

SYNTHESE D'ALGORITHME DE COMMANDE A STRUCTURE VARIABLE APPLICATION A UNE CHAUDIERE

Reçu le 12/05/2008 – Accepté le 15/12/2009

Résumé

Ce papier décrit la commande multivariable d'un générateur de vapeur par un contrôleur, obtenu à partir de la théorie de la commande à structure variable communément désignée par la théorie des modes glissants. Ce contrôleur réglera les positions des vannes de commande du débit de vapeur, du débit de combustible et la vanne d'alimentation en eau du ballon.

Bien que les variables de sorties soient couplées, ce contrôleur réussit à assurer une commande satisfaisante du système.

Mots clés : Commande à structure variable, modes glissants, surface de glissement, commande multivariable, générateur de vapeur, robustesse.

Abstract

This paper describes a multivariable control of a boiler by sliding mode control. The manipulated variables are the input feed water, the fuel and the steam flow while the controlled variables are the water level, the pressure inside the drum and the output power.

The results of simulation show that the controller gives good performance.

Keywords : Variable structure control, sliding mode, sliding surface, multivariable control, boiler, robustness.

¹ A. BACHTARZI

¹ B. BOUTAMINA

² K. BELARBI

¹ Laboratoire d'Automatique et Robotique
Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Université Mentouri
Constantine – Algérie

² Département d'Electronique
Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Université Mentouri
Constantine – Algérie

ملخص

تهدف هذه الدراسة الى تجلية التحكم الأوتوماتيكي في نظام تشغيل جهاز لتوليد الطاقة الكهربائية و هو مجموعة مولد بخاري- توربينية ، و يعتبر هذا النظام من الأنظمة التي أوليت اهتماما كبيرا من طرف المهندسين لكونها صعبة المراقبة. لتحقيق هذا الهدف لدينا ثلاث صمامات لمراقبة تدفق الماء إلى خزان التبخر ، تدفق الوقود إلى غرفة الاشتعال و تدفق البخار إلى التربينية و هذا للتحكم في ارتفاع مستوى ماء الخزان و الطعط بداخله و كذا الطاقة الكهربائية المولدة.

النموذج الرياضي لهذا النظام غير خطي و معقد- متعدد المتغيرات. طبقنا على هذا النموذج طريقة التحكم بالا نزلاق و هي طريقة تتميز بالصلابة و القدرة على التحكم في الأنظمة المضطربة.

الكلمات المفتاحية : .: التحكم متغير الشكل ؛ .: التحكم بالإتزلاق ؛ الصلابة ؛ .: التحكم في نظام متعدد المتغيرات ؛ المبخر.

Le système turbine-chaudière est un système multivariable dont les grandeurs à commander sont couplées. Diverses techniques ont été utilisées afin de commander ce système et notamment la commande décentralisée [15], la commande prédictive [22], et la commande par logique floue [16], [23].

Le générateur de vapeur est un élément essentiel pour le fonctionnement des centrales électriques. La régulation du niveau d'eau de ces générateurs pose beaucoup de problèmes à basse charge et on estime que 30% des arrêts d'urgences constatés sont imputables à la régulation du niveau d'eau. Il faut souligner que le générateur de vapeur est un système à déphasage non minimal, fortement non linéaire et difficile à identifier étant donné qu'on ne peut l'isoler du reste de la centrale.

Les mesures du débit de vapeur sortant du générateur deviennent de mauvaise qualité à faible charge, ce qui dégrade le terme d'anticipation. Ces aspects de grande variabilité, combinés à la mauvaise qualité des mesures, rendent la commande classique et actuellement exploitée peu efficace et nécessite la reprise en manuel de la régulation lors des démarrages ou des fonctionnements aux basses charges. Le but de cette recherche est de proposer un contrôleur robuste tenant compte des difficultés de réglage, et de l'environnement défavorable aux faibles charges.

Dans ce papier, nous envisageons la commande d'un générateur de vapeur d'une chaudière par une approche basée sur la théorie de la commande par mode glissant. Ce type de commande a suscité un grand intérêt parmi les chercheurs durant ces dernières années à cause de la simplicité de sa mise en œuvre et sa robustesse vis-à-vis des incertitudes de modélisation et des perturbations sur le système à commander.

Cette technique est basée sur la détermination d'une loi de commande de façon que le point de fonctionnement du système s'approche d'une certaine surface de glissement, fonction du vecteur d'état du système et y demeure. La loi de commande est conçue en deux étapes, la première est une étape d'approche de la surface de commutation et la deuxième, une étape de glissement sur celle-ci vers le point d'équilibre.

Plusieurs méthodes ont été étudiées pour déterminer ces lois d'approches en particulier la commande discontinue proposée par Utkin [4],[5],[6], qui ne peut prendre que deux valeurs suivant le signe de $S(x)$. La caractéristique principale de cette technique est sa structure variable avec la commutation autour de la surface choisie (surface de glissement), engendrant du coup des fréquences de commutation élevées des organes de commande qui peuvent provoquer une détérioration anticipée de l'organe de commande ou exciter des dynamiques hautes fréquences non considérées dans la modélisation du système.

Ceci crée un phénomène de broutement (chattering en Anglais) autour de la surface de glissement qui peut endommager les actionneurs de commande dans la mesure où la commande va osciller entre deux valeurs suivant le signe de $S(x)$ d'une part et ne permet pas généralement le

glissement sur la surface d'autre part. Afin d'améliorer cette technique, la notion de commande équivalente fut introduite pour permettre au système de demeurer sur la surface définie par l'équation $S(x) = 0$. En pratique, ce type de commande permet l'approche du système de la surface de commutation avec un phénomène de broutement plus atténué que dans le cas de la commande discontinue.

Afin de résoudre le problème du broutement et de réduire son influence ou de l'éliminer complètement, d'autres méthodes ont été étudiées par Slotine [9], [10], [11], Gao [1], [2], [3] et Levant [25] en agissant sur la dynamique d'approche de la surface de glissement.

Ce papier est structuré comme suit : dans la section 2, on introduit le modèle de la chaudière, défini par un système d'équations différentielles non linéaires, au niveau de la section 3 nous présenterons la conception du contrôleur en mode glissant. Dans la section 4, des simulations seront présentées sur un modèle non linéaire avec contraintes sur les commandes et un modèle linéaire sans contraintes, les résultats seront commentés.

1. MODELE DE LA CHAUDIERE

Le modèle mathématique de l'ensemble chaudière-turbine est basé sur les travaux d'Astrom et Eklund [21]. Leur modèle a été ensuite étendu pour inclure la puissance Bell et Astrom [13] l'ont combiné à leur travail pour construire un modèle non linéaire multivariable, admettant comme variables d'entrées le débit de combustible (fuel), la position de la vanne de contrôle de la pression et le débit d'eau d'alimentation du ballon et comme variables de sorties : la pression de vapeur dans le ballon, la puissance électrique et la déviation du niveau d'eau.

Bien que le modèle soit d'ordre réduit, il est capable d'illustrer une dynamique complexe associée au système réel. La figure 1 montre un schéma synoptique d'un générateur de vapeur avec une identification des entrées et des sorties du processus complexe :

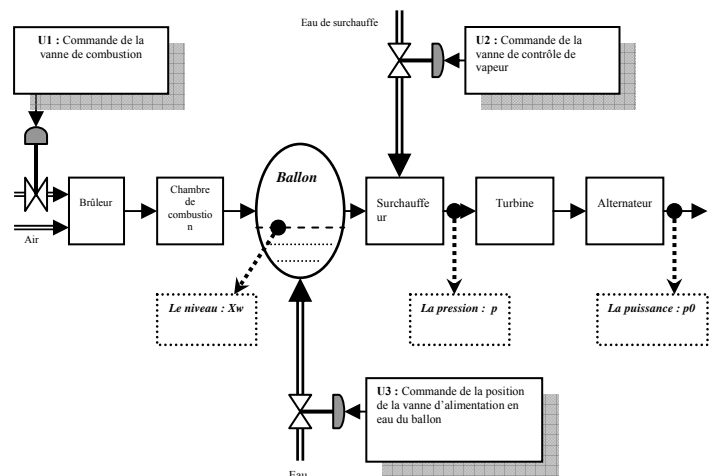


Figure 1 : Schéma fonctionnel d'un générateur de vapeur

Le modèle est représenté par les équations différentielles suivantes [14] :

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} = -0.0018 \cdot u_2 \cdot p^{9/8} + 0.9 \cdot u_1 - 0.15 \cdot u_3 \\ \frac{dp_0}{dt} = ((0.073 \cdot u_2 - 0.016) \cdot p^{9/8}) - 0.1 \cdot p_0 \\ \frac{dp_f}{dt} = \frac{(141 \cdot u_3 - (1.10 \cdot u_2 - 0.190) \cdot p)}{85} \end{cases} \quad (1)$$

Où :

- p : la pression dans le ballon (Kg/cm²) ;
- p_0 : la puissance électrique (Mw) ;
- p_f : La densité du fluide (Kg/m³) ;

Les entrées normalisées du système sont :

- u_1 : position de la vanne de combustion.
- u_2 : position de la vanne de contrôle de vapeur.
- u_3 : position de la vanne d'alimentation en eau.

Ce modèle a été obtenu expérimentalement à partir des données relatives à une chaudière installée en Suède.

Les positions de toutes les vannes sont comprises entre 0 et 1.

Les sorties du système sont : p , p_0 et X_w (le niveau d'eau dans le ballon).

Le niveau d'eau est donné par les relations auxiliaires suivantes :

$$X_w = 0.05 \cdot \left(0.13073 \cdot p_f + 100 \cdot \alpha_{cs} + \frac{q_e}{9} - 67.975 \right) \quad (2)$$

Avec :

$$\alpha_{cs} = \frac{(1 - 0.001538 \cdot p_f) \cdot (0.8 \cdot p - 25.6)}{p_f \cdot (1.0394 - 0.0012304 \cdot p)}$$

$$q_e = (0.854 \cdot u_2 - 0.147) \cdot p + 45.59 \cdot u_1 - 2.514 \cdot u_3 - 2.096$$

Où :

- q_e : taux d'évaporation (Kg/s)
- α_{cs} : facteur indicatif de la qualité de vapeur

Ce modèle peut s'écrire sous la forme standard suivante :

$$\dot{x} = f(t, x) + B(x, t) \cdot u \quad (3)$$

avec :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{dp}{dt} \\ \frac{dp_0}{dt} \\ \frac{dp_f}{dt} \end{bmatrix} ; \quad f = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.016 p^{9/8} - 0.1 p_0 \\ \frac{0.19}{85} p \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.9 & -0.0018 p^{9/8} & -0.15 \\ 0 & 0.073 p^{9/8} & 0 \\ 0 & -\frac{1.1 p}{85} & \frac{141}{85} \end{bmatrix} ; \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}$$

2. CONTROLEUR EN MODE GLISSANT

La commande d'un système en mode glissant consiste à déterminer une loi de commande, telle que sa réponse dans le plan de phase se rapproche d'une surface de glissement et y demeure jusqu'au point d'équilibre (origine des phases). Pour cela, on considère le vecteur d'état du système donné par :

$$x = [p, p_0, p_f]^T \quad (5)$$

Avec :

- p : Pression (Kg/cm²)
- p_0 : Puissance électrique (Mw)
- p_f : Densité du fluide (Kg/m³)

Et le vecteur surface de glissement défini par :

$$S(x) = C \cdot (x - x_{ref}) \quad (6)$$

Avec C une matrice carrée de dim (3x3)

$$S(x) = \begin{bmatrix} S_1(x) \\ S_2(x) \\ S_3(x) \end{bmatrix} ; \quad C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}$$

Plusieurs études se sont intéressées à la mise au point d'une telle loi de commande : Utkin [4],[6], Slotine [12] et plus particulièrement Gao [13] dont les travaux ont porté sur le choix des surfaces de glissement et des lois de commandes.

Dans notre travail, on choisit une loi décrite par Gao [13] et modélisée par une équation différentielle spécifiant la dynamique de la fonction de commutation dont la forme sera donnée par l'équation suivante :

$$\dot{S}(x) = -Q \cdot \text{sign}(S(x)) - K \cdot S(x) \quad (7)$$

Avec :

$$Q = \text{diag}([q_1 \quad q_2 \quad q_3]) \quad \text{et} \quad K = \text{diag}([k_1 \quad k_2 \quad k_3])$$

q_i et k_i sont positifs

Sachant que : $\dot{S}(x) = C \cdot \dot{x}$ et en reportant dans l'équation (7), on aura :

$$C \cdot \dot{x} = -Q \cdot \text{sign}(S(x)) - K \cdot S(x) \quad (8)$$

En tenant compte de (3), on aura :

$$C \cdot (f + B \cdot u) = -Q \cdot \text{sign}(S(x)) - K \cdot S(x) \quad (9)$$

Le vecteur de commande u sera donné par la relation suivante :

$$u = -(C \cdot B)^{-1} \cdot (C \cdot f + Q \cdot \text{sign}(S(x)) + K \cdot S(x)) \quad (10)$$

Les matrices C , Q et K sont choisis par le concepteur de manière à garantir l'attraction du vecteur d'état vers la surface de glissement. Les paramètres de la matrice C sont choisis de telle sorte que la surface de glissement doit se trouver dans la zone de convergence, les matrices K et Q

sont des constantes positives qui garantissent l'approche du point d'évolution du système vers la surface de glissement $S(x)$.

Cette loi permet d'amener asymptotiquement le point courant vers la position d'équilibre désiré.

En effet, considérant la fonction de Lyapunov suivante :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^T(x) \cdot S(x) \quad (11)$$

En dérivant l'équation de Lyapunov on aura :

$$\dot{V}(x) = \dot{S}^T(x) \cdot S(x) \quad (12)$$

En tenant de l'expression de (8), l'équation (12) s'écrit :

$$\dot{V}(x) = (-Q \cdot \text{sign}(S(x)) - K \cdot S(x))^T \cdot S(x) = -\text{sign}(S(x))^T \cdot Q^T \cdot S(x) - S(x)^T \cdot K^T \cdot S(x) \quad (13)$$

La relation (13) montre que $\dot{V}(x)$ est un vecteur dont toutes les composantes sont négatives ou nulles quelque soit $S(x)$ et que l'état du système tend asymptotiquement vers son point d'équilibre. Lorsque $S(x) = 0$, alors $\dot{V}(x)$ sera nulle.

3. SIMULATIONS ET DISCUSSIONS

La simulation consiste à commander la chaudière par un contrôleur en mode glissant dont l'algorithme a été élaboré ci-dessus. Nous présenterons quatre différents tests de simulations :

- Le premier concerne le modèle non linéaire avec des contraintes sur les commandes.
- Le deuxième test concerne la robustesse de ce contrôleur par rapport à d'éventuelles perturbations et par rapport aux variations de paramètres décrivant le système.
- Le troisième test concernera la réaction du contrôleur face à des changements de références.
- Le quatrième test portera sur le modèle linéaire qui sera déduit par linéarisation du modèle initiale autour d'un point de fonctionnement optimum.

Test 1 :

Dans ce cas, le test consiste à amener le système au point de fonctionnement suivant :

$x_{ref} = [118.8 ; 85.06 ; 470.8]$ à partir du point nominal $x(0) = [108 ; 66.65 ; 428]$

Les contraintes sur les commandes sont les suivantes :

$$\begin{cases} 0 < u_1 \leq 1 \\ 0 < u_2 \leq 1 \\ 0 < u_3 \leq 1 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} \left| \frac{\partial u_1}{\partial t} \right| \leq 0.007 / \text{sec} \\ -2 \leq \frac{\partial u_2}{\partial t} \leq 0.02 / \text{sec} \\ \left| \frac{\partial u_3}{\partial t} \right| \leq 0.05 / \text{sec} \end{cases}$$

avec :

- u_1 = La commande de la vanne de combustion
- u_2 = La commande de la vanne de contrôle de vapeur
- u_3 = La commande de la vanne d'alimentation en eau du ballon.

La loi de commande utilisée dans ce premier test est de la forme (10) et la surface de glissement est définie par (6) :

$$u = -(C.B)^{-1} \cdot (C.f + Q \cdot \text{sign}(S(x)) + K \cdot S(x))$$

et

$$S(x) = C \cdot (x - x_{ref})$$

avec :

$$C = \begin{bmatrix} -0.1 & 0 & 0.16 \\ -0.9 & 0.6 & 0 \\ -0.8 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$Q = \text{diag}([0.001 \ 0.009 \ 0.0008]) ; K = \text{diag}([0.03 \ 0.08 \ 0.09])$$

Les figures 2, 3 et 4 donnent les réponses dans les plans de phases et montrent clairement qu'ils rejoignent le point d'équilibre asymptotiquement aux diverses droites de glissement.

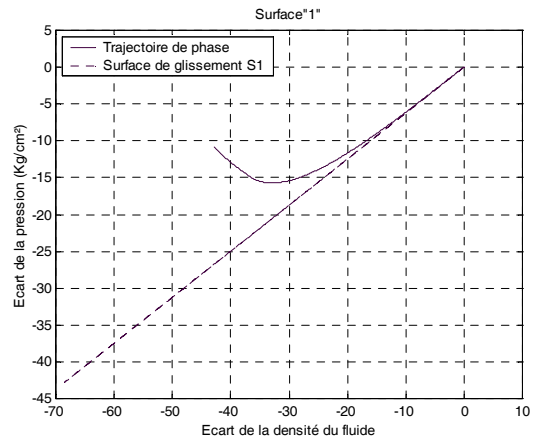


Figure 2 : Trajectoire de phase et surface de glissement $S1$

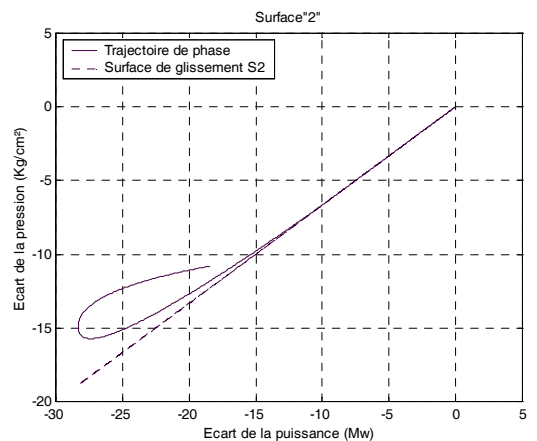


Figure 3 : Trajectoire de phase et surface de glissement $S2$

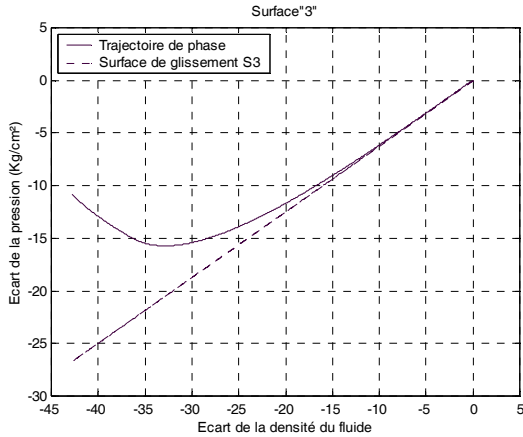


Figure 4 : Trajectoire de phase et surface de glissement S3

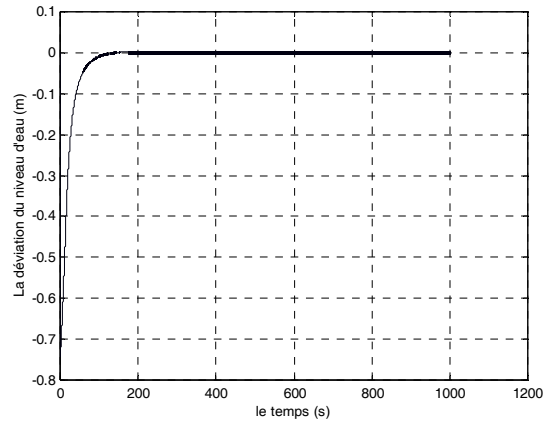


Figure 7 : Déviation du niveau d'eau

Les figures 5, 6 et 7 représentent les sorties du système ainsi que les commandes et montrent que le contrôleur arrive à stabiliser le système au point de fonctionnement désiré.

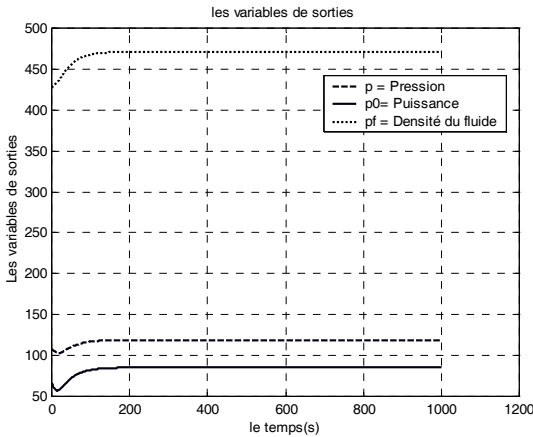


Figure 5 : Sorties p ; p_0 ; p_f

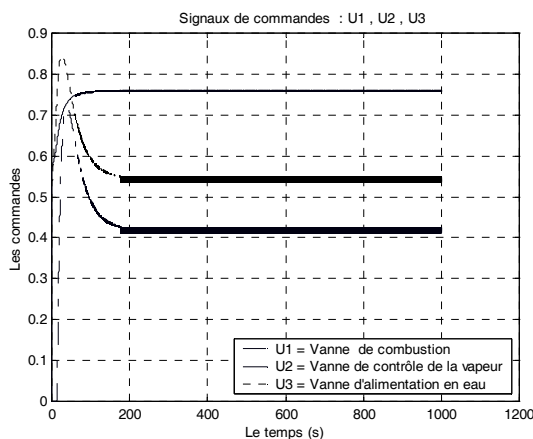


Figure 6 : Commandes U_1 ; U_2 ; U_3

Test 2 :

C'est le test de robustesse du contrôleur, il consiste à connaître la réaction du contrôleur face à une variation des paramètres du modèle pendant le fonctionnement du système.

Cette simulation porte sur une modification des paramètres du système, à cet effet on réalise la simulation suivante :

- A partir de l'instant initial $t = 0$ jusqu'à $t = 500$ s : on exploite le modèle de base étudié précédemment.
- De $t = 500$ s à 2000 s, on utilise le modèle suivant avec le changement de paramètres du modèle initial :

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} = -0.0018.u_2.p^{\frac{9}{8}} + u_1 - 0.2u_3 \\ \frac{\partial p_0}{\partial t} = (0.073.u_2 - 0.03).p^{\frac{9}{8}} - 0.1.p_0 \\ \frac{\partial p_f}{\partial t} = \frac{(141.u_3 - (1.1.u_2 - 0.19).p)}{85} \end{cases} \quad (14)$$

- De $t = 2000$ s à 4000 s, on utilise le modèle suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} = -0.0018.u_2.p^{\frac{9}{8}} + u_1 - 0.2u_3 \\ \frac{\partial p_0}{\partial t} = (0.073.u_2 - 0.03).p^{\frac{9}{8}} - 0.1.p_0 \\ \frac{\partial p_f}{\partial t} = \frac{(150.u_3 - (1.5.u_2 - 0.3).p)}{85} \end{cases} \quad (15)$$

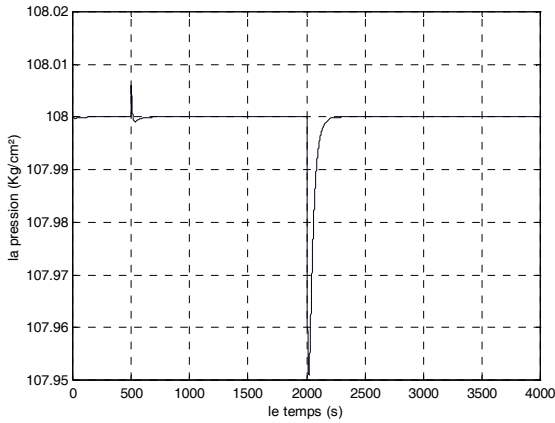


Figure 8 : Pression (p)

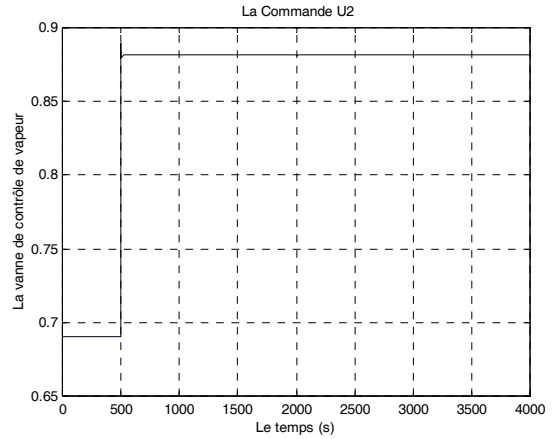


Figure 11 : Commande U_2

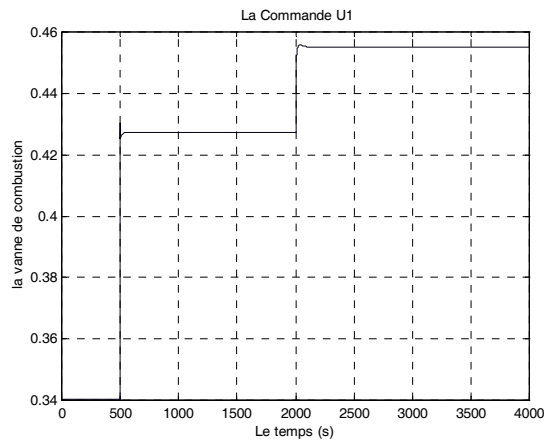


Figure 9 : Commande U_1

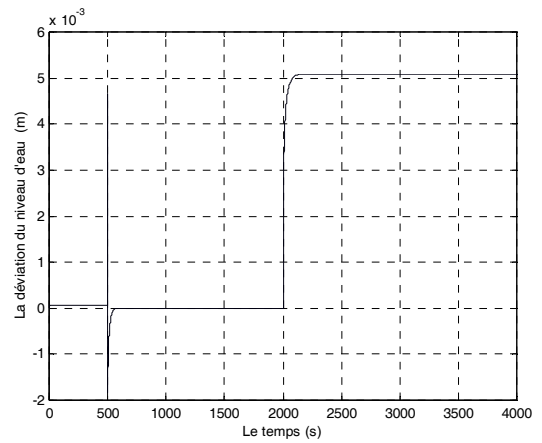


Figure 12 : Déviation du niveau d'eau

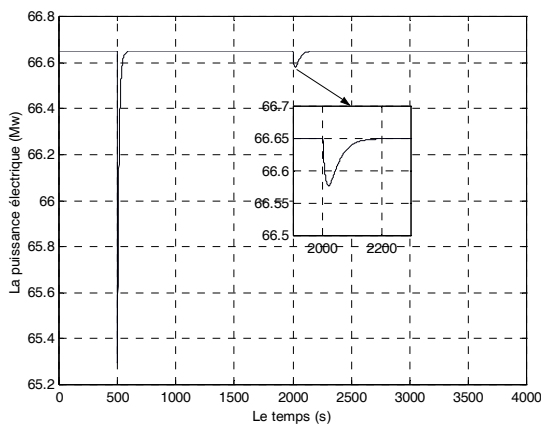


Figure 10 : Puissance (p_0)

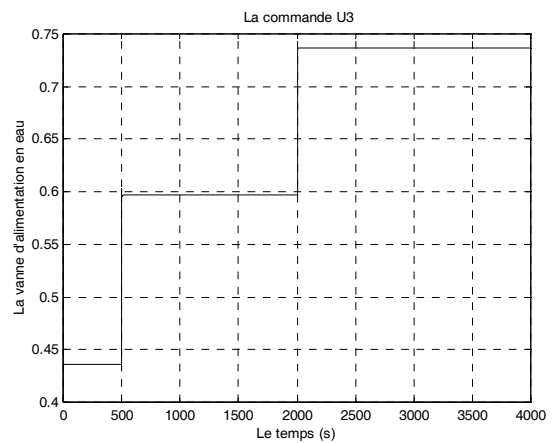


Figure 13 : Commande U_3

A chaque changement du modèle, les grandeurs à commander rejoignent les références désirées, avec des petites fluctuations au moment du changement des paramètres du modèle. On constate que le niveau d'eau (Figure 12.) dans le ballon se stabilise à une valeur légèrement différente de 0 ($5.09.10^{-3}$) pour le troisième changement.

Les commandes générées par le contrôleur satisfont les contraintes imposées aux organes de commandes. Ainsi, nous pouvons déduire par ce test que le contrôleur réagit parfaitement et rapidement aux variations de paramètres du modèle et ce en générant les commandes adéquates à la stabilisation des variables du système aux références désirées.

Test 3 :

Ce sont des simulations qui consistent à tester la réaction du contrôleur face à des changements du point de fonctionnement pour le vecteur d'état. Pour cela on soumet le système à plusieurs points de fonctionnement désiré selon les conditions suivantes :

- Pour $0 < t \leq 1000s$: $X_{ref} = [108 ; 66.65 ; 428]$;
 $U_{ref} = [0.34 ; 0.69 ; 0.435]$
- Pour $1000 < t \leq 2000s$: $X_{ref} = [118.8 ; 85.06 ; 470.8]$;
 $U_{ref} = [0.418 ; 0.759 ; 0.543]$
- Pour $2000 < t \leq 3000s$: $X_{ref} = [129.6 ; 105.8 ; 513.6]$;
 $U_{ref} = [0.505 ; 0.882 ; 0.663]$
- Pour $3000 < t \leq 4000s$: $X_{ref} = [118.8 ; 85.06 ; 470.8]$;
 $U_{ref} = [0.418 ; 0.759 ; 0.543]$
- Pour $4000 < t \leq 5000s$: $X_{ref} = [108 ; 66.65 ; 428]$;
 $U_{ref} = [0.34 ; 0.69 ; 0.435]$

A chaque changement de référence, on remarque que les variables de sorties se stabilisent aux valeurs désirées sans erreurs statiques (figures : 14 ; 16 ; 18).

Le contrôleur réussit à stabiliser le système en générant à chaque fois les commandes nécessaires (figures : 15 ; 17 ; 18).

Les résultats obtenus sont représentés par les figures suivantes :

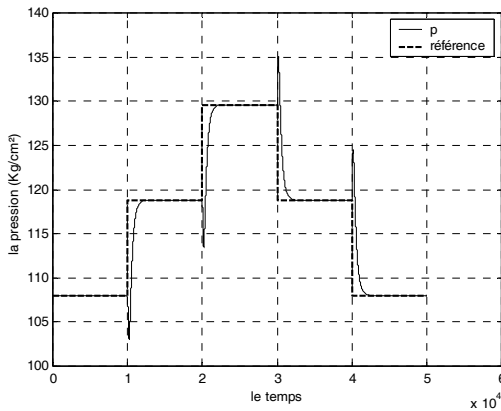


Figure 14 : Pression de vapeur (p)

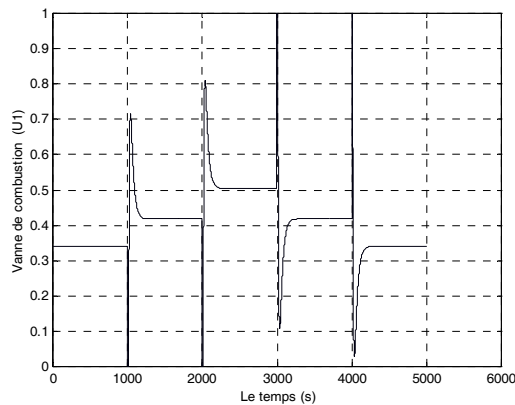


Figure 15 : La commande de la vanne de combustion ($U1$)

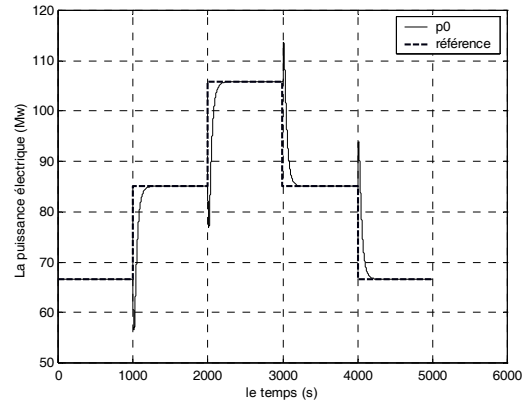


Figure 16 : Puissance électrique ($p0$)

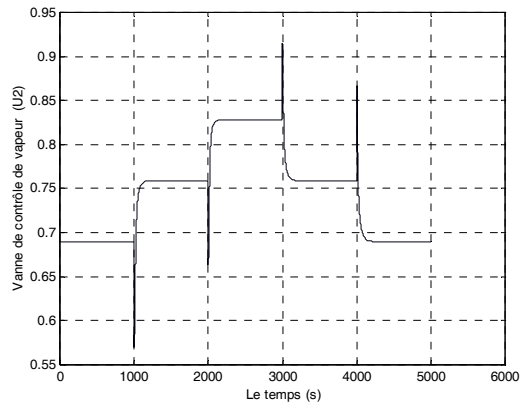


Figure 17 : Commande de la vanne de contrôle de vapeur ($U2$)

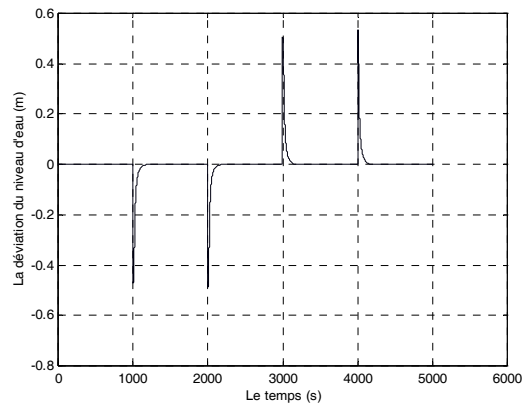


Figure 18 : Déviation du niveau d'eau dans le ballon

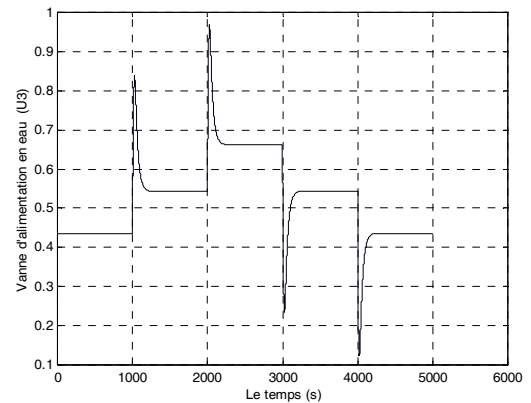


Figure 19 : Commande de la vanne d'alimentation d'eau ($U3$)

Test 4 :

Ce sont des simulations qui sont effectuées sur le modèle linéaire qui est obtenu par linéarisation du modèle initiale (1) et (2). Notre système possède plusieurs points de fonctionnement qui sont définis sur le tableau suivant [14] :

Tableau 1 : Etats de fonctionnement du système

	1 70%	2 80%	3 90%	Nominal 100%	4 110%	5 120%	6 130%
x^01	75.60	86.40	97.20	108	118.8	129.6	140.4
x^02	15.27	36.65	50.52	66.65	85.06	105.8	128.9
x^03	299.6	342.4	385.2	428	470.8	513.6	556.4
u^01	0.156	0.209	0.271	0.34	0.418	0.505	0.6
u^02	0.483	0.552	0.621	0.69	0.759	0.828	0.897
u^03	0.183	0.256	0.340	0.435	0.543	0.663	0.793

La linéarisation sera effectuée autour du point de fonctionnement nominal défini par les entrées et les sorties suivantes :

$$x^0 = [108 ; 66.65 ; 428] \quad ; \quad u^0 = [0.34 ; 0.69 ; 0.435]$$

A partir de ces valeurs nominales, un modèle linéaire est obtenu par les séries de Taylor tronquées au premier ordre des équations non linéaires.

La dynamique non linéaire est de la forme standard :

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u)$$

La linéarisation du système autour du point de fonctionnement (x^0 , u^0) nécessite le calcul des matrices du système linéaire :

$$A' = \left[\frac{\partial f}{\partial x} \right]_{(x^0, u^0)} \quad ; \quad B' = \left[\frac{\partial f}{\partial u} \right]_{(x^0, u^0)}$$

L'approximation linéaire du système sera de la forme :

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = A' \bar{x} + B' \bar{u}$$

$$\text{avec : } \bar{x} = x - x^0 \text{ et } \bar{u} = u - u^0$$

Les matrices du système linéaire sont données par :

$$A' = \begin{bmatrix} -2.509 \cdot 10^{-3} & 0 & 0 \\ 6.94 \cdot 10^{-2} & -0.1 & 0 \\ -6.69 \cdot 10^{-3} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad ; \quad B' = \begin{bmatrix} 0.9 & -0.349 & -0.15 \\ 0 & 14.155 & 0 \\ 0 & -1.389 & 1.659 \end{bmatrix}$$

La synthèse de la commande sera définie comme suit :

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}} &= A' \bar{x} + B' \bar{u} \\ S(x) &= C \cdot (x - x_{ref}) \\ \dot{S}(x) &= -K \cdot S(x) \end{aligned}$$

Les conditions de convergences sont assurées selon le critère de Lyapunov .

La commande sera définie par :

$$\bar{u} = -(C \cdot B')^{-1} \cdot (C \cdot A' \bar{x} + K \cdot S(x))$$

On garde les mêmes paramètres de la matrice C et K , utilisés dans la partie commande du système non linéaire avec les contraintes imposées.

Les divers tests donnent les résultats suivants :

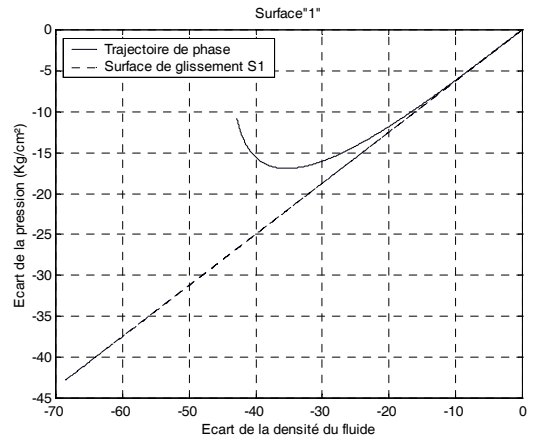


Figure 20 : Trajectoire de phase et surface de glissement $S1$

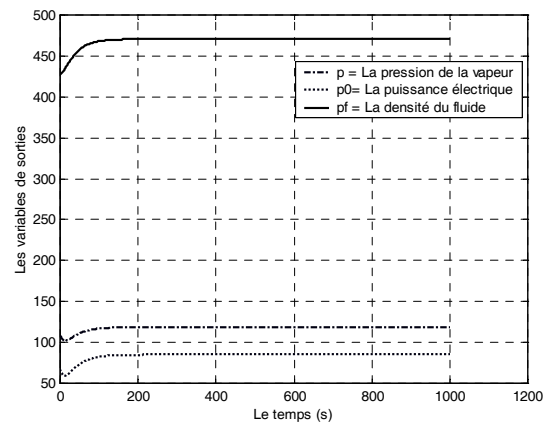


Figure 21 : Variables de sorties p , $p0$ et pf

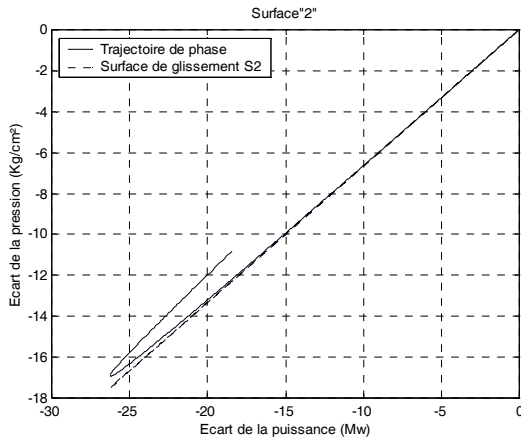


Figure 22 : Trajectoire de phase et surface de glissement S2

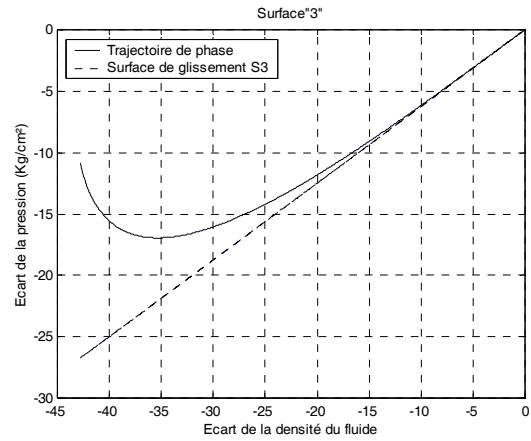


Figure 24 : Trajectoire de phase et surface de glissement S3

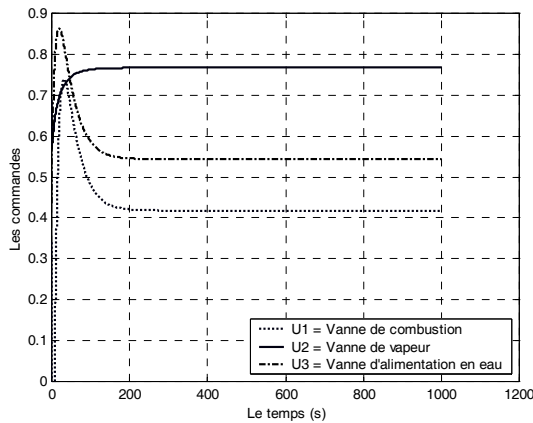


Figure 23 : Les Commandes U_1 , U_2 et U_3

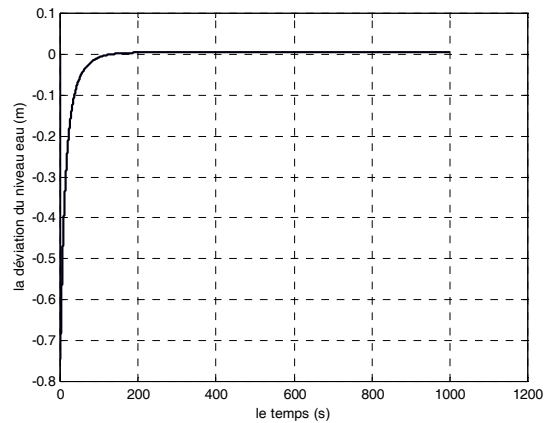


Figure 25 : La déviation du niveau d'eau dans le ballon

Les résultats obtenus sont pratiquement identiques à ceux donnés par le système non linéaire avec contraintes, sauf une petite augmentation de 0.004 pour le niveau d'eau dans le ballon. On peut déduire que le modèle linéaire a un comportement proche de celui du modèle non linéaire et peut être substitué à ce dernier pour une éventuelle commande adaptée aux systèmes linéaires.

CONCLUSION

En général, la commande du générateur de vapeur est une approche monovariante à plusieurs boucles découplées. Dans ce travail, nous avons développé une commande multivariable sans découplage, basée sur la théorie de la commande des systèmes à structures variables.

Néanmoins, cette technique présente un inconvénient majeur dû au phénomène de broutement (Chattering) qui apparaît le long de la surface de glissement.

Afin de réduire ce phénomène, on a utilisé une commande qui assure la convergence du point de fonctionnement vers les surfaces de glissement.

Au vu des résultats des différents tests, nous remarquons que le contrôleur est apte à :

- amener les différentes grandeurs de sorties vers les références désirées.
- réagir efficacement à différents points de fonctionnement, ainsi qu'à une variation des paramètres du système en générant à chaque fois les commandes adéquates.
- commander les systèmes linéaires obtenus par linéarisation des systèmes non linéaires.

Ce contrôleur arrive à bien stabiliser le système multivariable même en présence de perturbations affectant les paramètres du modèle ce qui justifie pleinement la robustesse de cette loi commande.

REFERENCES

- [1] W. Gao, J.C. Hung, "Variable structure control system", IEEE Trans. Indust., Applic. ,Vol. 40, N°1, pp.2-21 ,1993.
- [2] W. Gao , J.C. Hung, "Variable structure control of nonlinear systems: A new approach", IEEE Trans., Ind electron., pp.45-55, 1993.
- [3] J.Y. Hung, W. Gao , J.C. Hung , , " Variable structure control: A survey ", IEEE trans. Ind. Electron. , Vol. 40 , N°1 , pp. 2-21 , 1993.
- [4] V.I. Utkin, "Sliding modes and their Application in variable structure systems", MIR Publishers , Moscow.
- [5] V.I Utkin, "Sliding mode control design principles and applications to electric drives", IEEE transactions on industrial Electronics, Vol. 40, N° 1, February 1993.
- [6] V. I Utkin, "V.S.S. with sliding modes" ,IEEE transaction automatic control, Vol. AC-22, N°2, pp. 212-222, 1977.
- [7] A.F. Filippov, "Differential equations with discontinuous right-hand side", Annales mathématiques, sect. trans. , Vol. 42 ,sect.2, pp. 199-231, 1964.
- [8] H. Asada and J.J.E. Slotine, "Robot analysis and control", John Wiley and sons, 1986.
- [9] J.J.E Slotine, "Sliding controller design for nonlinear systems", I.J.C., Vol.40, N°2 , pp. 421-434, 1984.
- [10] J.J.E Slotine and J.A. Coestsee, " Adaptative sliding controller synthesis for nonlinear systems", I.J.C., Vol.43, N°6,pp. 1631-1651, 1986.
- [11] J.J.E Slotine ans S.S. Sastry, "Tracking control of nonlinear systems using sliding surfaces, with application to robot manipulators", I.J.C., Vol.38, N°2, pp.465- 492, 1983.
- [12] J.J.E. Slotine and W. Li, " Applied Non linear control", Englewood cliffs, New jersey, Prentice Hill, 1991.
- [13] Bell , J. Astrom, "Dynamic models for boiler-turbine-alternator units" , Report TFRT- 3192, Lund institute of technology , Sweden, 1987.
- [14] R. Dimeo , K. Lee, " Boiler-Turbine control system design using a genetic Algorithm", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 10 , issue 4, 1995.
- [15] A. Ben-Abdenour , K.Y. Lee, "A decentralized controller design for a power plant using robustlocal controller and functional mapping", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol.11, issue 2 , 1996.
- [16] X. J. Liu , C.W. Chan, "Neuro-Fuzzy Generalized Predictive Control of boiler steam temperature", IEEE, Transaction on Energy Conversion, Vol. 21, issue 4, pp. 900- 908, 2006.
- [17] R. A. Decarlo, S.H. Zak, G.P. Matthews, "Variable Structure Control of nonlinear multivariable systems: A tutorial", IEEE, Vol.76, N°3 , pp. 212-232 , 1988.
- [18] H. Hashimoto, J.J.E Slotine, J.X. Xu and F. Harashima, "Practical design of V.S.S controller using Balance Condition", IEEE, International Conference on Robotics and automation, North Carolina, U.S.A - Avril 1987.
- [19] A. Sabanovic, F. Bilalovic, "Sliding mode control of AC drives", IEEE, Transaction on industry applications, Vol.25, N°1, 1989.
- [20] H. Buhler, "Réglage par mode glissant", Presse Polytechniques romandes, Lausannes, 1986.
- [21] K. J. Astrom, and K. Eklund, "A simplified non-linear model of a drum-boiler-turbine unit", I.J.C., Vol.16, pp.146-169,1972.
- [22] B.W. Hogg, N.M. El-Rabaie, "Multivariable generalized predictive control of Boiler system", IEEE Transaction on Energy conversion, Vol.6, Issue 2, pp.282-288, 1991.
- [23] H.Habbi, M. Zelmat, B. Ould Bouamama, "A dynamic fuzzy model for a drum-boiler-turbine system", Automatica, Vol.39, pp.1213-1219, 2003.
- [24] S. Laghrouche, M. Smaoui, F. Plestan, X. Brun, "Higher order Sliding Mode Control based on optimal approach of an electropneumatic actuator" , I.J.C ,Vol. 79, pp.119-131 , 2006.
- [25] A. Levant, " Principes of 2-Sliding mode design", Automatica, Vol.43, pp. 576-586, 2007.