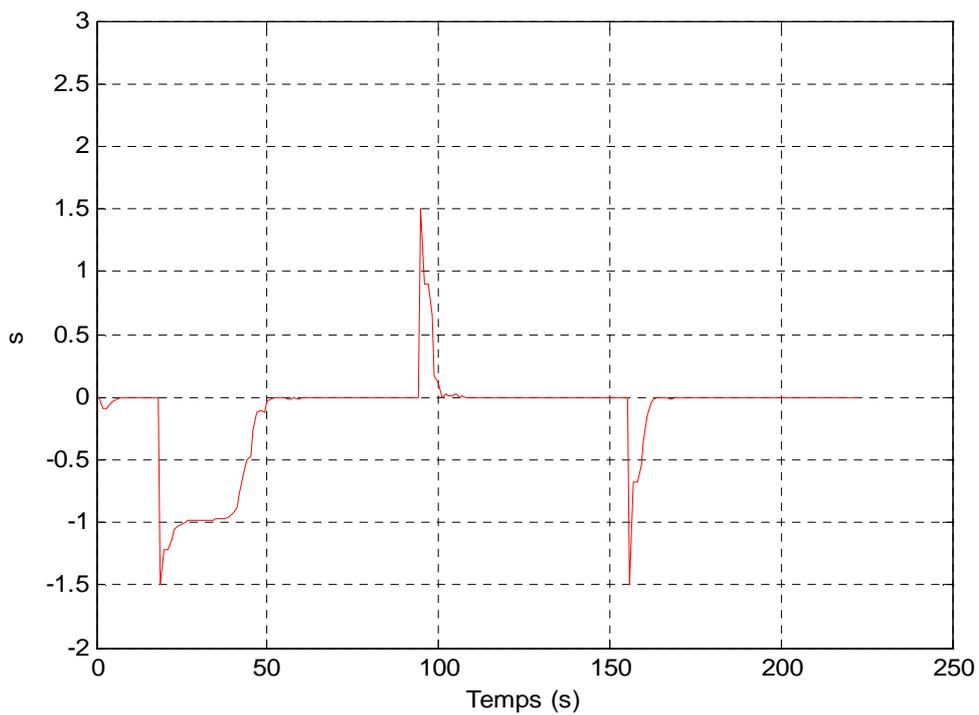


Fig. 5. Allure de la surface de glissement

Résultats obtenus pour $\alpha = 5$

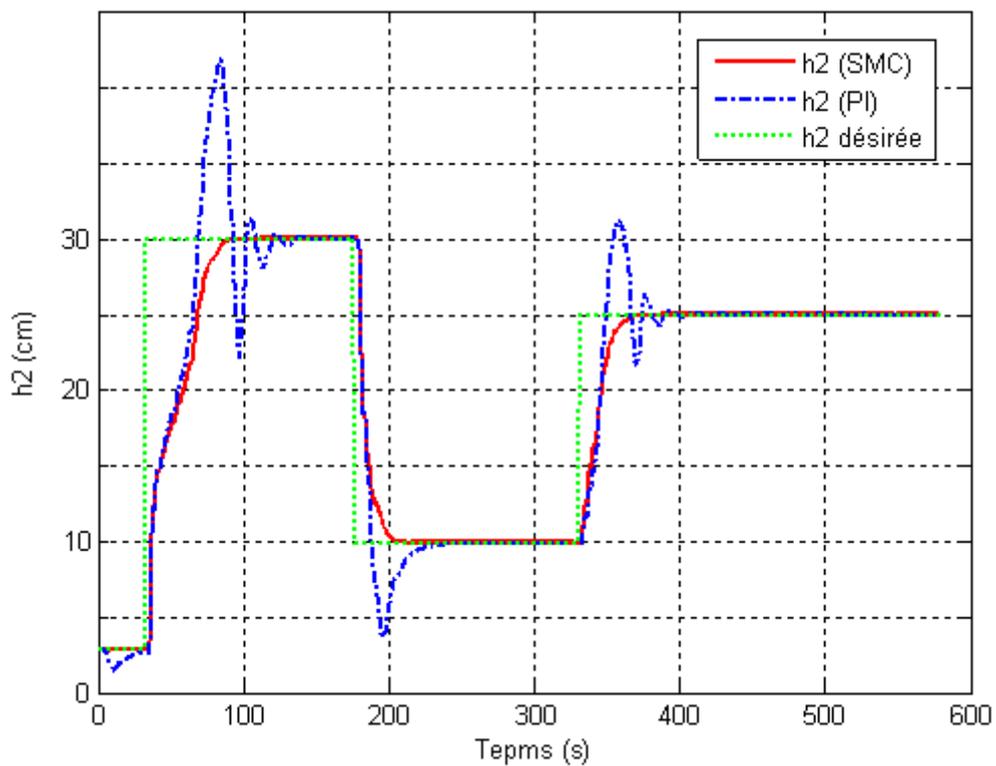


Fig. 6. Allures du niveau h_2

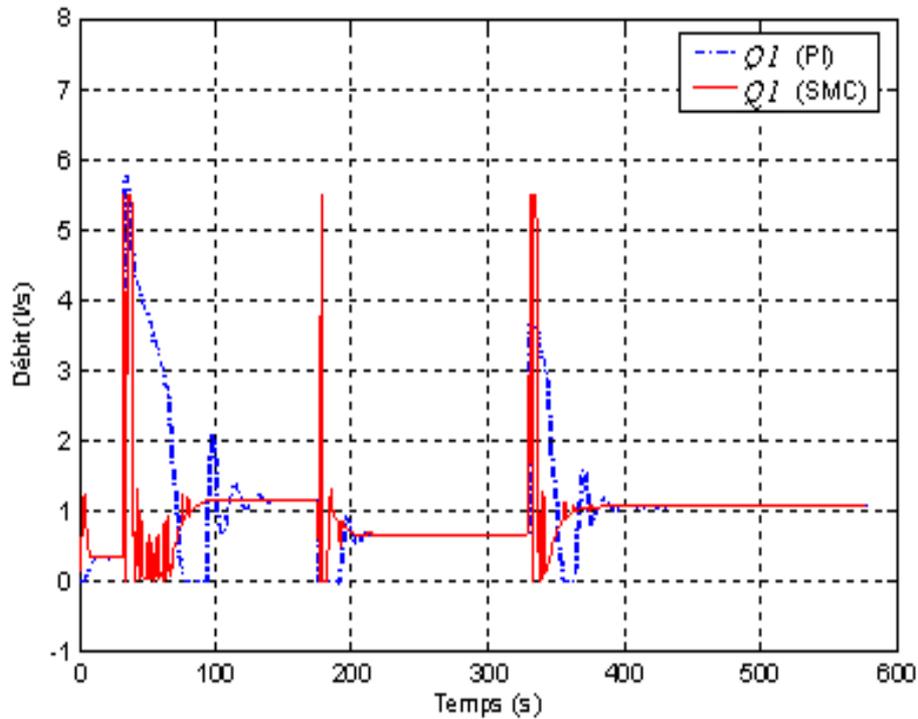


Fig. 7. Allures de la commande u

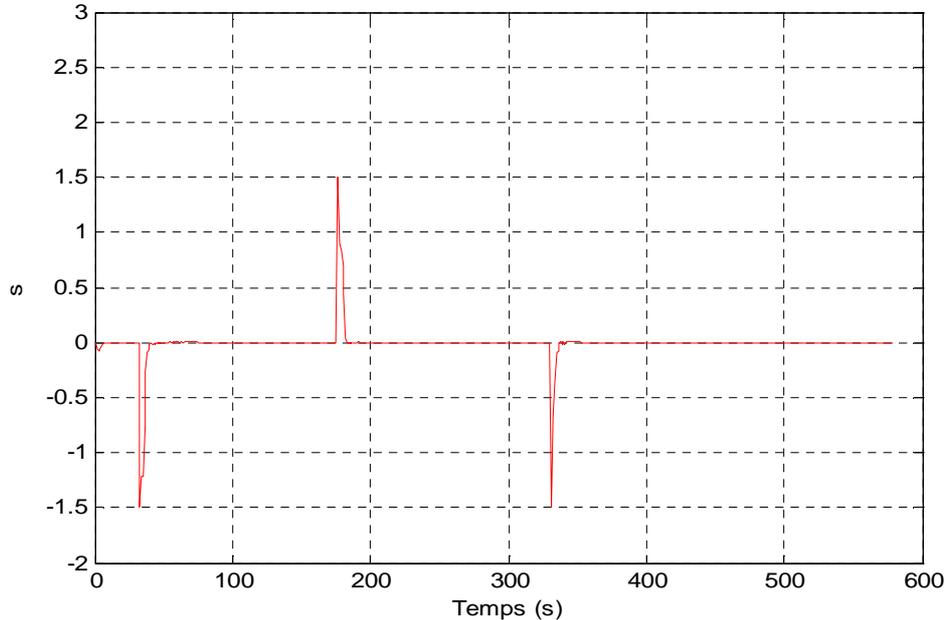


Fig. 8. Allure de la surface de glissement

3.3 INTERPRÉTATION

Les résultats obtenus montrent que l'effet de la commande par mode de glissement appliquée sur le système n'est pas efficace lorsque le gain de commutation est faible ($\alpha=1$) puisque le temps de réponse t_r est élevé. Pour améliorer les performances du contrôleur on augmente le gain de commutation à une valeur élevée. Les résultats des figures 6, 7, et 8

sont obtenus en augmentant la valeur du gain jusqu'à 5. A ce moment on obtient une commande efficace, mais on trouve aussi des mouvements de réticence sur l'action de la commande qui apparaissent sur l'allure de la surface de glissement s (figure 8). Le temps de réponse t_r du système devient plus faible lorsque le gain de commutation α augmente. L'élimination de la réticence de la commande dépend de la valeur du gain α . L'allure du niveau du liquide h_2 obtenue en utilisant le régulateur PI indique l'effet de la performance du régulateur sur le système. Ses résultats montrent des réponses de fortes oscillations durant le changement de la sortie désirée, ce qui explique une forte non linéarité du système.

4 CONCLUSION

La commande à structure variable avec le mode de glissement est généralement connue par le terme commande par mode de glissement. La caractéristique principale de cette technique de commande est l'emploi d'une fréquence élevée de commutation. La commande par mode de glissement conduit n'importe quel état initial d'un système vers une surface spécifiée dans l'espace d'état appelée surface de glissement ou de commutation et le maintien sur la surface pendant un temps ultérieur. Ainsi, le système devient insensible aux incertitudes des paramètres du système et aux perturbations externes. Une nouvelle approche a été développée pour mettre en évidence l'efficacité de la commande par mode de glissement pour les systèmes non linéaires. On a appliqué cette technique de commande sur un système hydrographique formé de quatre réservoirs. A ce moment on obtient une commande parfaite. On remarque que le temps de réponse du système dépend du gain de commutation α .

La réponse du système en utilisant la commande par mode de glissement montre une suivie parfaite de la sortie désirée sans dépassements ni oscillations. Ceci, parce que le système est considéré comme un système du premier ordre une fois qu'il est sur la surface de glissement. L'action de la commande est lisse sans mouvement de réticence. En augmentant la valeur du gain de commutation, un phénomène de mouvement de réticence apparaît sur l'action de la commande. Par conséquence, il faut bien choisir la valeur du gain de commutation qui dépend des limites des incertitudes du système.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier les chercheurs du laboratoire Commande Numérique des Procédés Industriels (CONPRI), spécialement Mr Nejib BEN NASR, pour leurs conseils et encouragements.

REFERENCES

- [1] J. J. Slotine, Weiping Li, " Applied nonlinear control ", Englewood Cliffs, NJ. Prentice-Hall. Inc.,1991.
- [2] A. Decarlo Raymond, H. Zak Stanislaw, P. Matthews Gregory, " Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable Systems : A Tutorial ", in Proceeding of IEEE, Vol. 76, N°. 3, pp. 212-232, Mar. 1988.
- [3] U. Itkis, " Control System of Variable Structure ", Edition Wiley, New York, 1976.
- [4] Auzani bin Jidin, Nik Rumzi Nik Idris, " Sliding mode variable structure control design principals and applications to DC drives ", National Power and Energy Conference (PECon), Kuala Lumpur, Malaysia, 2004.
- [5] N. Ben Nasr, F. M'sahli and R. Ben Abdennour, " Modélisation et Commande par Platitude d'un Système Multivariable", CIFA 2006, Bordeaux, France.
- [6] K.H.Johanson, "The quadropole-Tank process : A multivariable Laboratory process with an adjustable zero", IEEE Transaction on Control Systems Technology, vol.8, no.3, pp. 456-465, May 2000.
- [7] Åström, K. J., Lundh, M, "Lund control program combines theory with hands-on experience". IEEE Control Systems Magazine, vol 12, n° 3, pp. 22-30, 1992.
- [8] R. B. Fernandez, J. K. Hedrik, " Control of multivariable non-linear systems by the sliding mode method ", Int. J. control, Vol. 46, pp. 1019-1040, 1987.
- [9] A. Isodori, " Nonlinear Control Systems ", Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1992.
- [10] M. A. Hussain, P. Y. Ho, " Adaptative sliding mode control with neural network based hybrid models ", Journal of Process control , Vol. 14, pp. 157-176, 2004.