

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIER
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

N° d'Ordre :

Série :

MEMOIRE DE MAGISTER

Présenté par

MR. BAKKOCHE Assam

Option : Contrôle des systèmes

THEME

Commande robuste des systèmes non linéaires

Soutenu le : .../.../2009

Examiné par le jury :

| | | | |
|--------------|--------------------|------------|---------------------------------|
| Président : | K .BELARBI | professeur | Université Mentouri Constantine |
| Rapporteur : | B.BOUTAMINA | MC | Université Mentouri Constantine |
| Examineurs : | S. FILALI | professeur | Université Mentouri Constantine |
| | : A. BENNIA | professeur | Université Mentouri Constantine |

REMERCIEMENT

Je remercie dieu le tout puissant pour m'avoir aidé à réaliser ce travail.

Je tiens à remercier profondément mon encadreur : Mr B. BOUTAMINA pour la confiance qu'il m'a accordée, ses conseils et ses encouragements.

J'exprime ma gratitude envers Mr K.BELARBI professeur à l'université Mentouri de Constantine de m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury.

Je tiens à remercier Mrs S.FILALI et A.BENNIA professeurs à l'université Mentouri de Constantine d'avoir accepter de juger ce travail en tant qu'examineurs.

J'adresse mes vifs remerciements à tous les enseignants

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Je dédie cette thèse à mes parent : ma mère mon père à mes frères mes sœurs

A mes tantes, mes oncles, mes cousin, mes cousines et à toutes ma

Famille

A tous mais amis

Bakhouche Assam

Sommaire

Chapitre I

| | |
|---------------------------|---|
| Introduction général..... | 1 |
|---------------------------|---|

Chapitre II

Commande par mode glissant

| | |
|---|----|
| I. Introduction | 3 |
| II. Principe de base de la commande par mode glissant | 3 |
| III. Conception de la commande par mode glissant | 4 |
| III -1 Choix de la surface de glissement | 5 |
| III -2 Condition de convergence et d'existence | 6 |
| III -2-1 La fonction discrète de commutation..... | 6 |
| III -2-2 La fonction de lyapunov | 6 |
| III-3 Synthèse de la commande..... | 7 |
| III -3-1 Méthode de synthèse | 7 |
| IV. Le broutement (chattering) | 9 |
| V. Principe d'invariance..... | 10 |

Chapitre III

Commande adaptative en mode glissant

| | |
|--|----|
| I. Introduction..... | 11 |
| II. Systèmes à inférence flou | 12 |
| II-1 Approximation floue..... | 12 |
| III. Structure de base de la commande adaptative floue en mode glissant..... | 13 |
| III-1 La commande adaptative en mode glissant indirecte..... | 15 |
| III-2 La commande adaptative floue en mode glissant directe | 16 |
| III-3 Synthèse de la commande discontinue | 18 |
| III-4 Commande adaptative en mode glissant basée sur un estimateur de l'erreur de commande..... | 19 |

| | |
|---|----|
| III.4.1 Structure de base | 20 |
| a) Le réseau de neurone | 20 |
| b) Le système d'inférence floue | 21 |
| Chapitre IV | |
| Résultats de simulation | |
| I. Introduction | 22 |
| II. Les résultats de simulation | |
| II.1 exemple 1 : Le pendule inverse (la commande adaptative floue en mode glissant) | 22 |
| II.1.1 Méthode indirect..... | 23 |
| II.1.2 Méthode direct | 25 |
| II.2 conclusion | 27 |
| II.3 Commande des instabilités d'un compresseur à flux axial | |
| II.3.1 Définition..... | 28 |
| II.3.2 Le modèle du compresseur à flux axial..... | 29 |
| II.3.3 Résultats de simulation | 30 |
| II.3.3 .1 Commande adaptative flous direct..... | 30 |
| II.3.3 .2 Le contrôleur adaptatif en mode glissant basée sur l'estimation de l'erreur de commande | 34 |
| II.3.4 Conclusion | 37 |
| Chapitre V | |
| Conclusion générale | 39 |
| Annexe A | |
| Systèmes d'inférence floue | 40 |
| REFERENCES | 42 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure II.1 Différents mode dans la commande par mode glissant | 4 |
| Figure II.2 Schéma de principe de commande à régime glissant avec commande équivalent..... | 8 |
| Figure II.3 Le phinomine de broutement (chattering)..... | 9 |
| Figure III.1 Schéma La commande adaptative flou en mode glissant indirecte..... | 15 |
| Figure III.2 Schéma La commande adaptative flou en mode glissant directe..... | 16 |
| Figure III.3 Les fonctions d'appartenance utilisées..... | 17 |
| Figure III.4 Les fonctions d'appartenance utilisées..... | 19 |
| Figure III.5 Structure de commande adaptative en mode glissant basée sur un Estimateur de L'erreur de commande..... | 20 |
| Figure IV.1 Le pendule inversé..... | 22 |
| Figure IV.2 position du pendule..... | 23 |
| Figure IV.3 signal de commande | 24 |
| Figure IV.4 erreur de position | 24 |
| Figure IV.5 Réponse dans le plan de phase | 25 |
| Figure IV.6 position du pendule..... | 25 |
| Figure IV.7 signal de commande..... | 26 |
| Figure IV.8 erreur de position..... | 26 |
| Figure IV.9 Réponse dans le plan de phase..... | 26 |
| Figure IV.10 Le compresseur..... | 28 |
| Figure IV.11 erreurs des sorties..... | 31 |
| Figure IV.12 signal de commande..... | 31 |
| Figure IV.13 Réponse dans le plan de phase..... | 32 |
| Figure IV.14 erreurs des sorties..... | 32 |
| Figure IV.15 signal de commande..... | 33 |
| Figure IV.16 Réponse dans le plan de phase..... | 33 |
| Figure IV.17 erreurs des trois variables..... | 34 |
| Figure IV.18 signal de commande..... | 35 |
| Figure IV.19 Réponse dans le plan de phase..... | 35 |

| | |
|---|----|
| Figure IV.20 erreurs des sorties..... | 36 |
| Figure IV.21 signal de commande..... | 36 |
| Figure IV.22 Réponse dans le plan de phase..... | 37 |

Chapitre I

Introduction générale

Dans la littérature de la commande non linéaire, plusieurs approches ont été utilisées: technique de la linéarisation, commande adaptative, commande par logique floue, commande à structure variable etc....

Parmi les approches de la commande à structure variable, la technique de commande à régime glissant a connu un développement théorique au début des années 60 en union soviétique grâce aux travaux de Fillipov, des recherches de S.Emelyanov 1967et V.Utkin 1977.

Le réglage par mode glissant est un mode de fonctionnement particulier des systèmes de réglage à structure variable. La commande est obtenue par commutation entre deux valeurs suivant une logique de commutation afin que la trajectoire dans le plan de phase suive une surface bien déterminée.

En générale la conception de la commande peut être effectuée en trois étapes :

- établissement des conditions d'existence
- choix de la surface de glissement
- détermination de la loi de commande

Cette technique possède des avantages intéressants dont la facilité d'implémentation, la stabilité asymptotique et l'invariance vis-à-vis d'une certaine classe de variation des paramètres.

Néanmoins, l'application en pratique de cette technique présente l'inconvénient d'imposer aux entrées (organes de commande) des commutations à des fréquences élevées et des amplitudes indésirables (effet de broutement et saturation).

Dans ce mémoire une structure de commande en mode glissant adaptative est présentée avec des lois d'adaptation basées sur :

- la théorie de Lyapunov

- l'estimation de l'erreur de commande(Ecom) par un système flou dans la minimisation du critère $J = (Ecom^2)/2$

Le mémoire est organisé comme suit :

Dans le deuxième chapitre, on présente les éléments de base et les principales techniques de la commande en mode glissant (Sliding mode control) SMC.

Le chapitre trois introduit la structure de commande des systèmes non linéaires basée sur un contrôle en mode glissant adaptatif. Deux mécanismes d'adaptation sont utilisés :

- un mécanisme d'adaptation basé sur la méthode de Lyapunov.
- le deuxième est basé sur l'estimation de l'erreur de commande par un système flou.

Le chapitre 4 présente les résultats obtenus en simulation par l'application des techniques ci-dessus à deux exemples : la commande de la position d'un pendule inversé en utilisant le premier mécanisme et la commande des instabilités d'un compresseur à flux axial

Une conclusion générale termine le travail.

CHAPITRE II

COMMANDE PAR MODE GLISSANT

I- Introduction :

Les travaux de recherche effectués par PHILIPPOV et publiés en 1960 sur les équations à second membre discontinu ont donné naissance à l'idée de système de contrôle à structure variable. Par la suite, plusieurs travaux ont été effectués par l'équipe du professeur S.V. MEL'YANOV et publiés en 1962 sur cette classe particulière de système de contrôle. Cette commande consiste à amener la trajectoire d'état du système à partir d'une condition initiale quelconque $x(0) = x_0$ vers une surface de glissement (dans un temps fini) et la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation autour de la surface jusqu'au point d'équilibre, d'où le régime de glissement. La commande à structure variable est une commande non linéaire, elle est caractérisée par la discontinuité de la commande aux passages par une surface de commutation appelée surface de glissement. Dans ce chapitre, nous introduisons les éléments de base de cette théorie avec les différentes extensions qui ont été introduites.

II- Principe de base de la commande par mode glissant :

Le but d'un système de commande par mode glissant est d'amener asymptotiquement l'état du système à partir d'une condition initiale quelconque $x(0) = x_0$ vers l'origine de l'espace d'état quand $t \rightarrow \infty$. Pour cela, deux modes distincts, sont imposés : le mode convergence (reaching mode) et le mode de glissement.

La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes:

1- le mode de convergence « MC » : c'est le mode durant lequel l'état du système se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase, et tend vers la surface de commutation $S(x)$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.

2- le mode de glissement « MG » : c'est le mode durant lequel la variable d'état atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase ou voisinage de cette surface. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement. $S(x) = 0$

3- le mode du régime permanent: ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine du plan de phase), il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande.

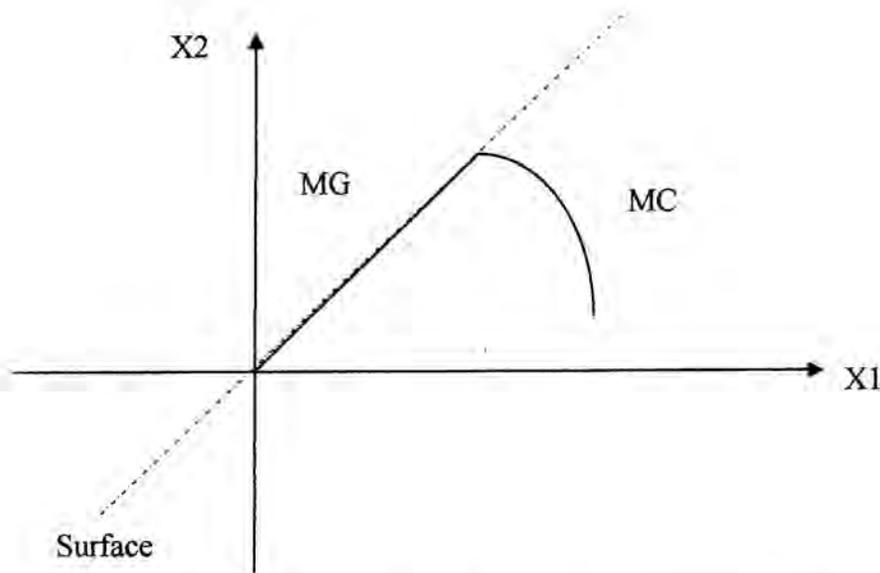


Figure II-1 Différents mode dans la commande par mode glissant

Le fonctionnement d'un système à structure variable est caractérisé par les caractéristiques suivantes :

- Puisque l'état d'équilibre du système est l'origine du plan de phase, le comportement du système en mode glissant est le comportement du système en mode transitoire.
- Pendant le mode glissant, les dynamiques du système sont uniquement déterminées par les paramètres décrivant la droite de commutation

Il est à noter que ce mode de glissement est souvent qualifié idéal du fait qu'il requiert pour exister, une fréquence de commutation infiniment grande. De fait, tout système de commande comprend des imperfections telles que retards, hystérésis, qui imposent une fréquence de commutation finie. La trajectoire d'état oscille alors dans un voisinage de la surface de glissement créant un phénomène de broutement appelé chattering.

III- Conception de la commande par mode glissant

Basé sur les principes de base de la commande par mode glissant, la structure du contrôleur comporte deux parties: une partie continue représentant la dynamique du système durant le

mode glissant et une autre discontinue représentant la dynamique du système durant le mode de convergence

La conception de la commande peut être effectuée en trois étapes principales très dépendantes l'une de l'autre

- Choix de la surface.
- L'établissement des conditions d'existence.
- Détermination de la loi de commande

III -1 Choix de la surface de glissement

La surface de glissement est une fonction scalaire telle que la variable à régler glisse sur cette surface et tend vers l'origine du plan de phase.

Soit le système suivant

$$\chi \dot{x} = f(x, t) + B(x, t)u \quad (2.1)$$

Avec : $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ le vecteur d'état du système.

$u = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T$: Le vecteur de commande d'entrée.

f : Fonction non linéaire.

B : Le gain de commande.

Dans le cas linéaire, la fonction de commutation est choisie comme une fonction linéaire des états, La surface est donnée par :

$$S_j(x) = \sum_{i=1}^n c_{ji} \cdot e_i \quad (2.2)$$

Avec :

$S(x) = [S_1(x), S_2(x), \dots, S_m(x)]^T$: Le vecteur des surfaces.

$x_{ref_i} = [x_{ref_1}, x_{ref_2}, \dots, x_{ref_n}]^T$: Le vecteur de référence (l'état désiré).

$e_i = x_i - x_{ref_i}$: L'erreur sur les états

$e = [e_1, e_2, \dots, e_n]^T$: Le vecteur d'erreurs

c_i : Paramètres de la surface de glissement.

C : est une matrice de $m \times n$ éléments de paramètres de la surface

III-2 Condition de convergence et d'existence

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y demeurer, indépendamment de la perturbation. Il existe deux considérations pour assurer le mode de convergence : une fonction discrète de commutation et une fonction de Lyapunov

III-2-1 La fonction discrète de commutation

Cette approche est la plus ancienne. Elle a été proposée et étudiée par EMILYANOV et UTKIN. Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro. Elle est donnée par:

$$\begin{cases} \dot{S}(x) > 0 & \text{si } S(x) < 0 \\ \dot{S}(x) < 0 & \text{si } S(x) > 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Cette condition peut être formulée comme suit:

$$\dot{S}(x) \cdot S(x) < 0 \quad (2.4)$$

Elle est globale mais ne garantit pas en revanche un temps d'accès fini.

Cette condition est toutefois difficile à utiliser pour faire la synthèse de la loi de commande, particulièrement dans le cas d'un système multi entrées.

III-2-2 La fonction de Lyapunov

La fonction de LYAPUNOV est une fonction scalaire positive ($V(x) > 0$) pour les variables d'état du système. La loi de commande doit faire décroître la fonction $\dot{V}(x) < 0$. L'idée est de choisir une fonction scalaire $S(x)$ pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence et de concevoir une commande u telle que le carré de la surface correspond à une fonction de LYAPUNOV.

Nous définissons la fonction de LYAPUNOV comme suit:

$$V(x) = \frac{1}{2} \cdot S^T(x) \cdot S(x) \quad (2.5)$$

La dérivée de cette fonction est:

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) \quad (2.6)$$

Pour que la fonction $V(x)$ puisse décroître, il suffit d'assurer que sa dérivée soit négative. Ceci n'est vérifiée que si la condition (2.3) est vérifiée.

L'équation (2.6) explique que le carré de la distance entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement exprime par $S^T(x) \cdot S(x)$ diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface à partir des deux côtés de cette dernière. Cette condition suppose un régime glissant idéal ou la fréquence de commutation est infinie

Si l'on souhaite garantir un temps d'accès fini, la condition devient

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) < -\eta |S| \quad (2.7)$$

III-3 Synthèse de la commande

Une fois la surface de glissement choisie, ainsi que le critère de convergence, il reste à déterminer la condition nécessaire pour ramener la variable à contrôler vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant le mode de glissement

III-3-1 Méthodes de synthèse

A- Méthode de Philipov

L'une des premières approches est la méthode de Philipov. Cette approche est basée sur les résultats des travaux effectués par ce dernier sur les équations différentielles à second membre discontinu.

Il propose une loi de commande qui prend deux valeurs suivant le signe de la surface de glissement.

$$u = \begin{cases} u^+(x,t) & \text{si } S(x) > 0 \\ u^-(x,t) & \text{si } S(x) < 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

Les valeurs exactes de $u^+(x,t)$ et $u^-(x,t)$ sont choisies afin qu'une condition d'accès soit vérifiée. C'est à dire telle que la trajectoire d'état atteigne la surface de commutation $s(x)=0$ en un temps fini.

B-Méthode de la commande équivalente :

La commande équivalente est une fonction continue qui sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement $S(x) = 0$, elle est déduite en considérant que la dérivée de la surface est nulle donc $\dot{S}(x) = 0$. [11]

Elle peut être interpréter comme étant un retour d'état particulier jouant le rôle d'un signal de commande appliqué sur le système à commander. Elle peut être aussi interprétée comme étant une valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre les valeurs u_{max} et u_{min} .

Soit le système (2.1)

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \dot{x} \tag{2.9}$$

$$\frac{\partial S}{\partial x} \dot{x} = \left[\frac{\partial S}{\partial x} \right] \cdot [f + B \cdot u_{eq}] = 0 \tag{2.10}$$

Ou u_{eq} est la commande équivalente. Il faut que $\frac{\partial S}{\partial x} \cdot B(x,t) \neq 0$ (Non singulière)

$$u_{eq} = - \left[\frac{\partial S}{\partial x} \cdot B(x,t) \right]^{-1} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} f(x,t) \tag{2.11}$$

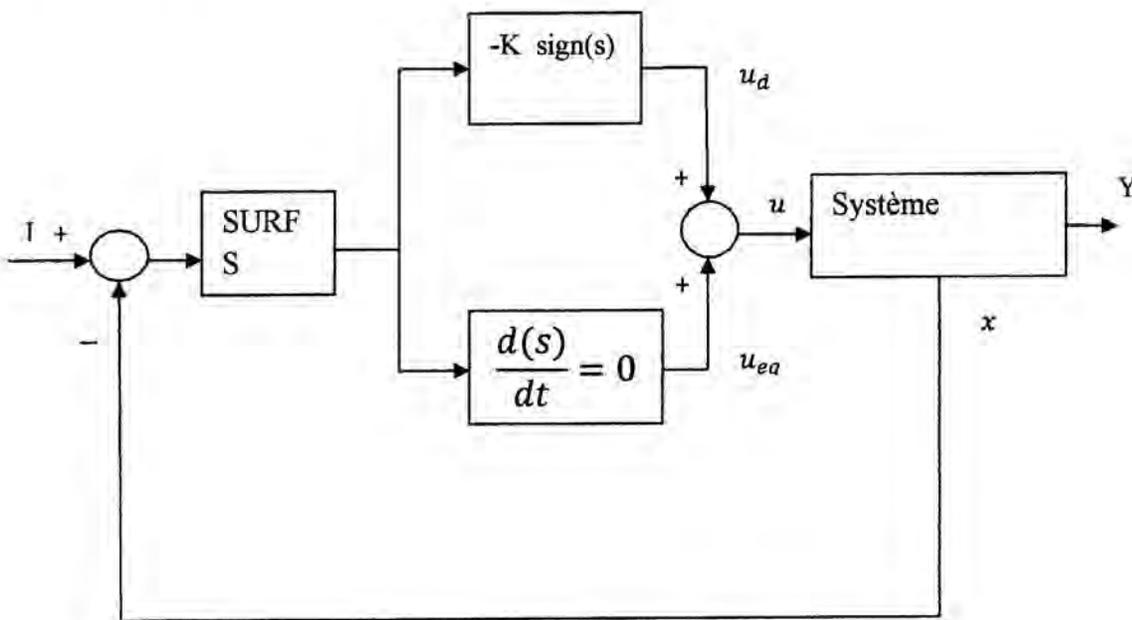


Figure II-2. Schéma de principe de commande à régime glissant avec commande équivalent

C- l'approche de la loi d'arrivée:

Dans cette approche de Gao [12] la loi d'arrivée est directement une équation différentielle spécifiant la dynamique de la fonction de commutation. Cette équation de $S(x)$ asymptotiquement stable est la même que la condition de glissement, de plus, les caractéristiques dynamiques du système dans le mode d'arrivée peut être contrôlé par un choix des paramètres de l'équation différentielle.

La forme générale de la loi d'arrivée est :

$$\dot{S} = -Q \cdot \text{sign}(S) - K \cdot S \quad (2.12)$$

$$Q : \text{diag}[q_1, q_2, \dots, q_m] \quad , q_i > 0$$

$$\text{sign}(s) = [\text{sign}(S_1), \text{sign}(S_2), \dots, \text{sign}(S_m)]^T$$

$$K : \text{diag}[k_1, k_2, \dots, k_m] \quad , k_i > 0$$

IV- LE broutement (chattering) :

Un régime glissant idéal requiert une commande pouvant commuter à une fréquence infinie. Evidemment, pour une utilisation pratique, seule une commutation à une fréquence finie est possible. Ainsi, durant le régime glissant, les discontinuités appliquées à la commande peuvent entraîner un phénomène de broutement, appelé "chattering" en anglais. Celui ci se caractérise par de fortes oscillations des trajectoires du système autour de la surface de glissement (figure II-3). Les principales raisons à l'origine de ce phénomène sont

- La présence d'un retard de temps fini pendant le calcul de la commande.
- Les limitations des actionneurs

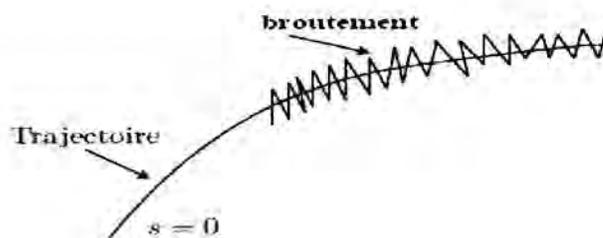


Figure II-3 Le phénomène de broutement (chattering)

De nombreuses études ont été effectuées dans le but de réduire ou d'éliminer ce phénomène. L'une d'entre elles consiste à remplacer la fonction signe par une approximation continue, de

type grand gain, dans un voisinage de la surface, telle que la fonction saturation ou une fonction sigmoïde. Le régime glissant qui en résulte n'est plus confiné dans S , mais dans un proche voisinage de celle-ci.

V. Principe d'invariance

Une propriété essentielle du fonctionnement en mode glissant est présentée: **l'insensibilité** ou **la robustesse** vis-à-vis d'une certaine classe d'erreurs de modélisation ou de perturbations. Le modèle différentiel du système en mode glissant peut ainsi être complètement indépendant d'éventuelles erreurs de modélisations ou d'éventuels perturbations. On dit alors que le système vérifie la propriété **d'invariance**.

Cette propriété nécessite toutefois que certaines hypothèses appelées **matching conditions** soient vérifiées par les perturbations.

$$\dot{x} = f(x,t) + B(x,t).u + p(t) \quad (2.13)$$

Théorème : Un régime glissant sur S , du système perturbé (2.13), est indépendant du signal de perturbation $p(t)$ si, et seulement si, celui-ci est borné et vérifie

$$p(t) = B\xi(t) \quad (2.14)$$

où $\xi(t) \in R^n$. La condition (2.14) est appelée condition de recouvrement ou "matching condition".

CHAPITRE III
COMMANDE ADAPTATIVE EN MODE
GLISSANT

Commande adaptative en mode glissant

I. Introduction

La commande en mode glissant basée sur l'approche de la commande équivalente présente certains inconvénients dont le broutement (chattering) et la difficulté du calcul de la commande équivalente. Le calcul de cette dernière nécessite la connaissance exacte de la dynamique du système. Pour résoudre ces problèmes, de nouvelles approches ont été proposées notamment celles basées sur la logique floue, les réseaux de neurones et les techniques adaptatives.

Dans les dernières années deux approches adaptatives ont été utilisées à savoir la Commande adaptative à Modèle de Référence MRAC et la Commande adaptative auto-Ajustable. L'adaptation des paramètres du contrôleur se fait en fonction des variations des paramètres du système et des incertitudes.

Les contrôleurs flous sont aptes à commander des systèmes incertains ou soumis à une variation inconnue des paramètres. En général, l'objectif de base de la commande adaptative est de maintenir la performance du système en présence de ces incertitudes. Pour pouvoir profiter de ces deux propriétés, les chercheurs ont proposé l'utilisation de contrôleurs flous adaptatifs qui sont construits d'un ou plusieurs systèmes flous équipés d'un mécanisme (algorithme) d'adaptation. Cette combinaison est une conséquence de la propriété d'approximation universelle présentée par la logique floue [8]

Les méthodes qui combinent les systèmes flous adaptatifs avec SMC [1, 2,4] et la commande adaptative neuronale avec SMC [3] ont montré beaucoup de succès dans la commande des systèmes non linéaires

II. Systèmes à inférence floue

La théorie des ensembles flous peut être utilisée dans le contrôle des systèmes. Cette tâche est réalisée par un système d'inférence flou (FIS). Un système d'inférence flou se compose de plusieurs unités (annexe A) :

- fuzzification : conversion des variables numériques en variables linguistiques
- base des règles et logique de décision
- defuzzification : produit un résultat numérique à partir des conclusions de la base des règles

II.1 Approximation floue

La base des règles d'un système flou est construite à partir d'une collection de règles floues

Si Alors dont la $j^{\text{ème}}$ règle est

$R^{(j)}$: Si x_1 est A_1 ET x_2 est A_2 ... ET x_n est A_n Alors $y = C^j$

Où A_i , A_i^j et C sont des ensembles flous

$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, y : les variables linguistiques d'entrée et de sortie respectivement du système flou

En utilisant le singleton pour la fuzzification, le produit pour l'interprétation des antécédents et le centre de gravité pour la défuzzification, le système flou peut être écrit sous la forme

$$y(x) = \frac{\sum_{j=1}^M y^j \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i) \right)}{\sum_{j=1}^M \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i) \right)} \quad (1)$$

Où $\mu_{A_i^j}(x_i)$ est le degré d'appartenance de x_i à A_i^j , M est le nombre de règles floues utilisées

n est le nombre des entrées du système flou

Si on fixe $\mu_{A_i^j}(x_i)$ et on pose y^j comme un vecteur de paramètres ajustables, la relation (1)

s'écrit sous la forme compacte suivante :

$$y(x) = \theta^T \xi(x) \quad (2)$$

Où $\Theta = [y^1, \dots, y^M]^T$ est le vecteur des paramètres ajustables et $\xi(x)$ est un vecteur regroupant les fonctions floues de base $\xi(x) = [\xi^1(x), \dots, \xi^M(x)]^T$

La forme d'un élément de ce vecteur est :

$$\xi^i(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i)}{\sum_{j=1}^M \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i) \right)} \quad (3)$$

Il a été démontré que les systèmes flous, utilisant le singleton pour la fuzzification, le produit pour d'inférence et la défuzzification par centre de gravité (2), sont capables d'approximer n'importe quelle fonction réelle continue dans un ensemble compact avec une précision arbitraire donnée. La démonstration de ce théorème est donnée dans [8].

III. Structure de base de la commande adaptative floue en mode glissant

On considère un système non linéaire incertain et perturbé d'ordre n décrit par :

$$\begin{cases} \dot{x}^n = f(x) + g(x)u + d(t) \\ y = x \end{cases} \quad (4)$$

Où, $f(x)$ et $g(x)$ sont des fonctions non linéaires, continues, incertaines et supposées bornées u, y représente respectivement l'entrée et la sortie du système et d les perturbations externes inconnues mais bornées $|d(t)| < D$

On note $x^T = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]$ le vecteur d'état

Nous considérons que les deux fonctions $f(x)$ et $g(x)$ peuvent s'écrire respectivement comme la somme d'une fonction nominale connue et d'une incertitude inconnue mais bornée

$$\begin{cases} f(x) = f_0(x) + \Delta f(x); |\Delta f(x)| < F \\ g(x) = g_0(x) + \Delta g(x); |\Delta g(x)| < G \end{cases} \quad (5)$$

Où F et G sont deux constantes positives

L'objectif de la commande est de forcer la sortie y à suivre un signal de référence borné $y_d(t)$

On considère le signal d'erreur

$$e = x(t) - x_d(t) = [e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)}]^T$$

En générale la surface de glissement $s(t)$ est choisie sous la forme

$$s(t) = c_1 e + c_2 \dot{e} + \dots + c_{n-1} e^{(n-2)} + e^{(n-1)} \\ = C^T e \quad (6)$$

$C = [c_1, c_2, \dots, c_{n-1}, 1]$ sont les coefficients du polynôme $p^{n-1} + c_{n-1} p^{n-2} + \dots + c_2 p + c_1$

Où les coefficients c_i sont choisis tels que toutes les racines du polynôme caractéristique soient dans le demi-plan gauche (p : opérateur de Laplace)

La loi de commande en mode glissant (SMC) proposée par Utkin [11] est donnée par la relation suivante

$$u = u_{eq} - k \cdot \text{sign}(S) \quad (7)$$

La commande équivalente u_{eq} est la solution de $dS/dt = 0$: elle nécessite la connaissance exacte du modèle

$k \cdot \text{sign}(S)$ est la composante discontinue. Elle garantit l'atteinte de la surface de glissement

Où la fonction sign :

$$\text{sign}(S) = \begin{cases} 1, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ -1, & S < 0 \end{cases}$$

Si les fonctions f et g sont connues alors la loi de commande équivalente a la forme suivante :

$$u_{eq} = \frac{1}{g(x)} \left(-\sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} - f(x) - d(t) + x_d^{(n)} \right) \quad (8)$$

Donc

$$u = \frac{1}{g(x)} \left(-\sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} - f(x) - d(t) + x_d^{(n)} \right) - k \cdot \text{sign}(S) \quad (9)$$

Cette loi de commande est difficile à obtenir en pratique car les fonctions f , g sont mal définies et que le système est soumis à des perturbations inconnues.

Pour résoudre ce problème, les chercheurs ont proposé une technique adaptative qui utilise la logique floue pour générer les deux parties de la commande par mode glissant (la partie continue u_{eq} et la partie discontinue). Dans [1], ils ont proposé de remplacer les deux fonctions $f(x)$, $g(x)$ par leurs estimées en utilisant des systèmes flous de la forme (2).

Il existe deux approches : directe et indirecte

III.1 La commande adaptative en mode glissant indirecte

Dans cette approche, appelée commande adaptative floue en mode glissant indirecte (IAFSMC), les systèmes d'inférence flous sont utilisés pour approximer les deux fonctions f et g par

$$\hat{f}(x/\theta_f) = \theta_f \xi_f(x) \text{ et } \hat{g}(x/\theta_g) = \theta_g \xi_g(x)$$

Dans ce cas la mise à jour des poids est donnée par [1] :

$$\dot{\theta}_f = r_f s \xi_f(x), \quad \dot{\theta}_g = r_g s \xi_g(x) u$$

Afin de déterminer la commande équivalente approximée. Le schéma de commande est représenté par la figure ci-dessous.

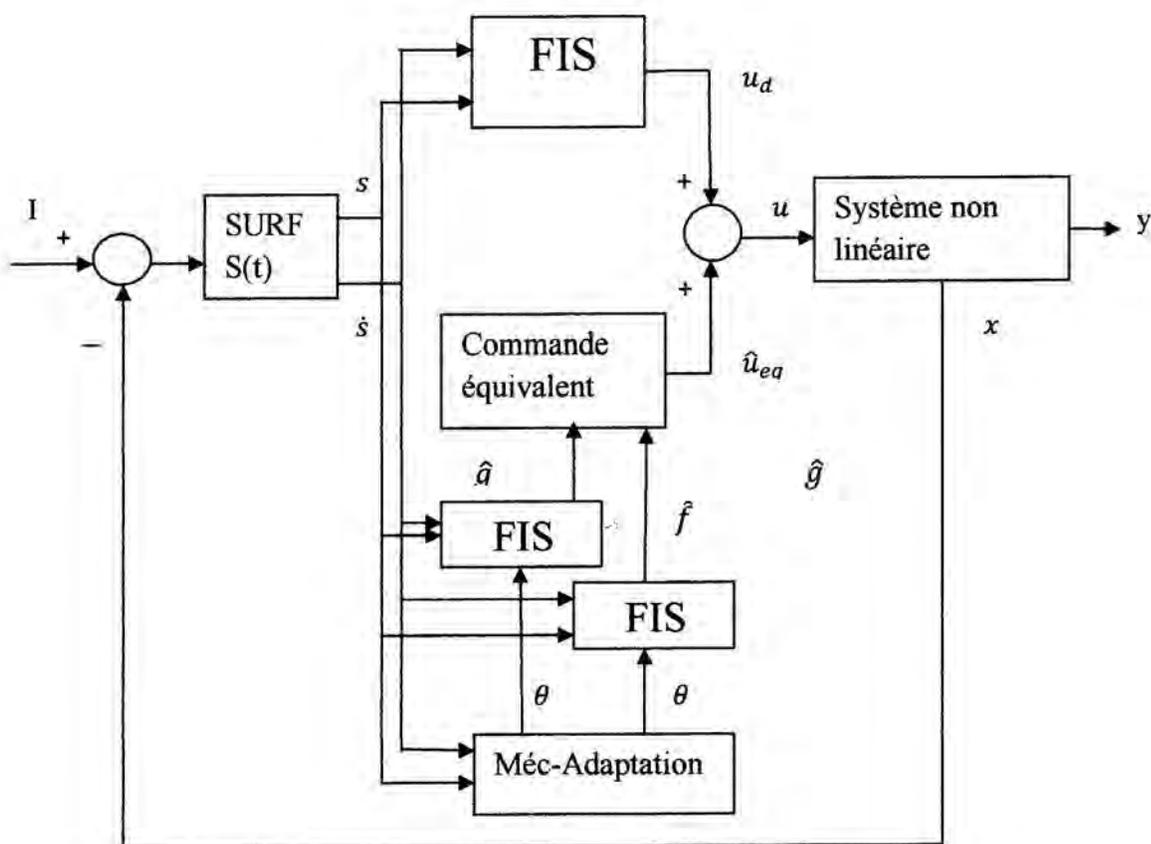


Figure III.1 Schéma La commande adaptative floue en mode glissant indirecte

III.2 La commande adaptative floue en mode glissant directe

Dans cette deuxième approche, le système d'inférence flou sert à approximer directement la loi commande équivalente u_{eq} .

Le schéma de commande est représenté par la figure ci-dessous.

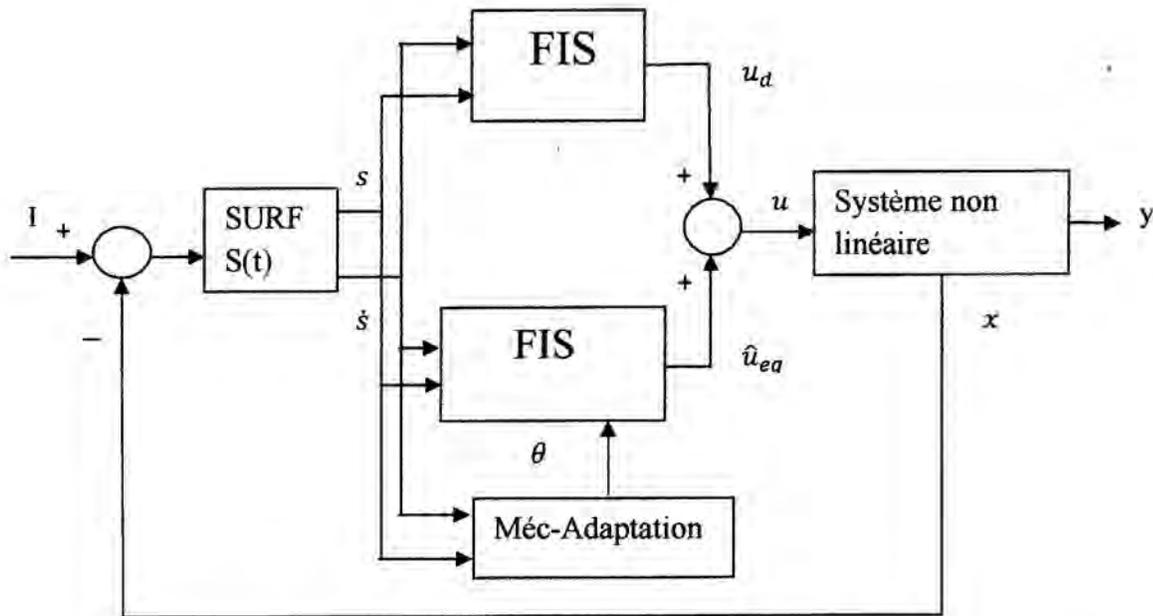


Figure III.2 Schéma La commande adaptative floue en mode glissant directe

Les entrées utilisées dans systèmes flous sont deux variables à savoir la surface de glissement S et sa dérivée \dot{S} .

La méthode de détermination du mécanisme d'adaptation est basée sur la méthode de Lyapunov qui procède en deux étapes :

- trouver une fonction $V(x)$ candidate
- déterminer les conditions (mécanisme d'adaptation) pour que cette fonction devienne une fonction de Lyapunov du système

La sortie du système flou est :

$$\hat{u}_{eq} = \theta^T \xi(s, \dot{s}) \quad (10)$$

\hat{u}_{eq} est la commande équivalente approximée, θ^T Le vecteur des paramètres ajustables,

$\xi(s, \dot{s})$ est le vecteur regroupant les fonctions floues de base

La structure de base de l'approximateur flou comprend deux entrées la surface de glissement et sa dérivée et une sortie qui représente la commande équivalente approximée. Les trois variables floues prennent trois valeurs linguistiques : Négative, Zéro, Positive. Pour définir complètement cette structure, il reste à choisir les fonctions d'appartenance associées aux valeurs linguistiques et leurs répartitions sur leurs univers de discours respectifs celles-ci sont données par la figure (III.3)

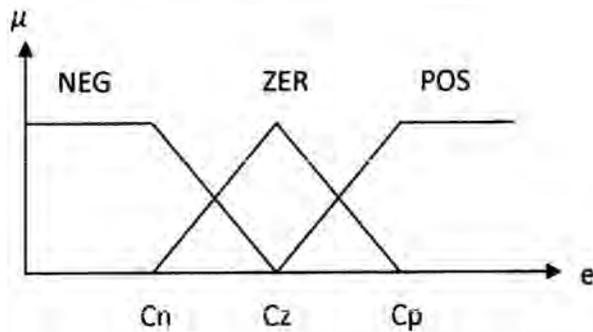


Figure III.3 Les fonctions d'appartenance utilisées

La tâche principale de la section suivante est de dériver une loi adaptative pour ajuster le vecteur des paramètres θ^T tel que l'estimée de la commande équivalente peut être rapprochée avec un minimum d'erreur de la vraie commande équivalente du SMC

Supposons que $\theta^* = [\theta_1^*, \theta_2^*, \dots, \theta_N^*]$ le vecteur optimal tel que l'erreur de l'approximation est minimale

$$w(s, \dot{s}) = u_{eq}^*(s, \dot{s}) - u_{eq} \tag{11}$$

$$u_{eq}^*(s, \dot{s}) - u_{eq}(s, \dot{s}) = \zeta(s, \dot{s})(\theta^* - \theta) \tag{12}$$

Soit la fonction candidate de Lyapunov

$$V = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2r} \tilde{\theta}^T \tilde{\theta} \tag{13}$$

Avec $\tilde{\theta} = \theta - \theta^*$ et r une constante positive

La dérivée de l'équation précédente donne :

$$\dot{V} = s\dot{s} + \frac{1}{r} \dot{\tilde{\theta}}^T \tilde{\theta} \tag{14}$$

$$\dot{V} = s\{\sum_{i=1}^{n-1} c_i e^i - x_d^n + f(x) + g(x)[\hat{u}_{eq} + u_d] + d\} + \frac{1}{r} \dot{\tilde{\theta}}^T \tilde{\theta}$$

Considérant

$$\dot{V} = s [g(x)(\hat{u}_{eq} - u_{eq} + u_d)] + \frac{1}{r} \dot{\tilde{\theta}}^T \tilde{\theta}$$

$$\dot{V} = s \{g(x)[\xi(s, \dot{s}) \theta - \xi(s, \dot{s}) \theta^* + \xi(s, \dot{s}) \theta^* - u_{eq} + u_d]\} + \frac{1}{r} \dot{\tilde{\theta}}^T \tilde{\theta}$$

$$\dot{V} = s \{g(x)[w(s, \dot{s}) + u_d]\} - s g(x) \xi(s, \dot{s}) \tilde{\theta} + \frac{1}{r} \dot{\tilde{\theta}}^T \tilde{\theta}$$

En choisir la loi d'adaptation

$$\dot{\tilde{\theta}} = r s g(x) \xi(s, \dot{s}) \quad (15)$$

$$\dot{V} = g(x) s w(s, \dot{s}) + g(x) s u_d = g(x) s w(s, \dot{s}) - g(x) K |s| \leq 0$$

III.3 Synthèse de la commande discontinue

Pour compléter le contrôle en mode glissant il faut définir la deuxième partie (la partie discontinue) $u_d = -k \cdot \text{sign}(s)$ qui devrait être prise en considération pour assurer l'approche vers la surface de glissement et garantir la stabilité.

On définit la fonction de Lyapunov suivante :

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (16)$$

La relation suivante garantit l'attractivité et la stabilité du système. $\dot{V} = s \dot{s} < 0$

On choisit K qui satisfait cette condition.

Il est connu que cette partie est la cause principale du phénomène de chattering

Pour l'éliminer beaucoup de chercheurs ont proposé de remplacer cette partie par un contrôleur PID, prédictif ou un système flou

La méthode proposée dans [7] consiste à appliquer la commande équivalente lorsque les états sont proches de la surface de glissement et à appliquer la commande discontinue lorsque les états sont loin de la surface de glissement. Le système flou a deux règles avec comme entrée la surface de glissement :

Règle 1 : Si s est ZO donc $u = \hat{u}_{eq}$

Règle 2 : Si s est NZ donc $u = \hat{u}_{eq} + u_d$

L'ensemble flous ZO et NZ dénotent le zéro et non zéro donc la loi de commande est donné par

$$u = \frac{\mu_{ZO}(s)\hat{u}_{eq} + \mu_{NZ}(s)(\hat{u}_{eq} + u_d)}{\mu_{ZO}(s) + \mu_{NZ}(s)} = \hat{u}_{eq} + \mu_{NZ}(s)u_d \tag{18}$$

Avec $\mu_{ZO}(s) + \mu_{NZ}(s) = 1$

La fonction d'appartenance utilisée est la suivant :

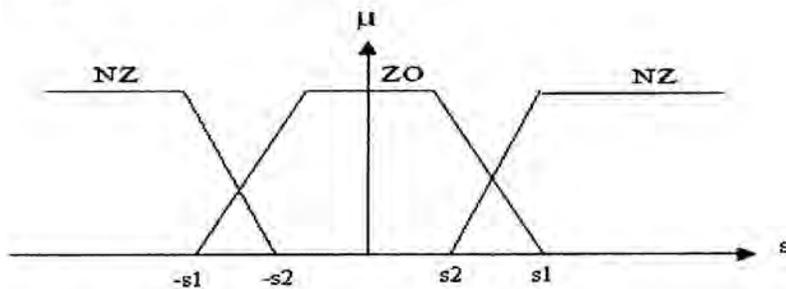


Figure III.4 Les fonctions d'appartenance utilisées

La commande à appliquer au système est donnée par le tableau

| S | u |
|-----------------|---------------------------------|
| $s1 < s$ | $\hat{u}_{eq} + u_d$ |
| $s2 < s < s1$ | $\hat{u}_{eq} + \mu_{NZ}(s)u_d$ |
| $-s2 < s < s2$ | \hat{u}_{eq} |
| $-s1 < s < -s2$ | $\hat{u}_{eq} + \mu_{NZ}(s)u_d$ |
| $s < -s1$ | $\hat{u}_{eq} + u_d$ |

Tableau III.1

III.4 Commande adaptative en mode glissant basée sur un estimateur de l'erreur de commande

Dans cette partie, nous introduisons la structure d'une commande en mode glissant ou la partie continue de cette commande est approximée par un réseau de neurone utilisant un signal d'adaptation basée sur l'estimation de l'erreur de commande. L'estimation sera délivrée par un système d'inférence flou [10]

III.4.1 Structure de base

a. Le réseau de neurone :

La sortie du réseau de neurone est donnée par

$$u(I) = W^T \cdot F(V^T \cdot I) \quad (19)$$

Où $V = [v_1, v_2, \dots, v_l] \in R^{n \times l}$ et $W = [w_1, w_2, \dots, w_l]^T \in R^l$

Sont les poids du réseau se neurones

$I = [s, \dot{s}]$ est le vecteur d'entrée

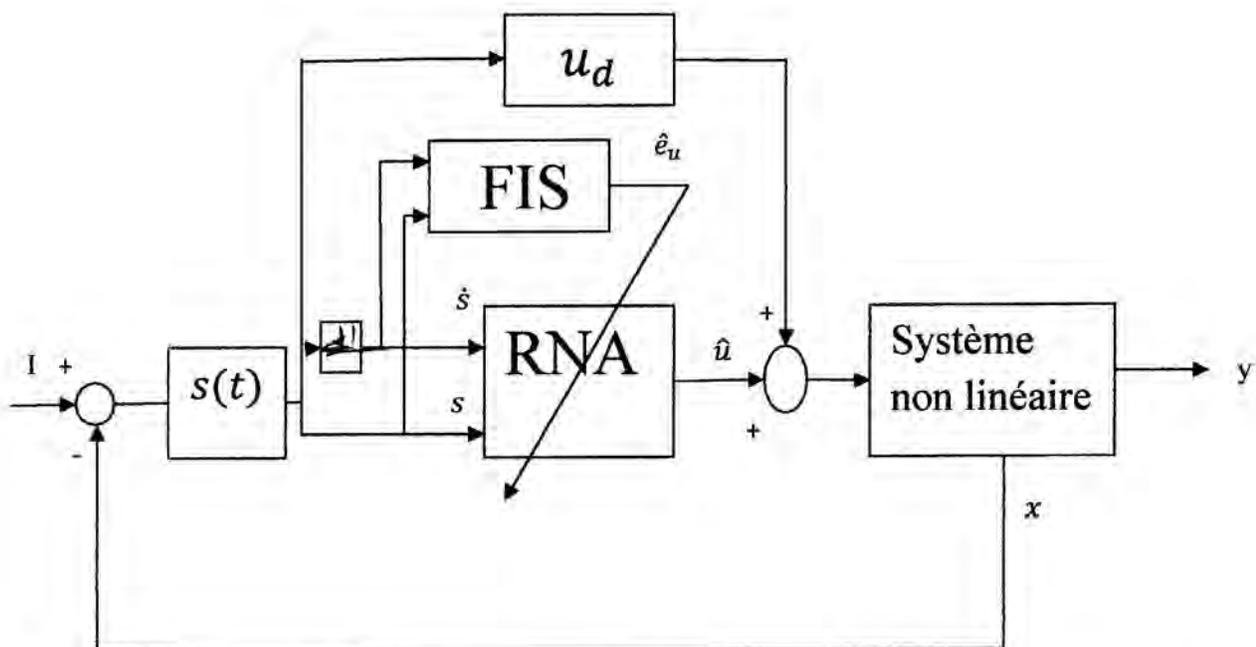


Figure III.5 Structure de commande adaptative en mode glissant basée sur un estimateur de l'erreur de commande

Pour trouver les poids optimaux, l'objectif sera minimiser la fonction suivant :

$$J = \frac{1}{2} (e_u^*)^2 \quad (20)$$

Avec e_u^* est l'erreur de commande défini par :

$$e_u^* = \hat{u}(I) - u^*(I) \quad (21)$$

Les lois de la mise à jour des poids sont obtenues par la dérivation de (20) par rapport à ces poids en utilisant l'algorithme du gradient avec un pas prédéterminé

$$W(t+1) = W(t) - \alpha_w e_u^* \frac{\partial e_u^*}{\partial W}; \quad V(t+1) = V(t) - \alpha_v e_u^* W \frac{\partial e_u^*}{\partial V} \quad (22)$$

b. Le système à inférence flou

L'erreur de commande e_u^* n'est pas connue, le système d'inférence flou (FIS) est utilisé pour fournir l'estimé \hat{e}_u

La structure de base de l'estimateur flou est définie par la base des règles BR1 (annexe A) Il comprend deux entrées floues, la surface de glissement et sa dérivée et une sortie flou \hat{e}_u les trois variable floues prennent trois valeurs linguistiques : Négative, Zéro, Positive. Pour définir complètement cette structure, il reste à choisir les fonctions d'appartenances associées aux valeurs linguistiques et leurs répartitions sur leurs univers de discours respectifs. Celles-ci sont données par la figure (III.3)

Utilisant le produit d'inférence et la défuzzification par centre de gravité la valeur numérique de l'estimée de e_u sera donnée par

$$\hat{e}_u = \frac{C_N \times \mu_N(\hat{e}_u) + C_Z \times \mu_Z(\hat{e}_u) + C_P \times \mu_P(\hat{e}_u)}{\mu_N(\hat{e}_u) + \mu_Z(\hat{e}_u) + \mu_P(\hat{e}_u)} \quad (23)$$

C_N, C_Z et C_P Sont les paramètres des ensembles flous de la sortie \hat{e}_u

$\mu_N(\hat{e}_u), \mu_Z(\hat{e}_u)$ et $\mu_P(\hat{e}_u)$ Sont les degrés d'appartenance de \hat{e}_u aux ensembles flous NEG, ZER et POS qui sont calculées à partir des degrés d'appartenance de s et sa variation \dot{s}

La commande à appliquer au système est représentée par le tableau III.1

CHAPITRE IV
RESULTATS DE SIMULATION

Chapitre IV

Résultats de simulation

IV. 1. Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons deux études en simulation du contrôleur flou adaptatif en mode glissant. Le premier exemple représente la commande en mode poursuite du système pendule inversé et le deuxième représente un problème de commande des instabilités d'un compresseur à flux axial

Pour le premier exemple les deux approches directe et indirecte ont été appliquées. Dans le deuxième exemple, on a utilisé l'approche directe et un contrôleur adaptatif en mode glissant basé sur l'estimateur de l'erreur de commande.

IV .2.les résultats de simulation**IV .2.1 le pendule inversé**

Le système est représenté par la figure IV.1. Les paramètres du système sont :

$l = 0.5\text{m}$: la longueur du pendule. l

$M = 1\text{kg}$: la masse du chariot.

$m = 0.1\text{kg}$: la masse du pendule.

$g = 10 \text{ m/s}^2$: l'accélération de la pesanteur

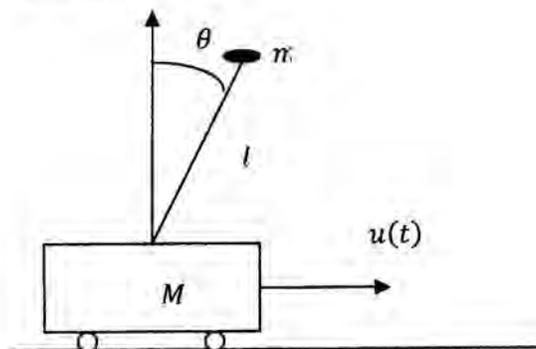


Figure IV.1 Le pendule inversé

Le modèle mathématique du pendule est un modèle non linéaire. Sa représentation d'état est :

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{(0.5 \sin x_1 (1 + 0.5 \cos x_1) x_2^2 - 10 \sin x_1 (1 + \cos x_1)) + u(t)}{0.25(2 + \cos x_1)^2}$$

x_1 et x_2 sont respectivement l'angle du pendule par rapport à la verticale et sa vitesse angulaire, $u(t)$ l'effort de commande

Il y a deux groupes de paramètres à régler : ceux associés au mode glissant et ceux des systèmes flous. Pour le mode glissant, les paramètres de la surface de glissement sont représentés par le vecteur $C = [10,1]$. les entrées des systèmes flous sont prédéterminées (la surface et sa dérivée) et les paramètres utilisés sont :

$$\widehat{cns} = -0.1; \widehat{cz} = 0; \widehat{cps} = 0.1; \widehat{cnds} = -1; \widehat{czds} = 0; \widehat{cpds} = 1;$$

Dans cette partie de la simulation, le système doit suivre les consignes suivantes :

$$y_d = (\pi/30) \sin(t) \text{ pour } 0 \leq t \leq 10s, \quad y_d = (\pi/60) \sin(t) \text{ pour } 10s \leq t \leq 18s$$

$$y_d = 0 \text{ pour } t \geq 18s$$

IV.2.1.1 TEST 1 : méthode indirect

Les paramètres utilisés en simulation sont les suivants :

Les poids initiaux (P) sont pris aléatoirement dans l'intervalle [0,1]

Le gain $k=20$. Le paramètre d'adaptation : $rf = rg = 2$

Les valeurs numériques du FIS utilisé pour éliminer le broutement (chattering) : $s1=0.5$, $s2=0$.

Les résultats de ce test sont représentés par les figures IV.2 à IV.5

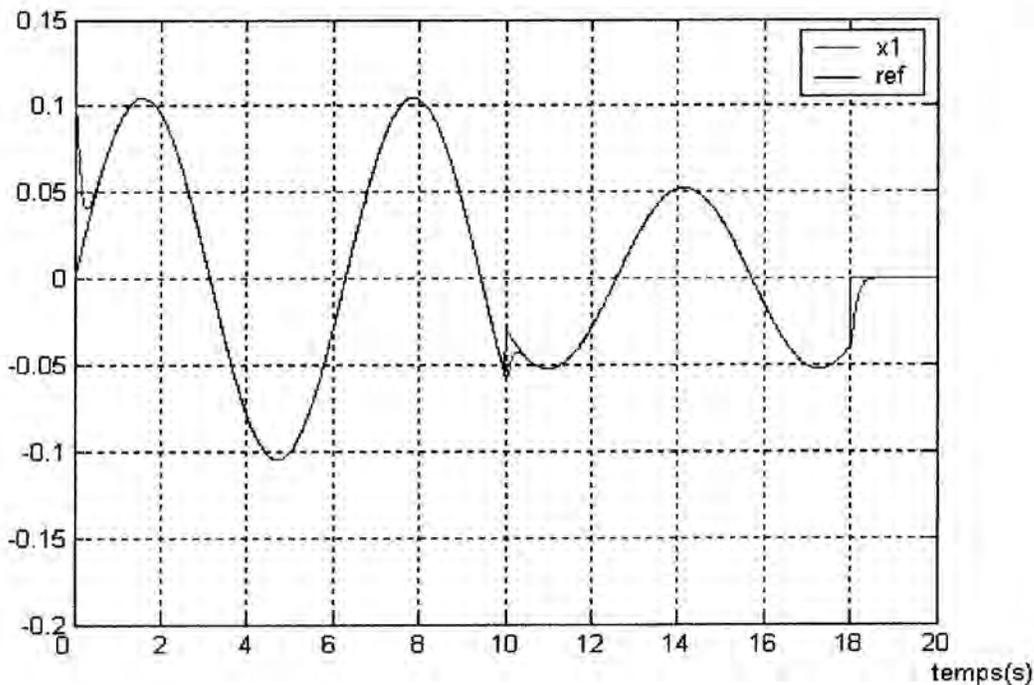


Figure IV.2 position du pendule

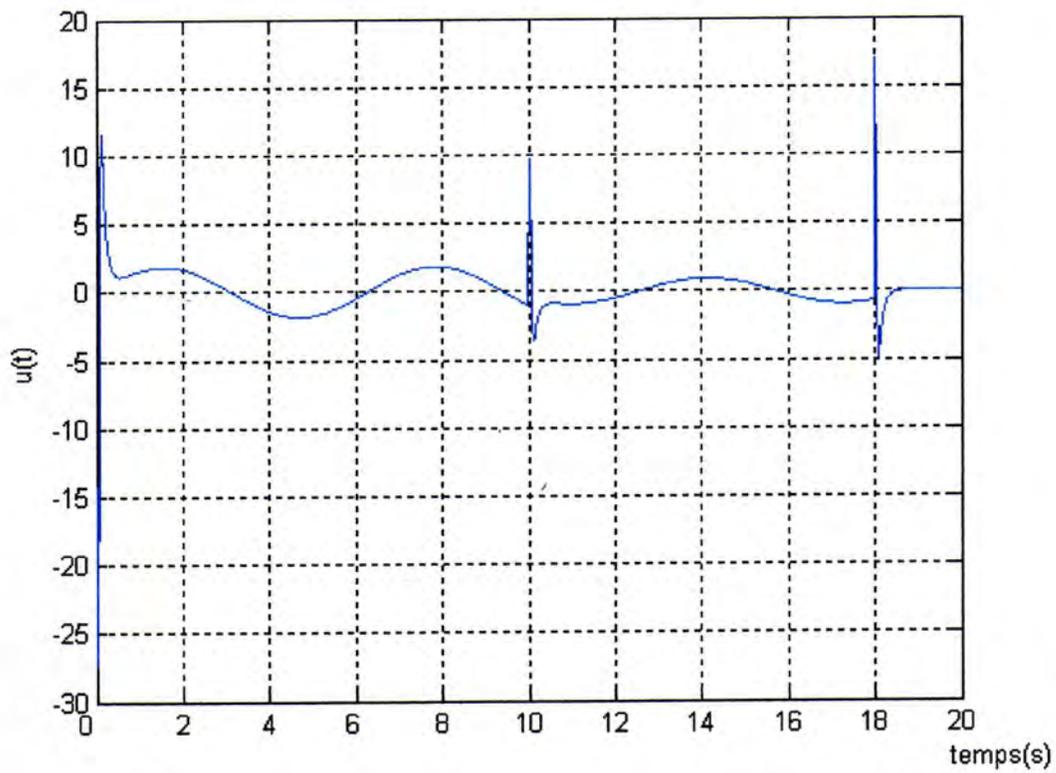


Figure IV.3 signal de commande

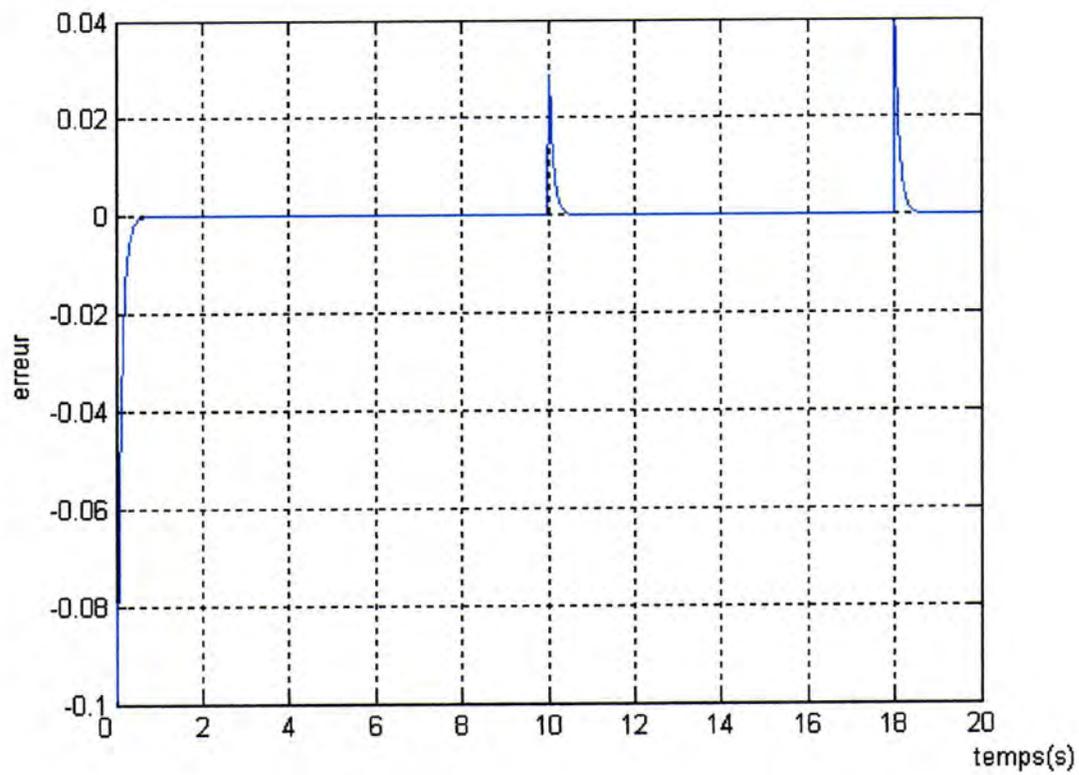


Figure IV.4 erreur de position

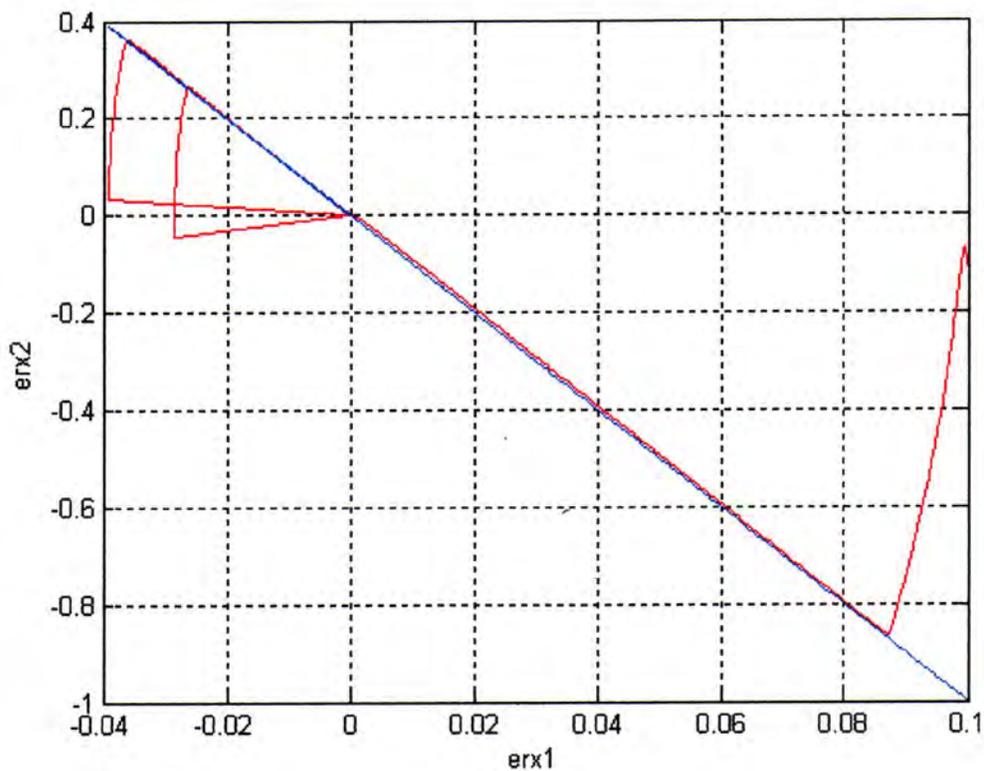


Figure IV.5 Réponse dans le plan de phase

IV .2.1 .2 TEST 2 méthode direct

Dans ce cas : Le gain $k=40$, Le paramètre d'adaptation : $r=5$.

Les valeurs numériques du FIS utilisé pour éliminer le broutement (chattering) : $s1=1$, $s2=0$.

Les résultats de ce test sont représentés par les figures IV.6 à IV.9

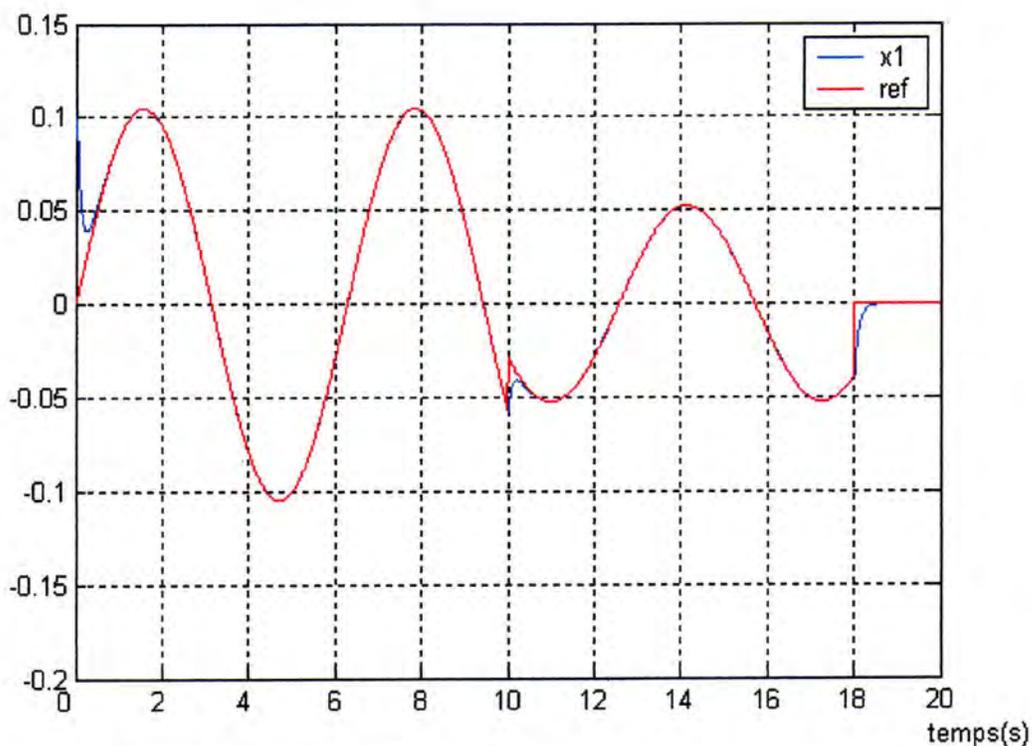


Figure IV.6 position du pendule

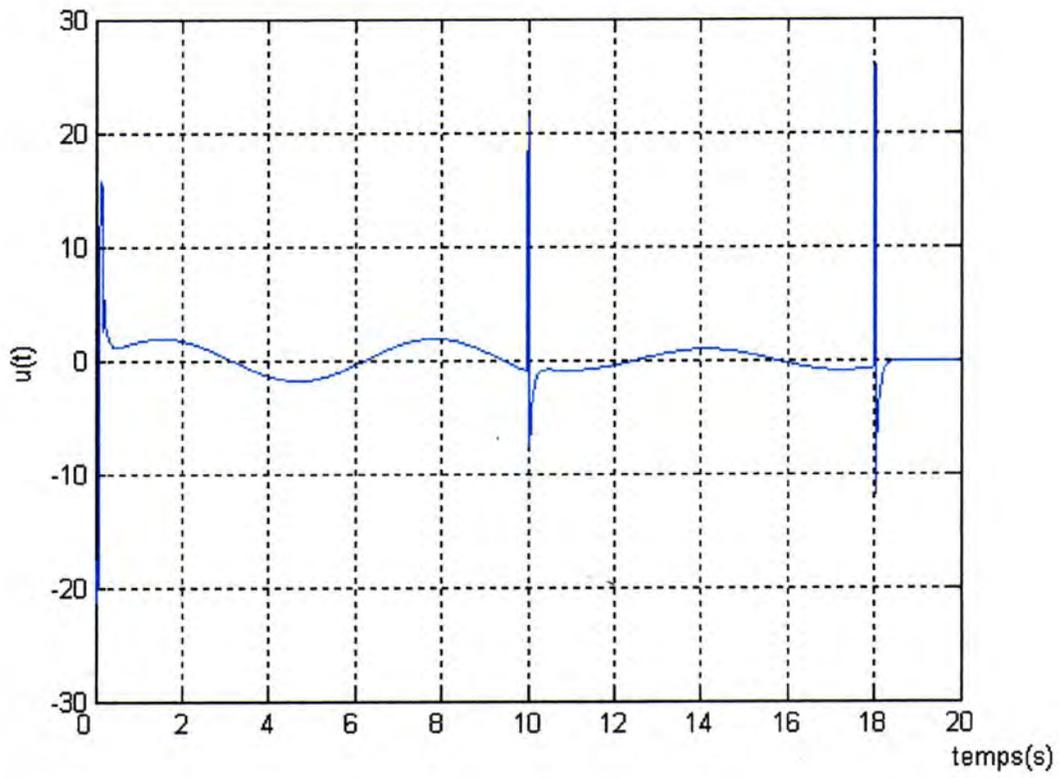


Figure IV.7 signal de commande

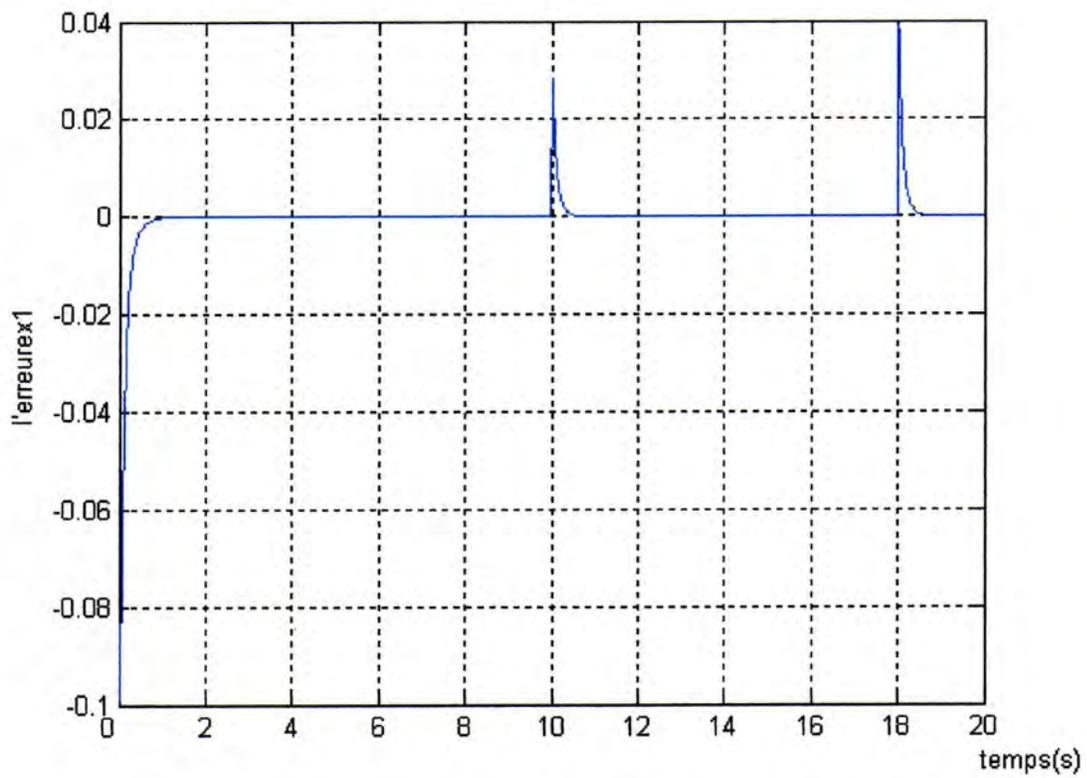


Figure IV.8 erreur de position

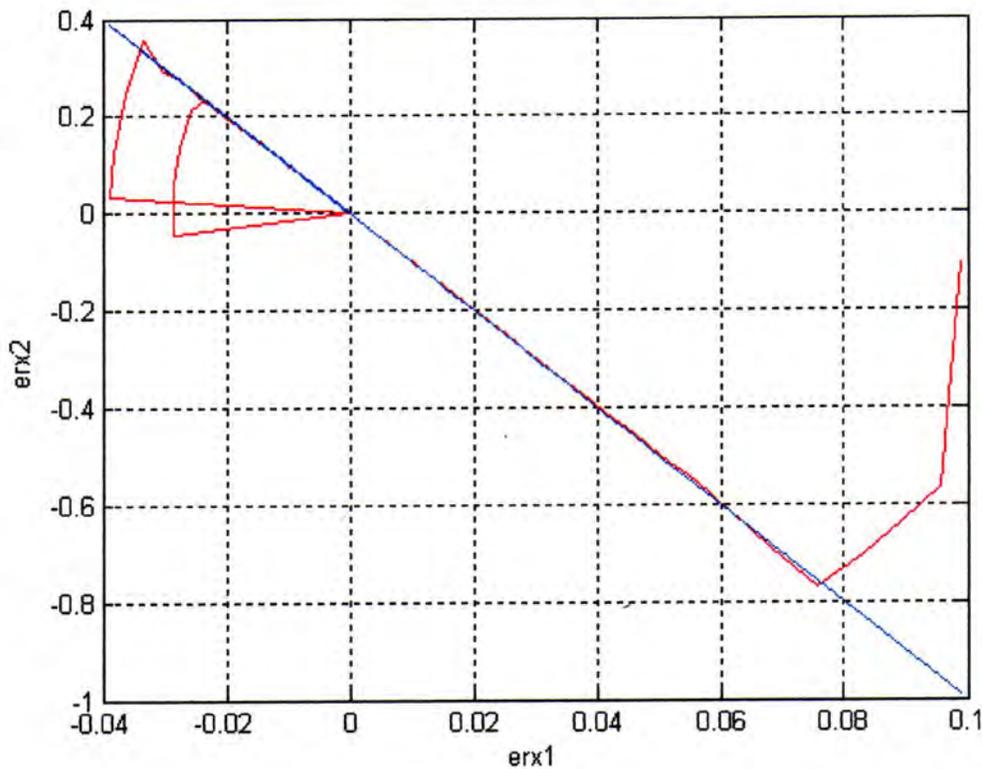


Figure IV.9 Réponse dans le plan de phase

IV .2.2 conclusion

Les résultats de simulation pour le pendule inverse montrent que :

- La sortie du système suit la référence désirée sur les trois intervalles impartis avec une erreur de poursuite acceptable dans les deux tests.
- Les signaux de commande pour les deux cas sont bornés et présentent des pics assez importants aux instants de changement de référence surtout pour le deuxième cas.
- Les réponses dans le plan de phase sont satisfaisantes et que le phénomène du broutement (chattering) est fortement atténué.

IV.3 2 Commande des instabilités d'un compresseur à flux axial

IV. 3 .1 Définition

Les machines réceptrices (compresseurs) réalisent une transformation d'énergie cinétique en énergie de pression. Il existe deux types de compresseurs : les compresseurs à flux axial et les compresseurs centrifuges.

Dans le cas des compresseurs axiaux, l'une des limites d'utilisation de la machine est déterminée par la ligne de pompage, limite au-delà de laquelle un fonctionnement stable de la machine n'est plus assuré. Cette perte de stabilité se traduit par l'apparition d'instabilités, appelés pompage et décollement tournant. Le schéma est représenté par la figure suivante :

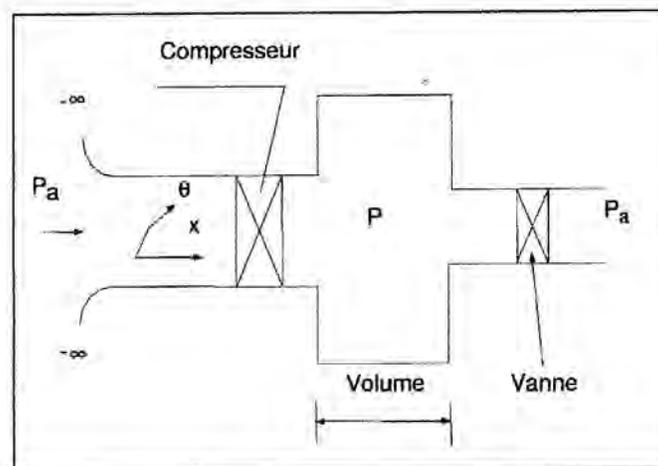


Figure IV.10 Le compresseur

Le pompage :

Ce phénomène apparaît lorsque le débit dans la machine descend au dessous d'une certaine limite pour une vitesse de rotation donnée. Il se produit alors des variations périodiques importantes de la pression et du débit à une fréquence plus ou moins grande.

Cette variation provoque une vibration qui peut détruire l'équipement

Décollement Tournant :

Le décollement tournant (ou décrochage tournant) est une instabilité caractérisée par la présence d'une ou plusieurs poches de fluide qui tournent à une vitesse généralement inférieure à celle du rotor. Les cellules induisent un blocage partiel de la machine et des pertes importantes provoquant une chute du débit et du taux de pression. Cette instabilité est aussi responsable de problèmes vibratoires importants.

IV. 3.2 Le modèle du compresseur à flux axial

Le modèle utilisé est le modèle tridimensionnel de Moore et Greitzer, [5] décrit par les équations différentielles ordinaires

$$\dot{\Psi} = \frac{1}{\beta^2}(\Phi - \Phi_T(\Psi)) \quad (1)$$

$$\dot{\Phi} = -\Psi + \Psi_c(\Phi) - 3\Phi R \quad (2)$$

$$\dot{R} = \sigma R(1 - \Phi^2 - R) \quad \sigma > 0 \quad (3)$$

$$\Psi_c(\Phi) = \Psi_{c0} + 1 + 1.5\Phi - 0.5\Phi^3 \quad (4)$$

$$\Phi_T = \gamma\sqrt{\Psi} - 1, \gamma > 0 \quad (5)$$

L'ensemble E des commandes assurant l'équilibre est donné par la relation :

$$f(R, \Phi, \Psi) + g(R, \Phi, \Psi)(u_e + \mu) = 0 \quad (6)$$

Pour $R_e = 0$

$$\Psi_e = \Psi_c(\Phi_e) \quad (7)$$

$$(u_e + \mu) = (\Phi_e + 1)/\sqrt{\Psi_e}, \Phi_e \in R \quad (8)$$

Pour $R_e = 1 - \Phi_e^2$

$$\Psi_e(\Phi_e) = \Psi_{c0} + 1 + 1.5\Phi_e + 2.5\Phi_e^3 \quad (9)$$

$$(u_e + \mu) = (\Phi_e + 1)/\sqrt{\Psi_e}, -1 < \Phi_e < 1 \quad (10)$$

Un point d'équilibre axisymétrique est un point avec $R_e = 0$ et un point d'équilibre non axisymétrique est un point où $R_e > 0$.

Le maximum de montée en pression est obtenu au point critique $\Phi_0 = 1$, $\Psi_0 = \Psi_{c0} + 1$ et $R_0 = 0$

$\Psi_c(\Phi)$ Et Φ_T représentent les caractéristiques du compresseur et du clapet de sortie. γ est un paramètre du clapet. Toutes les variables sont sans dimension avec Φ le coefficient de débit, Ψ la montée en pression et R le carré de l'amplitude du décrochage tournant (fondamental). Le paramètre Ψ_{c0} représente la nature du compresseur et β un paramètre fonction du réservoir et de la vitesse de rotation. Il est admis que le paramètre γ peut être décomposé en $\gamma = (u + \mu)$, où u est proportionnel à la section de la vanne (utilisé comme commande du clapet) et μ un paramètre représentant les perturbations d'entrée de la chambre de combustion

IV.3.3 Résultats de simulation

- Le contrôleur est conçu pour le point d'équilibre non axisymétrique, $\Phi_e = 0.5$ et les conditions initiales, $\Phi_0 = 0.7$, $R_0 = 0.45$, $\Psi_0 = 0.4$

Les paramètres du modèle de Moore et Greitzer, utilisés en simulation sont :

$$W = 0.1341, \Psi_{c0} = 0.1469, \sigma = \frac{3aI_c}{1+a\lambda} = 5.7756, \beta = \frac{3BH}{W} = 0.1837; \mu = 0.9029$$

- Pour la simulation du pompage et du décrochage tournant au point d'équilibre critique défini par : $\Phi_e = 1$, $Re = 0$, $\Psi_e = \Psi_{c0} + 2$.

les paramètres sont choisis égaux à $\Psi_{c0} = 2.5$ et $\beta = 0.6698$. A $t = 0$, le système évolue sous la commande u_c à partir des conditions initiales $\Phi_0 = 0.8$, $R_0 = 0.75$, $\Psi_0 = 2.9$. Le pompage et le décrochage tournant apparaissent pour $\mu = 0.8525$

A $t = 40s$, on applique la loi de commande issue du contrôleur.

IV.3.3.1 TEST1 : Commande adaptative flous direct

Les poids initiaux (P) sont pris aléatoirement dans l'intervalle $[0,1]$

Le gain $k=2$, les paramètres de la surface $c = [0 \quad -3.5 \quad 0.5]$

les entrées des systèmes flous sont prédéterminées (la surface et sa dérivée) et les paramètres utilisés sont : $cns=-0.1; cz=0; cps=0.1; cnds=-1; czds=0; cpds=1;$

Les valeurs numérique de FIS utiliser pour éliminer le broutement (chattering) : $s1=0.5, s2=0$

Le paramètre d'adaptation : $r=0.05$

a. Cas $\Phi_e = 0.5$

Les résultats de ce test sont représentés par les figures IV.2 à IV.5

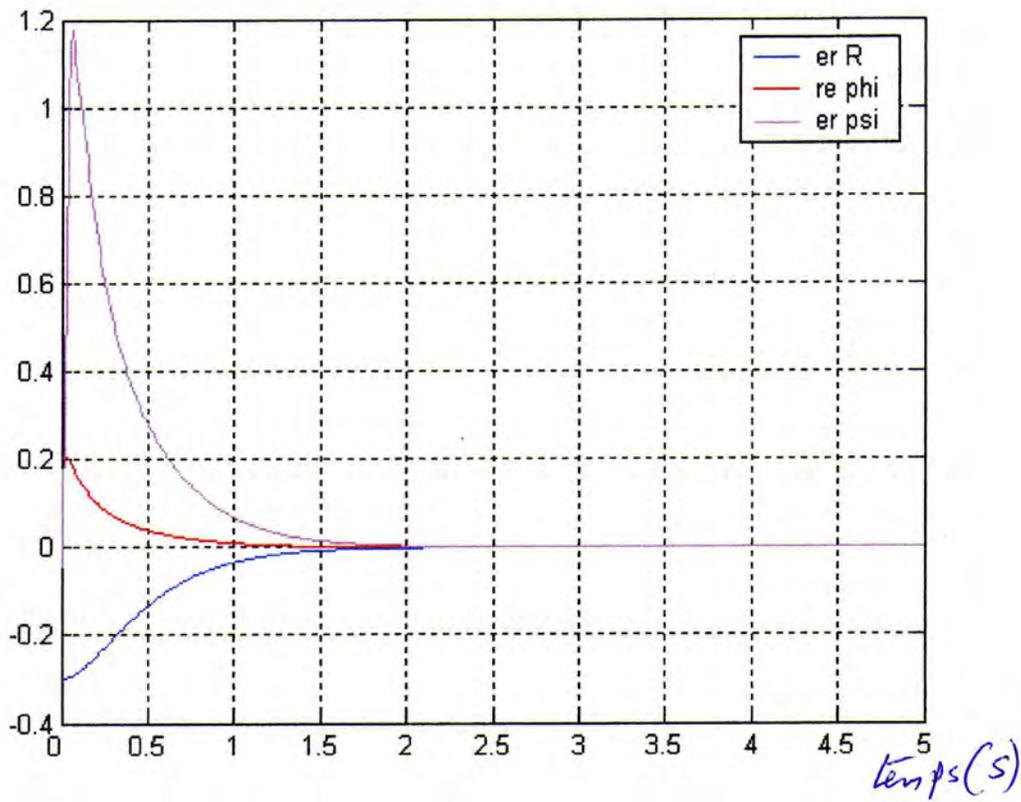


Figure IV.11 erreurs des sorties

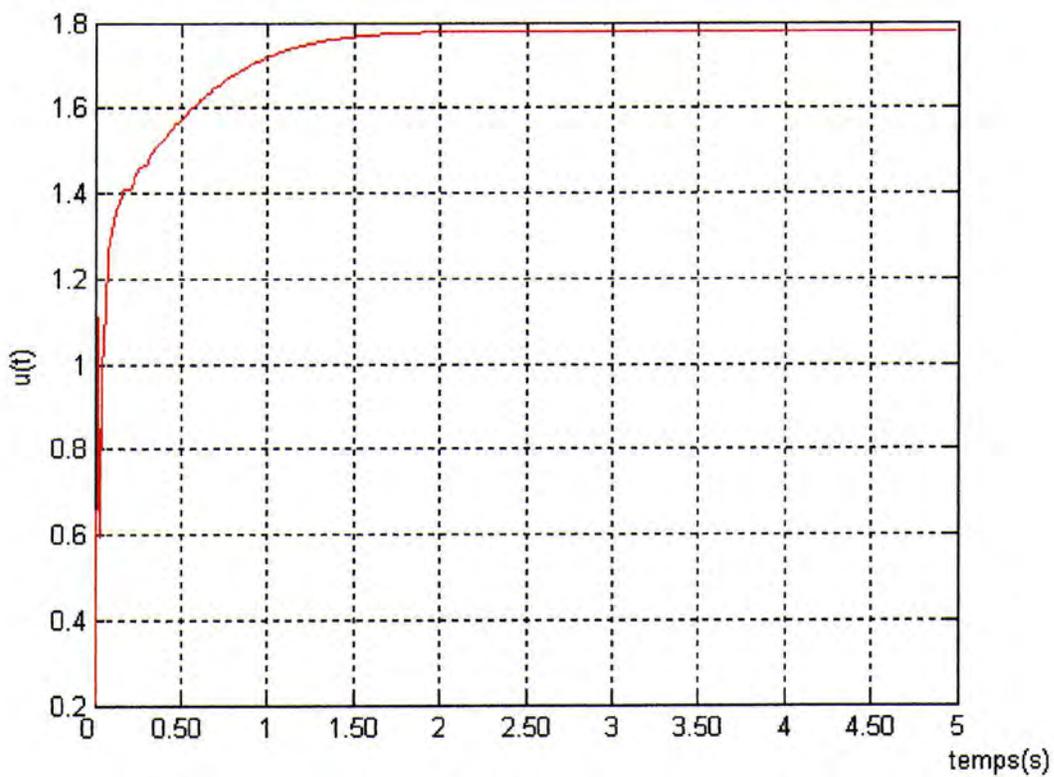


Figure IV.12 signal de commande

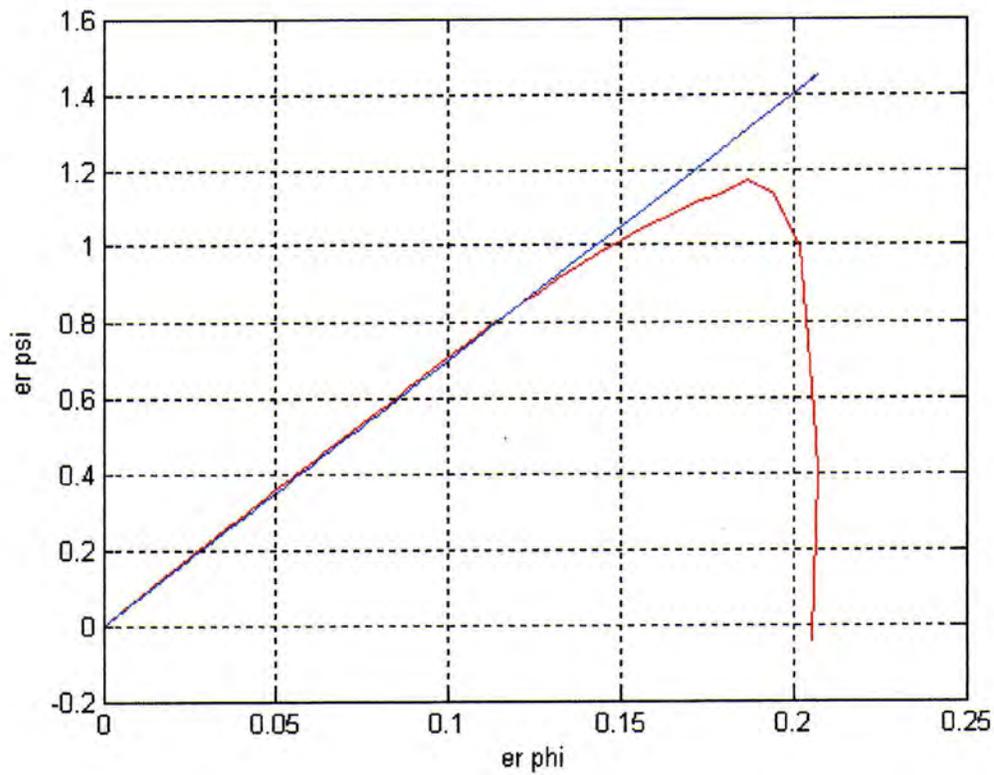


Figure IV.13 Réponse dans le plan de phase

b. Cas $\Phi_e = 1$ Pompage et le décrochage tournant :

Les résultats de ce test sont représentés par les figures IV.2 à IV.5

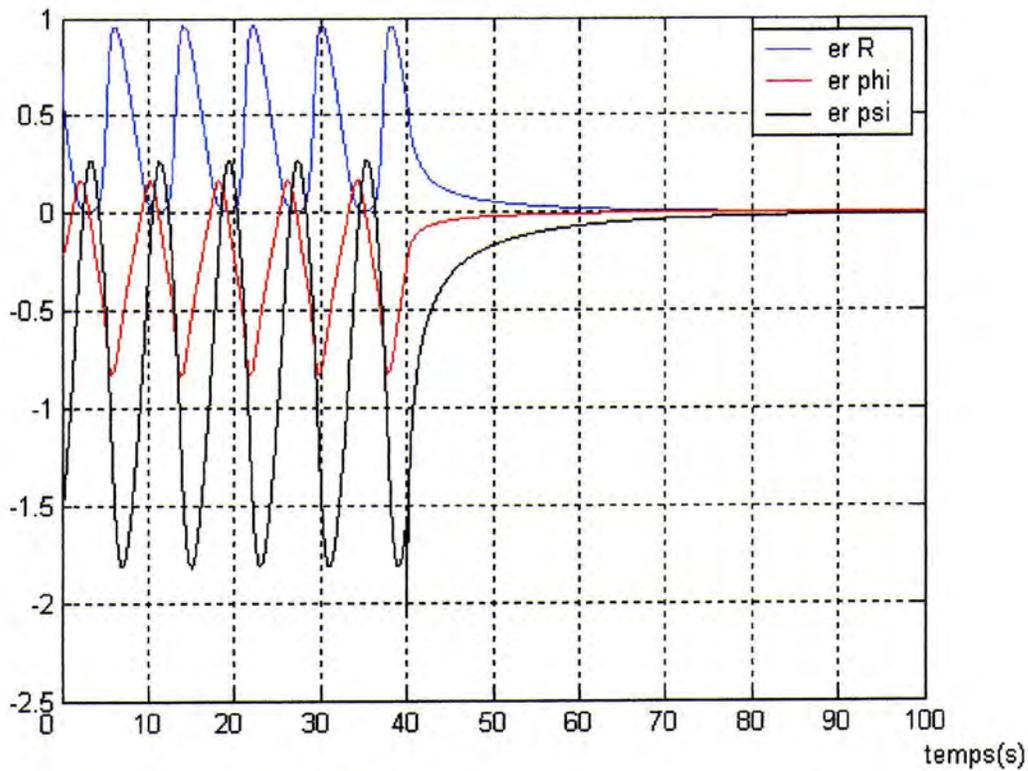


Figure IV.14 erreurs des sorties

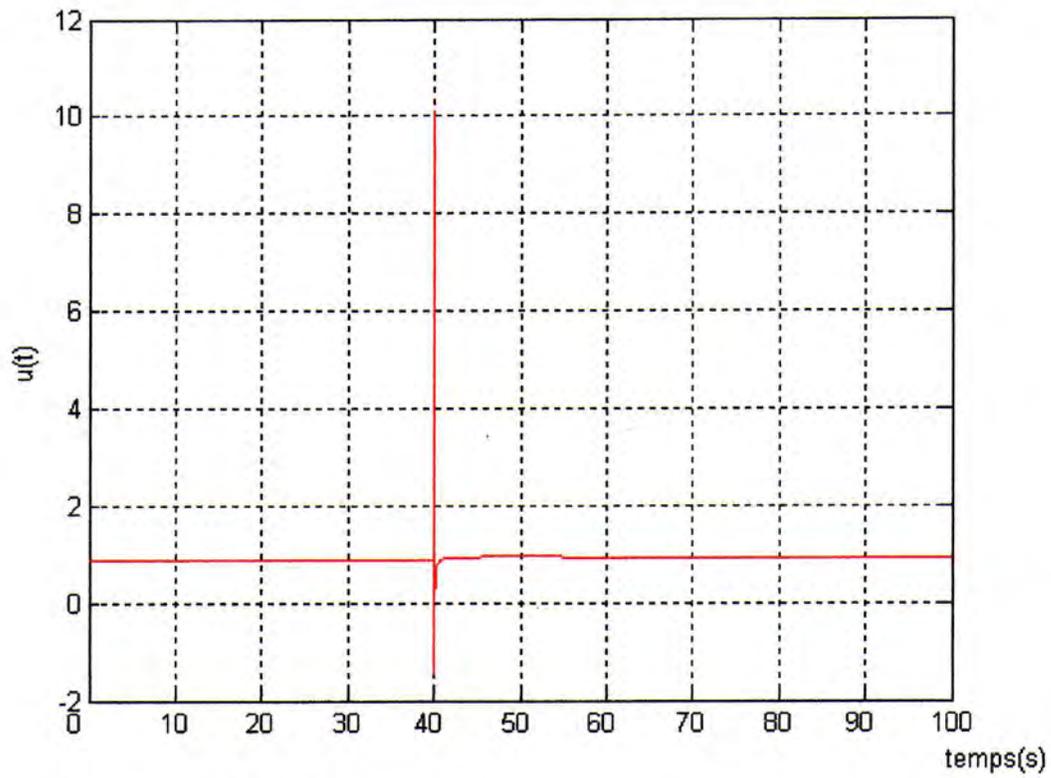


Figure IV.15 signal de commande

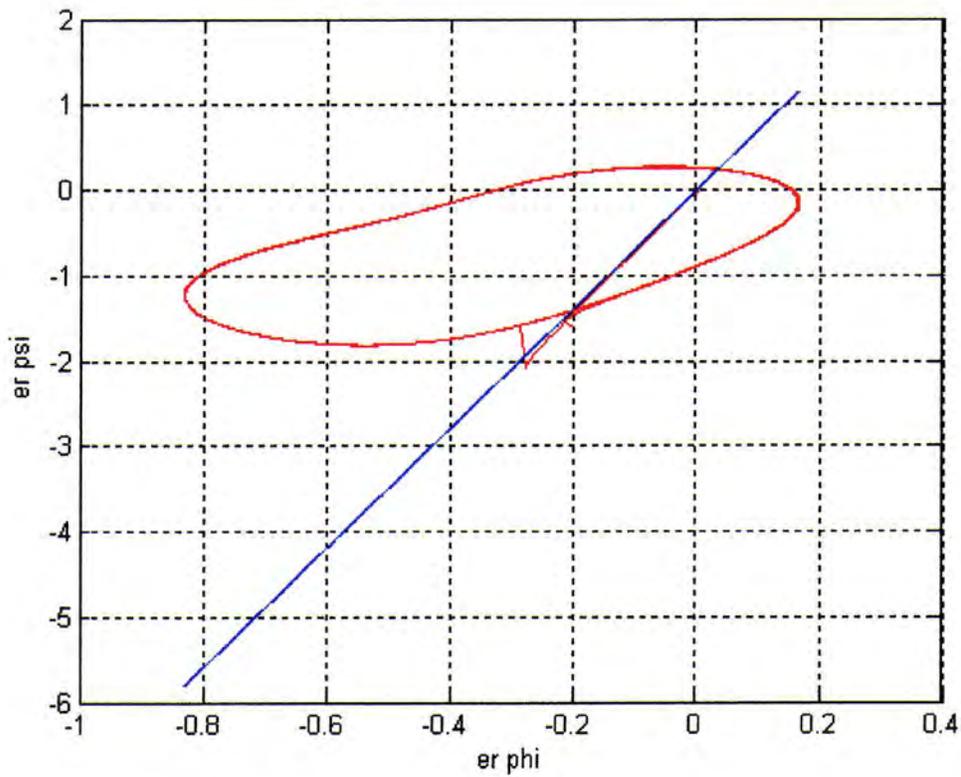


Figure IV.16 Réponse dans le plan de phase

IV. 3 .3.2 TEST2 : Le contrôleur adaptatif en mode glissant basée sur l'estimation de l'erreur de commande : résultats de simulation

Dans cette partie, on applique la théorie présentée au chapitre III.

La fonction d'activation du contrôleur neuronal est choisie comme :

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

Les poids initiaux sont pris aléatoirement dans l'intervalle [0,1]

Les taux d'apprentissage sont $\alpha_v = \alpha_w = 1$;

Le gain $k=2$, les paramètres de la surface $c = [0 \quad -3.5 \quad 0.5]$

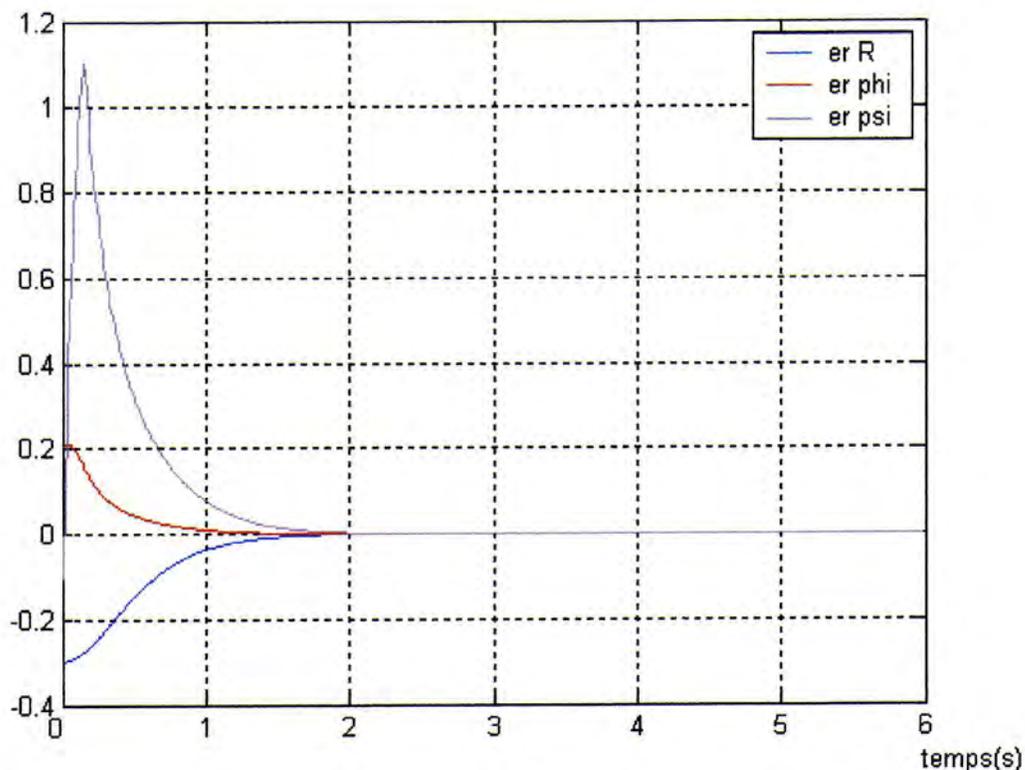
Les valeurs numériques du (FIS) pour l'estimation de l'erreur de commande sont :

$cns=-1; cz=0; cps=1; cnds=-1; czds=0; cpds=1; cN=-0.5; cZ=0; cP=0.5$

On reprend les mêmes tests que précédemment à savoir $\phi_e=0.5$ et $\phi_e=1$

a. Cas $\Phi_e = 0.5$

Les résultats de simulations sont représentés par les figures



IV.17 erreurs des trois variables

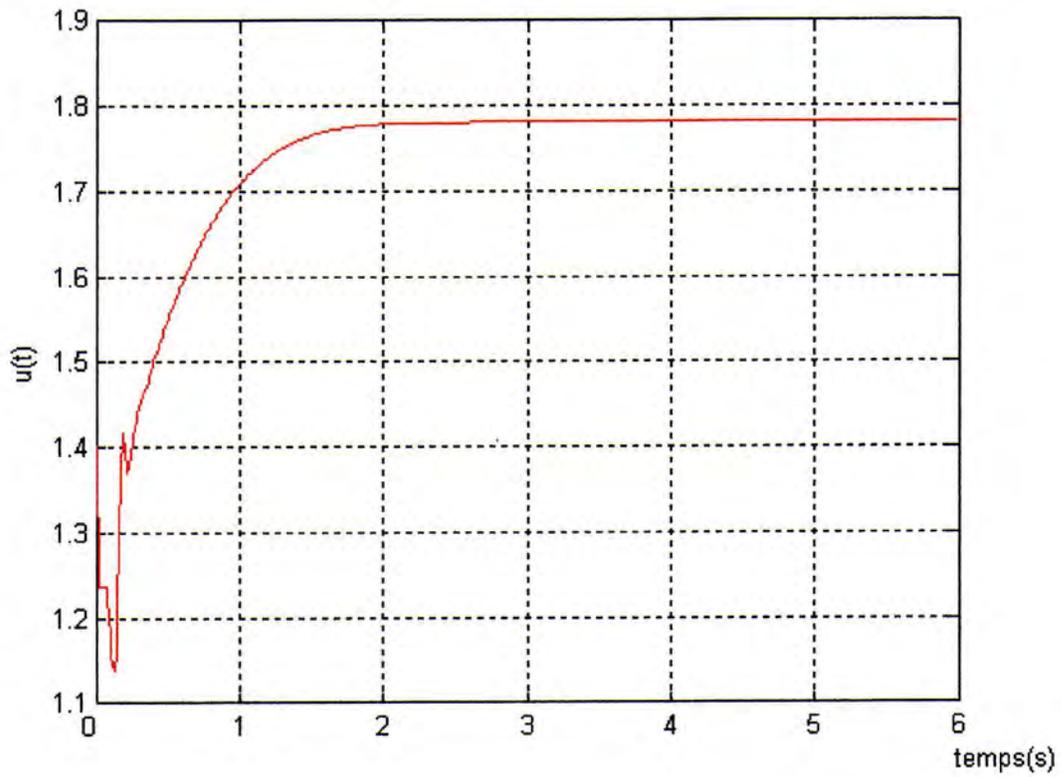


Figure IV.18 signal de commande

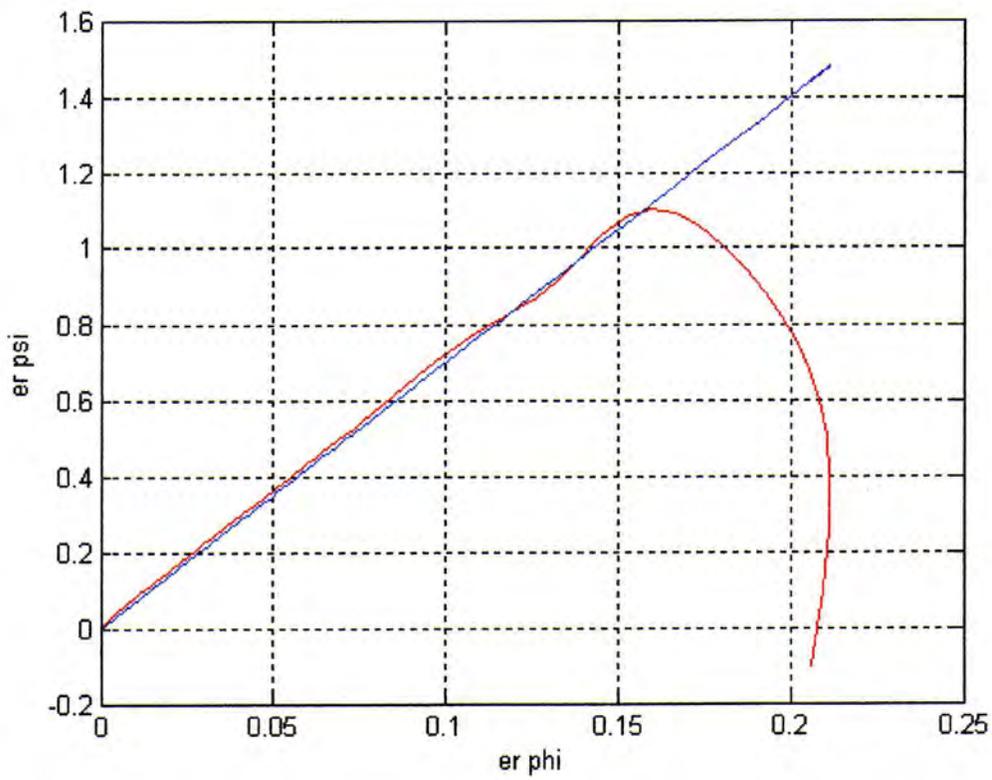


Figure IV.19 Réponse dans le plan de phase

b. Cas $\Phi_e = 1$

Les résultats de simulations sont représentés par les figures

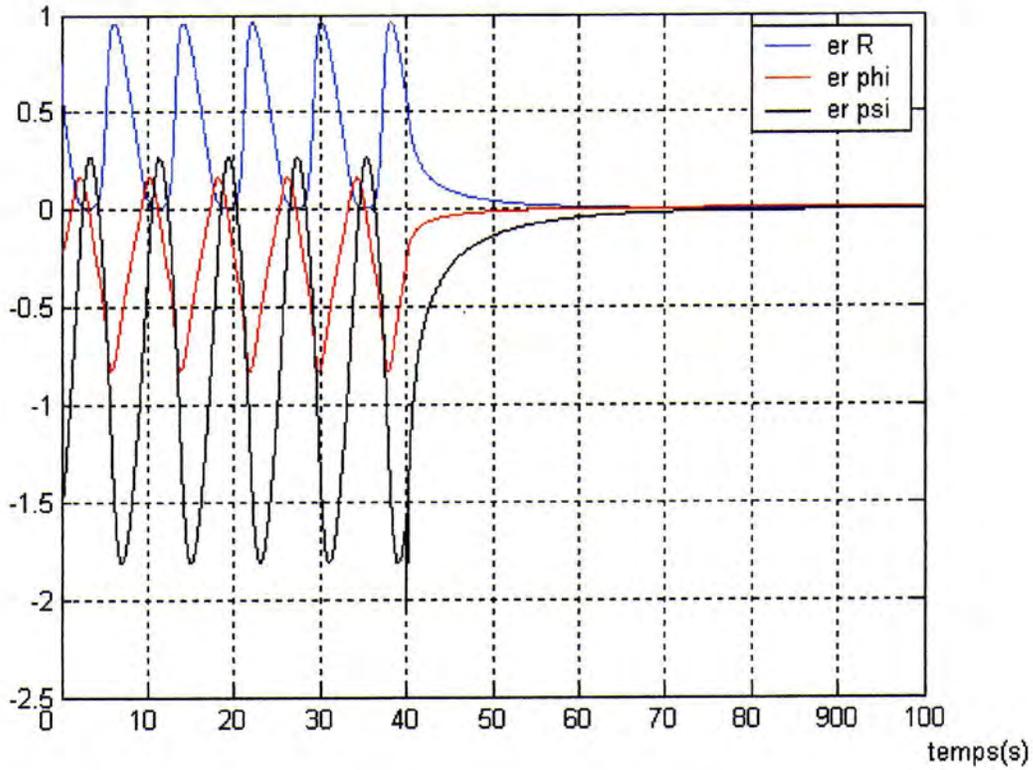


Figure IV.20 erreurs des sorties

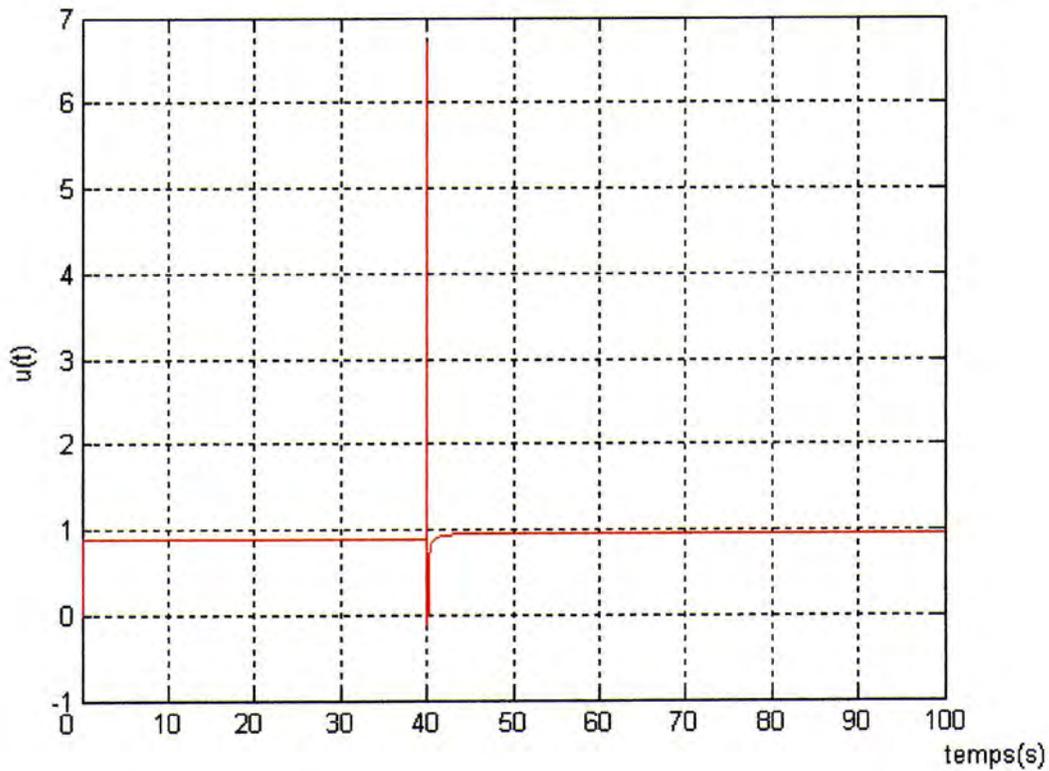


Figure IV.21 signal de commande

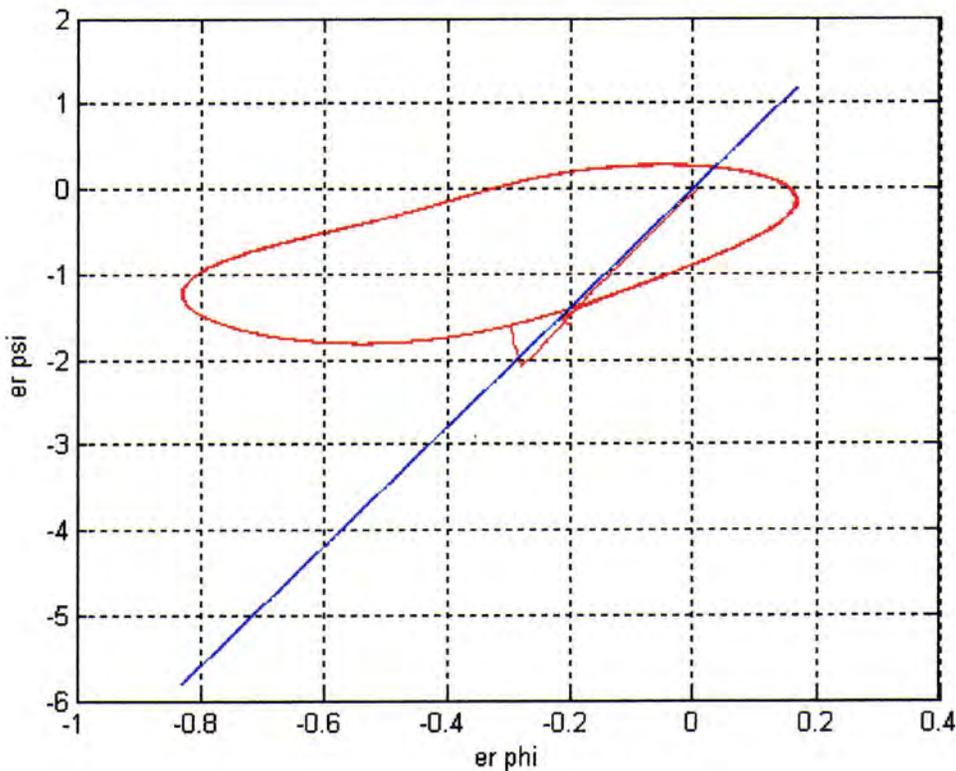


Figure IV.22 Réponse dans le plan de phase

IV. 3.4 Conclusion :

- Fonctionnement pour $\phi_{ie}=0.5$:

Les figures IV.11 et IV.17 montrent que les trois erreurs tendent vers la valeur nulle ce qui implique que le système est amené vers l'état d'équilibre désiré dans les deux méthodes

Le signal de commande est borné pour les deux cas, figure IV.12 et IV.18 et devient lisse rapidement

Les figures IV.13 et IV.19 représentent la réponse dans le plan de phase et on voit bien que le phénomène de broutement (chattering) a été atténué. La trajectoire dans le plan de phase glisse au voisinage de la surface de glissement jusqu'à l'origine.

- Fonctionnement pour $\phi_{ie} = 1$

Les figures IV.14 et IV.20 montrent que sous l'action du contrôleur les instabilités sont éliminées et les différentes variables convergent vers leurs références. Le temps de réponse du contrôleur adaptatif basé sur l'estimation de l'erreur de commande est plus court que celui du contrôleur adaptatif flou.

Les réponses dans le plan de phase (figures IV.16 et IV.22) montrent que sous l'action des contrôleurs, les trajectoires rejoignent le voisinage des surfaces de glissement jusqu'au point d'équilibre. Ainsi les instabilités se trouvent éliminées.

CHAPITRE V
CONCLUSION GENERALE

Chapitre V

Conclusion générale

Dans ce travail nous avons analysé un algorithme adaptatif pour concevoir un contrôleur en mode glissant. Pour cela on a analysé deux algorithmes. Le premier algorithme est basé sur l'approximation de la commande par un système flou dont les poids sont ajustés directement en ligne par un mécanisme d'adaptation basé sur la méthode de Lyapunov. Dans le deuxième algorithme, la commande est approximée par un réseau de neurone dont l'ajustement des poids est basé sur l'estimation de l'erreur de commande par un système flou. Pour atténuer l'effet du broutement (chattering), on a utilisé un système d'inférence flou pour limiter l'effet de la commande discontinue au voisinage de la surface de glissement.

Une étude en simulation a été réalisée sur deux exemples : la commande de la position d'un pendule inversé et la commande des instabilités d'un compresseur à flux axial.

Les résultats de cette étude ont montré que ce type de contrôleur donne de bonnes performances.

Annexe A

Systèmes d'inférence floue

Les systèmes à logique floue opèrent sur des variables linguistiques basées sur l'expertise humaine au lieu des variables numériques. La structure de base d'un système d'inférence floue (FIS) est représentée par la figure A1

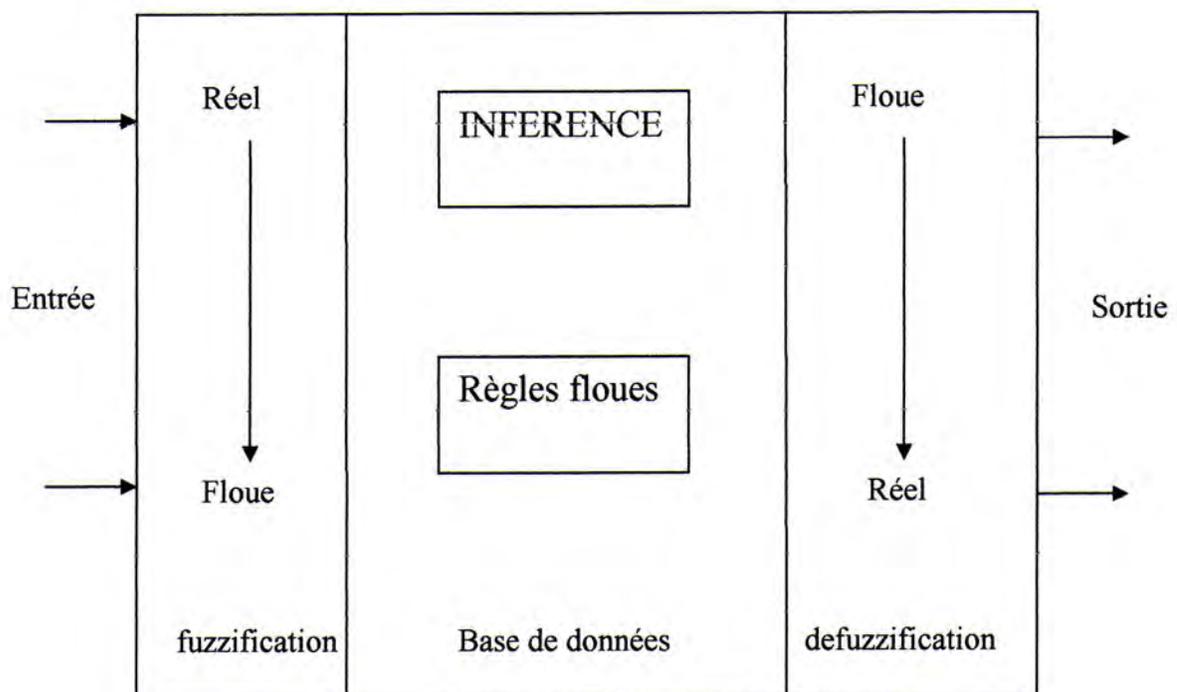


Figure A.1 structure de base pour un FIS

Interface fuzzification

L'interface fuzzification consiste à :

Mesure les valeurs numériques des variables d'entrées

Les projetées dans l'univers de discours puis transformer ces valeurs numériques en valeurs linguistiques en utilisant des fonctions d'appartenances

Base de connaissances

REFERENCES

- [1] B. Yoo and W. Ham "Adaptive fuzzy sliding mode control of nonlinear system," IEEE Trans. Fuzzy Syst., Vol.6, pp.315-321, 1998
- [2] C-M Lin, and C-F Hsu "Adaptive Fuzzy Sliding-Mode Control for Induction Servomotor Systems" IEEE Tans on Energy Conversion, Vol. 19, NO. 2, 2004
- [3] C-H Tsai, H-Y Chung and F-M Yu " Neuro-Sliding Mode Control With Its Applications to Seesaw Systems" IEEE Trans on neural networks, Vol. 15, NO. 1 ,2004
- [4] F-J Lin and R-J Wai "Sliding-Mode-Controlled Slider-Crank Mechanism with Fuzzy Neural Network" IEEE Trans on industrial electronics, Vol. 48, NO. 1, 2001
- [5] F.K.Moore and E. M.Greitzer, "A theory of post-stall transients in axial compression systems: Part I-Development of equations," J. Eng. Gas Turbines Power, Vol. 108, pp. 68-76, 1986.
- [6] G - Gu, A- Sparks, and S. Banda "An Overview of Rotating Stall and Surge Control for Axial Flow Compressors" IEEE Trans on Control Systems Technology, Vol 7.No, 6 ,1999
- [7] J-Y Chen " Design of a SMC-Based Fuzzy Controller for Nonlinear Systems" IEEE Conf. Fuzzy System , Spain, pp. 377-382, 1997.
- [8] L. X. Wang, and J.M.mendel "Fuzzy basis functions, universal Approximation, and orthogonal least-squares learning" IEEE Trans. On Neural Networks, Vol. 3, n° 5, pp. 807-814, 1992
- [9] L.X. Wang, "Stable Adaptive Fuzzy Control of Nonlinear Systems," IEEE Trans. Fuzzy Syst. Vol.1,NO 2 , pp. 146-155, 1993
- [10] K.Belarbi and M.chemchema "A stable direct adaptive neural network controller with a fuzzy estimator of the control error for a class of perturbed nonlinear systems" IET Proceedings in control theory and applications. Vol 1 ,pp 1398-1404.2007
- [11] V. I. Utkin, (1977) "Variable structure systems with sliding modes," IEEE Trans Automat. Contr.vol AC-22 pp. 212-222, Apr. 1977
- [12] W.B.Gao and J.C.Hung, "Variable Structure Control of Nonlinear Systems: A New Approach", IEEE Trans.Ind.Electron., 45-55, 1993

Résumé

Dans ce mémoire une structure de commande en mode glissant adaptative est présentée la premier approche est basée sur l'approximation de la commande équivalent par un système flou avec adaptation des poids basée sur la théorie de Lyapunov et une autre approche ou la commande équivalent est approximer par un réseau de neurone et l'adaptation des poids est basée sur l'estimation de l'erreur de commande Pour atténuer l'effet du broutement (chattering), on a utilisé un système d'inférence flou pour limiter l'effet de la commande discontinue au voisinage de la surface de glissement. Une étude en simulation a été réalisée sur deux exemples : la commande de la position d'un pendule inversé et la commande des instabilités d'un compresseur à flux axial. Les résultats de cette étude ont montré que ce type de contrôleur donne de bonnes performances.