

Stabilisation d'un Système Electro-énergétique par Contrôleur Flou en Mode Glissant

Emira Nechadi, Mouhamed Naguib Harmas, Abdelhak Ferhat-Hamida, Khaled Zehar

Adresses des Auteurs

nechadiamira@yahoo.fr

najib_harmas@yahoo.fr

khaledzehir@yahoo.fr

Résumé: Pour améliorer la qualité de service et assurer la continuité de la fourniture d'énergie électrique il faut avant tout, garantir la stabilité dynamique des systèmes électro-énergétiques. En effet les oscillations survenant lors des fréquentes perturbations sur le réseau électrique entravent l'écoulement optimal de la puissance et peuvent causer l'écroulement du système. Cette situation nécessite l'intervention rapide d'un régulateur robuste permettant un fonctionnement stable. Un stabilisateur flou en mode glissant est proposé pour amortir les oscillations. La robustesse, par rapport aux perturbations, de la commande par mode glissant est exploitée conjointement avec un contrôleur flou utilisé pour remédier au problème de la discontinuité inhérent aux commutations en hautes fréquences caractérisant la technique utilisée. La stabilité est garantie par la seconde loi de Lyapunov. Un modèle du quatrième ordre, d'un système électro-énergétique constitué d'une machine synchrone reliée à un jeu de barres infini par une ligne de transmission, est utilisé pour confirmer par simulation la pertinence de la méthode proposée.

Mots clés : Flou, Mode Glissant, Machine Synchrone, Placement de Pôles, Robustesse, Système Electro-énergétique.

1 Introduction

Un système électro-énergétique constitué d'une machine synchrone liée par une ligne de transmission à un jeu de barres infini est une source d'énergie électrique souvent soumise à des petites perturbations lors de variations brusques de la charge ou lors de l'occurrence de défauts sur le réseau. Les problèmes de stabilité des systèmes électro-énergétiques sont principalement ceux des machines synchrones fournissant la quasi-totalité de cette forme d'énergie. La stabilité dynamique concernant toujours les petites perturbations appliquées au système en état normal, son étude détermine l'intervention des éléments de régulation nécessaires pour rendre, un système perturbé, à l'état d'équilibre suivant des consignes préalables. Les systèmes électro-énergétiques sont des systèmes fortement non linéaires dont les paramètres du modèle linearisé dépendent du point de fonctionnement et requiert donc une commande robuste. Les systèmes de commande par mode glissant utilisent des algorithmes qui assurent la robustesse du comportement du processus par rapport aux variations paramétriques et perturbations. Cependant les vibrations résiduelles en hautes fréquences inhérentes à la commande par mode glissant demeurent un inconvénient considérable qu'on propose de traiter par l'introduction d'un

contrôleur flou en mode. La surface de glissement étant déterminée par la technique de placement de pôles, la commande floue utilisée est basée sur la défuzzification étant réalisée à l'aide de la méthode du centre de gravité.

La technique de synthèse de Lyapunov garantissant la stabilité asymptotique du système en boucle fermée, la simulation d'un système électro-énergétique est utilisée pour confirmer par simulation l'efficacité de l'approche préconisée.

2 Commande par mode glissant

Soit le système non linéaire représenté par l'équation d'état suivante :

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + g(x, t) u(t) + w(x, t) \quad (1)$$

où $x(t) \in \mathcal{R}^n$ représente le vecteur d'état, $u(t) \in \mathcal{R}^m$ le vecteur de commande, $w(x, t) \in \mathcal{R}^n$ représente le vecteur des perturbations.

$f(x, t) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ et $g(x, t) \in \mathcal{R}^{n \times m}$ caractérisent le système nominal si $w(x, t) = 0$.

En supposant l'hypothèse suivante satisfaite [5]:

$$w(x, t) = g(x, t) v(x, t) \text{ et } \left| v_j(x, t) \right| \leq k_j \quad (2) \\ \forall x, \forall t, j = 1, 2, \dots, m.$$

En admettant que le glissement existe dans tous les hyperplans de l'espace d'état considéré, la forme de la surface de glissement est donnée par l'expression suivante:

$$S(x, t) = Gx \tag{3}$$

où G est une matrice de dimension $m \times n$, appelée matrice de gain de glissement est déterminée par la méthode de placement de pôles [3].

La loi de commande par mode glissant comprend en général deux termes : la commande équivalente et la commande discontinue de commutation.

2.1 Commande équivalente

La commande équivalente correspond à la commande du système nominal ($w(x, t) = 0$) permettant de satisfaire la condition : $\dot{S}(x, t) = 0$. On a en effet :

$$\frac{\partial S}{\partial x} [f(x, t) + g(x, t) u_{eq}(t)] + \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \tag{4}$$

$$u_{eq}(t) = - \left[\frac{\partial S}{\partial x} g(x, t) \right]^{-1} \left[\frac{\partial S}{\partial x} f(x, t) + \frac{\partial S}{\partial t} \right] \tag{5}$$

2.2 Commande de commutation

La commande discontinue ou de commutation, permettant de garantir la condition d'attractivité et responsable du glissement peut être choisie de la forme

$$u_{c,j} = - \sum (k_j + d_j |x_i|) \text{sign}(j_j(x)) \tag{6}$$

où : $j_j(x) = S \frac{\partial S}{\partial x} g_j(x, t)$ (7)

et $g_j(x, t) \in \mathbb{R}^n$ est la j^{me} colonne de $g(x, t)$.

La commande par mode glissant est donnée par :

$$u = u_{eq} + u_c \tag{8}$$

3. Commande floue

Un contrôleur flou a généralement deux entrées, l'erreur et sa dérivée. La figure suivante présente le schéma structurel d'un contrôleur flou appliqué à un système électro-énergétique.

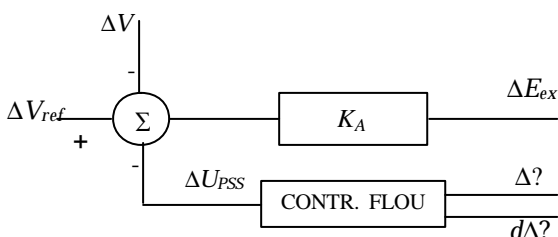


Fig.1. Schéma bloc d'un contrôleur flou.

L'univers de discours est divisé en sept sous ensembles flous représenté chacun par une fonction d'appartenance triangulaire, la fuzzification réalisée à l'aide de l'opérateur Min-Max et la méthode du centre de gravité est utilisé pour la défuzzification. La matrice d'inférence est donnée dans le tableau suivant :

Δw	$\frac{d}{dt} \Delta w$						
	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
NG	u_NG	u_NG	u_NG	u_NG	u_NM	u_PP	u_ZE
NM	u_NG	u_NM	u_NM	u_NM	u_NP	u_ZE	u_PP
NP	u_NG	u_NM	u_NP	u_NP	u_ZE	u_PP	u_PM
ZE	u_NG	u_NM	u_NP	u_ZE	u_PP	u_PM	u_PG
PP	u_NM	u_NP	u_ZE	u_PP	u_PP	u_PM	u_Pg
PM	u_NS	u_ZE	u_PP	u_PM	u_PM	u_PG	u_PG
PG	u_ZE	u_PP	u_PM	u_PG	u_PG	u_PG	u_PG

Fig.2. Matrice d'inférence.

4. Commande floue en mode glissant

La commande floue par mode glissant combine les avantages des deux techniques. La commande par logique floue est introduite ici afin d'améliorer les performances dynamiques du système et permet de réduire les vibrations résiduelles en hautes fréquences. La commande utilisée est de la forme:

$$u = u_{eq} + u_c + u_f \tag{9}$$

où u_f est la composante floue de la commande et peut être mise sous la forme suivante[9] :

$$u_f = \mathbf{q}^T \mathbf{x}(x, t) \tag{10}$$

où : \mathbf{q}^T est un vecteur de paramètres et $\mathbf{x}(x, t)$ est la fonction floue de base.

Avec :

$$\max_{i=1,2,\dots,n} |q_{ji}| \leq d_i \text{ et } \mathbf{x} > 0 \tag{11}$$

4.1. Théorème : le système non linéaire (1) satisfaisant les hypothèses données par (2) et (11) soumis à la commande définit en (9) converge asymptotiquement vers zéro.

Démonstration :

La fonction de Lyapunov choisie est donnée par

$$V = \frac{1}{2} S^2 \tag{12}$$

Le système est stable si la dérivée de (12) satisfait la condition suivante :

$$\dot{V} = S\dot{S} < 0, S \neq 0 \tag{13}$$

A l'aide des relations (1), (2), (5), (9), (10) et (11) on obtient :

$$\dot{V} = S \dot{S} = S \left[\frac{\partial S}{\partial x} \left(f(x, t) + g(x, t) \left(u_{eq} + u_c + u_f \right) + w(x, t) \right) + \frac{\partial S}{\partial t} \right] \quad (14)$$

$$= S \left[\frac{\partial S}{\partial x} \left(f(x, t) + g(x, t) \left[-\frac{\partial S}{\partial x} g(x, t) \right]^{-1} \times \left[\frac{\partial S}{\partial x} f(x, t) + \frac{\partial S}{\partial t} \right] + g(x, t) \left(u_c + u_f \right) + w(x, t) \right) + \frac{\partial S}{\partial t} \right] \quad (15)$$

en régime stationnaire $\frac{\partial S}{\partial t} = 0$, alors la relation (15)

devient :

$$\dot{V} = S \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t) \left[u_c + \mathbf{q}^T \mathbf{x}(x, t) + v \right] \quad (16)$$

$$= \sum_{j=1}^m \mathbf{j}_j \left[u_{c,j} + \mathbf{q}_{ji} \mathbf{x}_i(x, t) + k_j \right] \quad (17)$$

pour satisfaire la condition (13), on considère les deux cas suivants :

1) pour $\mathbf{j}_j \succ 0$ et selon l'équation (17), il faut que :

$$\sum_{j=1}^m \left[u_{c,j} + \mathbf{q}_{ji} \mathbf{x}_i + k_j \right] \prec 0 \text{ si } u_{c,j} \prec - \sum_{j=1}^m \left[k_j + \mathbf{q}_{ji} \mathbf{x}_i \right]$$

donc, on peut prendre :

$$u_{c,j} = - \sum_{j=1}^m \left[k_j + \mathbf{d}_i \mathbf{x}_i \right]$$

2) pour $\mathbf{j}_j \prec 0$ et selon l'équation (17), il faut que :

$$\sum_{j=1}^m \left[u_{c,j} + \mathbf{q}_{ji} \mathbf{x}_i + k_j \right] \succ 0 \text{ si } u_{c,j} \succ - \sum_{j=1}^m \left[k_j + \mathbf{q}_{ji} \mathbf{x}_i \right]$$

donc, on peut prendre :

$$u_{c,j} = \sum_{j=1}^m \left[k_j + \mathbf{d}_i \mathbf{x}_i \right]$$

dans les deux cas, (13) est satisfaite si on prend la forme de $u_{c,j}$ défini dans (6) ce qui prouve la stabilité au sens de Lyapunov du système en boucle fermée.

5. Simulation

On applique la commande floue en mode glissant à un modèle linéarisé d'un système électro-énergétique constitué d'une machine synchrone liée à un jeu de barres infini par une ligne de transmission.

$$\dot{x}_1 = \frac{D}{M} x_1 - \frac{K_1}{M} x_2 - \frac{K_2}{M} x_3 \quad (18)$$

$$\dot{x}_2 = \mathbf{w}_b x_1 \quad (19)$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{K_4}{T_{d0}} x_2 - \frac{1}{T_{d0} K_3} x_3 + \frac{1}{T_{d0}} x_4 \quad (20)$$

$$\dot{x}_4 = -\frac{K_4 K_5}{T_A} x_2 - \frac{K_4 K_6}{T_A} x_3 - \frac{1}{T_A} x_4 + \frac{K_A}{T_A} u \quad (21)$$

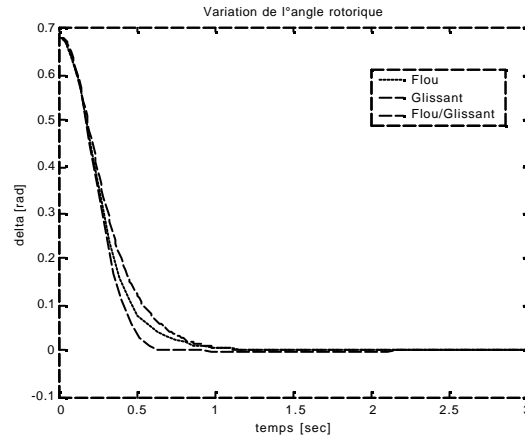
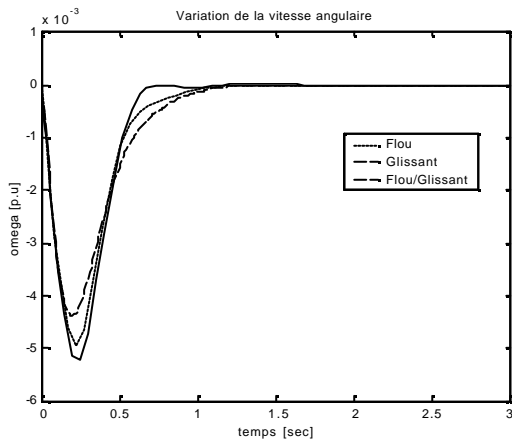


Fig.3. Variations de la vitesse angulaire et d'angle rotorique.

Les résultats obtenus par l'application de la commande proposée donne des performances appréciables et un temps de réponse meilleur à celui de la commande par logique floue et celui de la commande par mode glissant. Cette approche qui ne

nécessite pas de calcul fastidieux, est facile à mettre en œuvre. On remarque aussi que les vibrations résiduelles en hautes fréquences qui dans la commande par mode glissant n'apparaissent plus dans la commande floue en mode glissant.

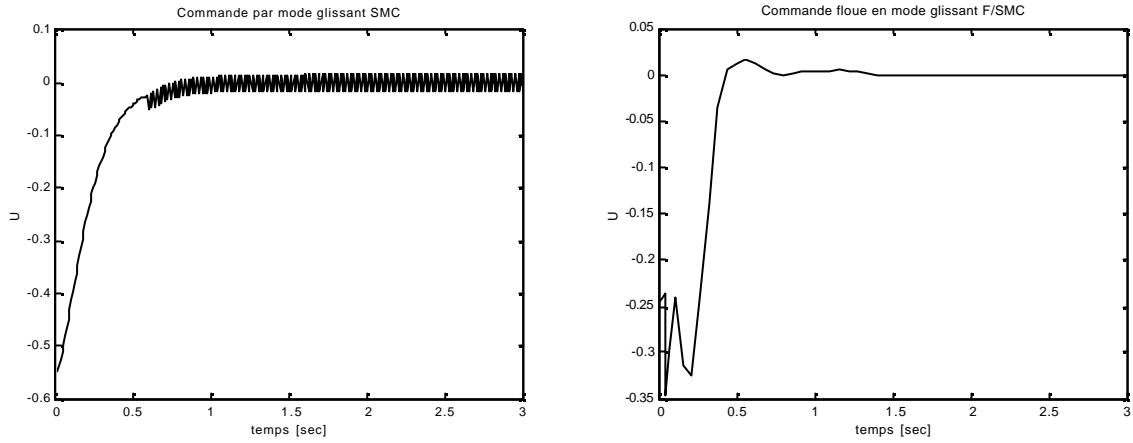


Fig.4. Variations de la commande par mode glissant discontinue et la commande floue en mode glissant.

A fin de vérifier la robustesse de la commande proposée, on observe les réponses du système dans les cas suivants : cas d'une variation de l'inductance de la ligne, le cas d'un changement de la puissance active,

le cas d'un changement de la puissance réactive et le cas d'un changement de la charge et le temps d'inertie.

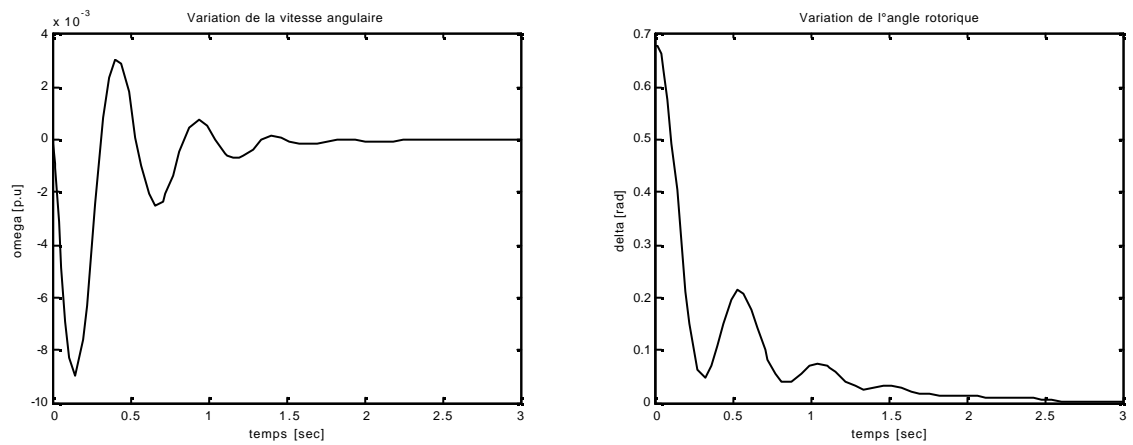


Fig.5. Cas d'une variation de l'inductance de la ligne de 0.2p.u. à 0.4 p.u.

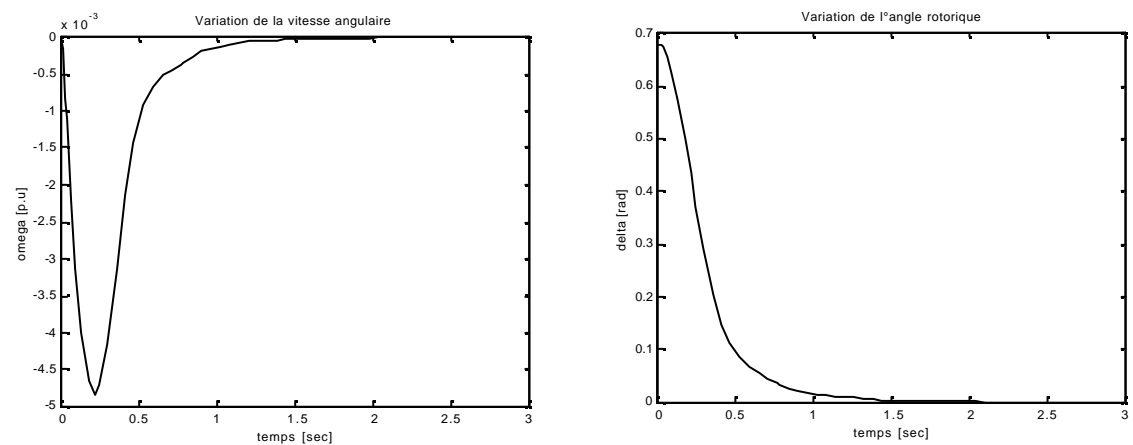


Fig.6. Cas d'un changement de la puissance active de 0.75 p.u à 1 p.u.

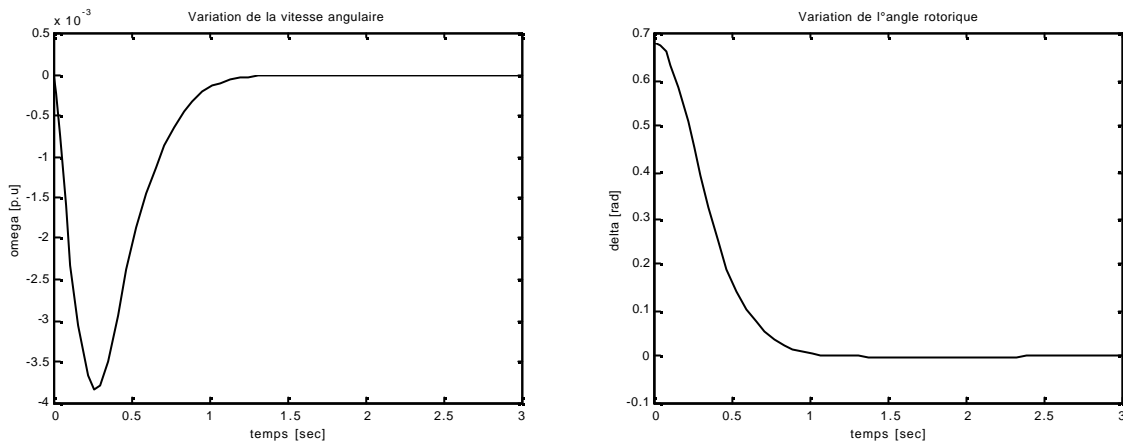


Fig.7. Cas d'un changement de la puissance réactive de 0.015 p.u. à 0.3 p.u.

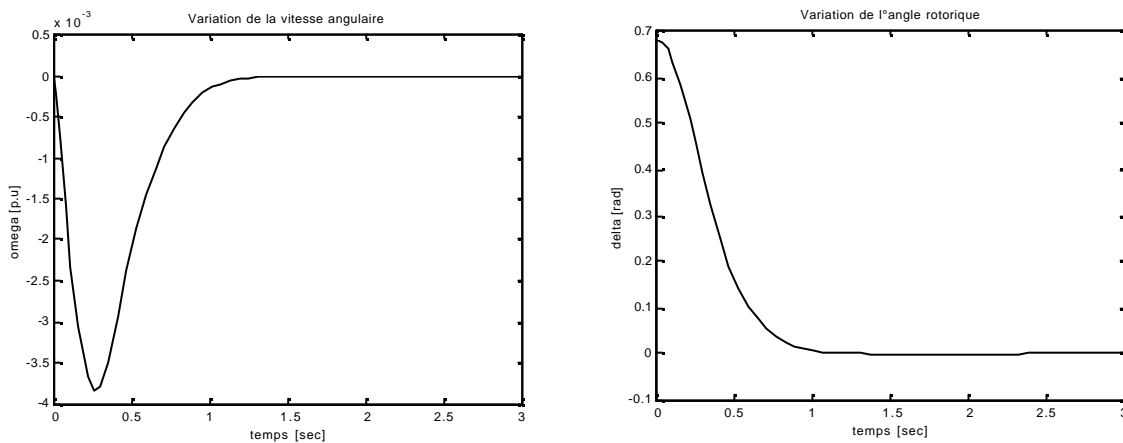


Fig.8. Cas d'un changement de la charge de 25%.

6. Conclusion

Une nouvelle approche a été proposée pour stabiliser un système électro-énergétique constitué d'une machine synchrone liée à un jeu de barres infini par une ligne de transmission. La commande floue en mode glissant proposée a démontrée par simulation la robustesse en boucle fermée et a permis aussi de réduire le broutement inhérent au mode glissant. La stabilité asymptotique a été démontrée ce qui devrait permettre d'envisager une validation sur d'autres applications.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le laboratoire de la Qualité de l'Energie dans les Réseaux Electriques QERE de l'Université de Farhet Abbas Sétif pour son soutien et les moyens.

Références

- [1] E.V. Larsen, D.A.Swann, *Applying power system stabilizers*, part I, IEEE Transactions on power apparatus and systems, vol.pas-100,1981.
- [2] J.Y.Fan, T.H.Ortmeyer, R.Mukundan, *Power system stability improvement with multivariable self-tuning control*, IEEE Transactions on power systems, 1990.
- [3] M.L.Kothari, J.Nanda, K.Bhattacharya, *Design of variable structure power system stabilizers with desired eigenvalues in the sliding mode*, IEE proceed-c, vol.140, 1993.
- [4] Q.P.Ha, H.Trinh, H.T.Nguyen, H.D.Tuan, *Dynamic output feedback SM control using pole placement and linear functional observers*, IEEE Trans. On Indus.Elec., vol.50, 2003.
- [5] J.Ackermann's, V.Utkin, *Sliding mode control design based on Ackermann's formula*, IEEE transactions on automatic control, vol.43.no.2,1998.
- [6] VI.Utkin, *Sliding modes in control optimization*,

springer-verlag,1992.

[7] S.S. Lee, J.K. Park, *Design of power system stabilizer using observer/SMC , observer/SM model following and Hinf / SMC for small signal stability study*, Electrical & energy systems, vol.20,1998.

[8] L-X.Wang, *Fuzzy Systems are Universal Approximators*, Signal and Image Processing Institute, Depart of Electrical Engineering Systems, Univ of Southern, California, Los Angles, CA 90089-2564,pp.1163-1169, 1992.

[9] L-X.Wang, J.M. Mendel, *Fuzzy Basis Function Universal Approximation and Orthogonal Least-Squares Learning*, IEEE Trans, on Neural Networks, Vol 3, n 5, pp.807-814, 1992.

[10] H. Bühler, *Réglage par Logique Floue*, Presses Polytechnique, Romandes, Lausanne, Suisse, 1994.

[11] B.B.Meunier, *La Logique Floue et ses Applications*, édition Additon-Wesley, France, 1995.

[12] R.Ketata, *Méthodologie de Régulation* 100

Numérique incluant la Logique Floue, INSA, Toulouse, 1992.

[13] D.Driacov, H.Helland-Doorn, M.Reinfrank, *An Introduction of Fuzzy Control*, Germany, 1996.

[14] J.M.Mendel, *Fuzzy Logic System for Engineering*, IEEE, Vol.83, n 3, 1995.

[15] P.Borne, J.Rozioer, *Introduction à la Commande Floue*, Édition Technip, 1998.

[16] L.A-Zadeh, *Fuzzy Logic*, Proceeding of IEEE, 1988.

[17] R-J.Lian, S-J.H, *A .mixed fuzzy controller for MIMO Systems*, Fuzzy Sets and Systems, Vol .120, pages 73-93, 2001.

[18] J.L.Castro, *Fuzzy Logic Controllers are Universal Approximators*, IEEE Translations on systems, Man and Cybernetics, Vol.25, p.629-634, 1995.