

4.1 Introduction

Etant un cas particulier de la commande à structure variable, la commande par modes glissants (CMG) a été largement utilisée dans la littérature. Ce succès est dû à sa simplicité de mise en œuvre et à sa robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et des perturbations externes. Il s'agit de définir d'abord une surface dite de glissement qui représente la dynamique désirée, puis synthétiser une loi de commande qui doit agir sur le système en deux phases. Dans la première, on force le système à rejoindre cette surface, et dans la seconde phase on doit assurer le maintien et le glissement le long de cette surface pour atteindre l'origine du plan de phase comme montré sur la figure (4.1).

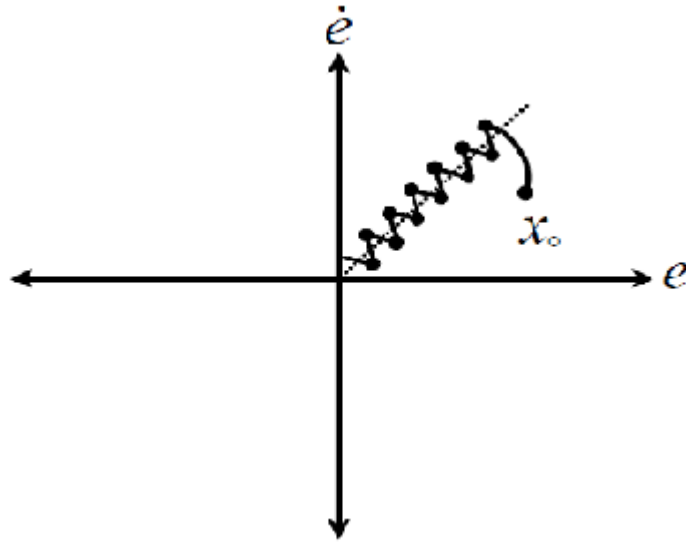


Figure (4.1) : Les deux phases de la CMG.

Si l'on considère le système donné par l'équation (I.3), la surface de glissement peut être définie par :

$$s = \dot{e} + \lambda e \quad (4.1)$$

Où λ est un constant positif représentant la pente de glissement. Il est à noter qu'en général, on donne une grande valeur à λ pour assurer l'attractivité ainsi que le maintien du système sur cette surface.

Pour $\psi_{c1}(x)$ et $\psi_{c2}(x)$ parfaitement connue, la C.M.G. peut être donnée par :

$$\begin{cases} u = u_{eq} + u_{sl} \\ u_{eq} = \psi_{c2}^{-1}(x)[- \psi_{c1}^{-1}(x) + \ddot{y}_d + \lambda \dot{e}] \\ u_{sl} = \psi_{c2}^{-1} \cdot k_s \cdot \text{sign}(s) \end{cases} \quad (4.2)$$

Où u_{eq} est la commande équivalente permettant le maintien et le glissement le long de la surface S . u_{sl} représente le signal de commutation assurant la convergence du système vers la surface.

La loi de commande (4.2) est certes robuste vis-à-vis des perturbations paramétriques et externes mais présente quelques inconvénients majeurs :

1. L'utilisation du terme $sign(s)$ dans le signal de commutation provoque le phénomène de broutement qui peut exciter les hautes fréquences et détériorer le système commandé. Pour résoudre ce problème, la fonction signe a été remplacée par la saturation. Néanmoins, cette substitution introduit une erreur statique qui persiste. D'autres auteurs ont proposé d'utiliser un système flou pour avoir une approximation non linéaire mais le problème de l'erreur statique n'est pas résolu [18].

2. La mise en œuvre du signal de commutation nécessite la détermination de la constante k_s qui dépend des perturbations paramétriques et externes, ce qui est difficile si ce n'est pas impossible. En général, on prend une valeur très grande pour assurer la stabilité ce qui augmente les sollicitations au niveau de l'actionneur et amplifie gravement le phénomène de broutement. Parmi les solutions présentées dans la littérature, on peut citer celles proposées au sein de l'équipe [6]. Il s'agit de remplacer le signal de commutation par un système adaptatif flou ce qui a permis de résoudre à la fois le problème du gain k_s et celui du broutement. Cependant, la convergence de l'algorithme dépend du choix des valeurs initiales ce qui rend son implémentation complexe dans le cas des systèmes rapides ou assujettis à de grandes variations paramétriques.

3. Le troisième inconvénient concerne la nécessité de disposer d'une connaissance même partielle de la dynamique du système. Pour remédier à cet inconvénient, on peut approximer la dynamique du système pour synthétiser la loi de commande. Pour assurer de bonnes performances de poursuite, un algorithme d'adaptation a été utilisé pour améliorer l'approximation. Celle-ci peut être effectuée à l'aide d'un système flou [1], [4].

4. 2 Robustification de la L.E.S.F.A

4.2.1 Principe de la Commande Additive

L'objectif principal de cette partie est de chercher une loi de commande additive capable de compenser ou d'atténuer l'influence de l'erreur d'approximation floue sur les performances de commande et ainsi d'assurer la robustesse de la structure de commande.

La loi de commande u donnée par (3.8) est augmentée par une composante additive u_A (Voir figure 4.2) et devient alors:

$$u_c = \frac{-\psi_{fc1}(x)}{\psi_{fc2}(x)} + \frac{1}{\psi_{fc2}(x)} v - \frac{1}{\psi_{fc2}(x)} u_A \quad (4.3)$$

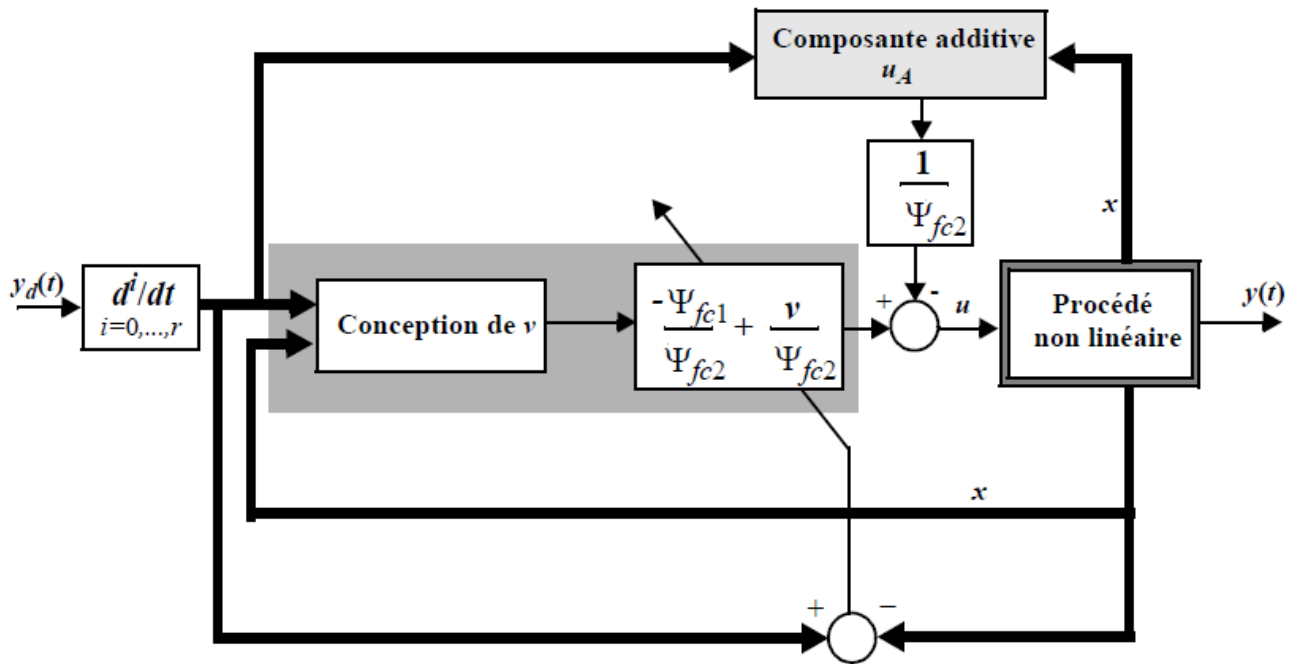


Figure 4.2 : Principe de la commande additive.

La composante additive u_A peut-être synthétisée via des techniques de mode de glissement ou des techniques basées sur l'optimisation H_∞ .

Par substitution de (4.3) dans (1.3), l'équation dynamique de l'erreur de suivi (3.10) devient:

$$e_0^{(n)} = -\mu^T + u_A - \Delta \quad (4.4)$$

Ou encore, sous une forme matricielle:

$$\dot{e} = Ae + Bu_A - B\Delta \quad (4.5)$$

A et B étant définis dans (3.11).

4.3 Robustification par Mode de Glissement :

Il est important d'attirer l'attention du lecteur sur le fait que l'objectif de la synthèse d'une loi de mode de glissement est tout simplement la compensation de l'erreur d'approximation floue entre le système non linéaire et le système flou optimal supposé disponible.

Dans ce cas la loi de commande additive u_A est représentée par une composante de mode de glissement notée u_{sl} . La loi de commande (4.3) devient alors:

$$u = \frac{-\psi_{fc1}(x)}{\psi_{fc2}(x)} + \frac{1}{\psi_{fc2}(x)} v - \frac{1}{\psi_{fc2}(x)} u_{sl} \quad (4.6)$$

Ce qui conduit à l'équation dynamique d'erreur suivante:

$$\dot{e} = Ae + Bu_{sl} - B\Delta \quad (4.7)$$

La loi de mode de glissement est directement déduite du lemme suivant:

Démonstration : Si la loi de commande additive u_{sl} est donnée par:

$$u_{sl} = -\Delta_0 \text{sgn}(e^T P B) \quad (4.8)$$

Où P est une matrice symétrique définie positive solution de l'équation de Lyapunov (3.12), Q une matrice symétrique définie positive et sgn la fonction signe définie comme suit:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{Si } x > 0 \\ -1 & \text{Si } x < 0 \\ 0 & \text{Si } x = 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

Alors la fonction quadratique (3.13) est une fonction de Lyapunov qui garantit la stabilité de la structure de commande ainsi que la convergence vers zéro de l'erreur de suivi de trajectoire.

Démonstration : Par substitution de l'équation dynamique d'erreur (4.5) dans (3.14), on trouve:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\frac{1}{2} e^T Q e + u_{sl} e^T P B - e^T P B \Delta \\ \dot{V} &\leq -\frac{1}{2} e^T Q e + u_{sl} e^T P B + |e^T P B \Delta| \end{aligned} \quad (4.10)$$

Le choix de u_{sl} (4.8) permet de déduire:

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} e^T Q e \leq 0 \quad (4.11)$$

Ce qui prouve la stabilité de la structure de commande.

La convergence asymptotique de l'erreur de suivi de trajectoire e_0 est obtenue via le lemme de Barbalat [2].

4.4 APPLICATION 2 :

On désire appliquer la commande développée sur le pendule inversé défini dans le chapitre 3.

L'environnement Matlab a été utilisé pour les simulations dont les résultats obtenus en appliquant la loi de commande (4.6) au pendule sont donnés par les figures (4.3), (4.4) et (4.5).

La figure (4.3) montre les bonnes performances de poursuite obtenues au niveau de la position angulaire

4.4.1 Résultats de simulation :

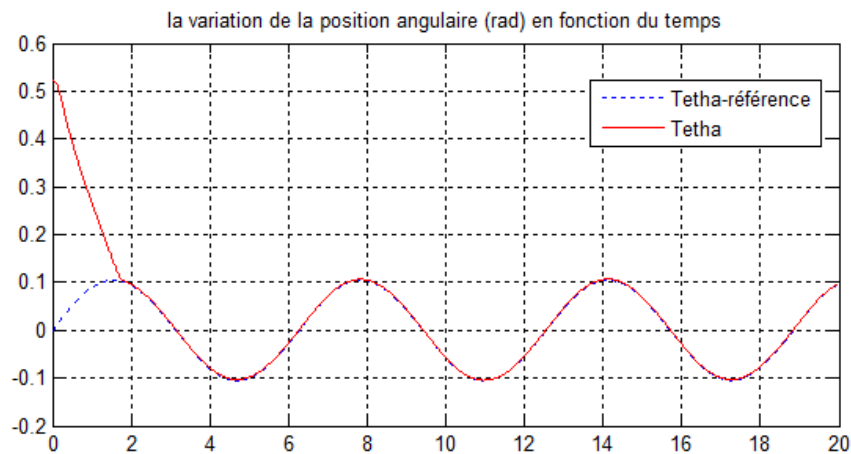


Figure 4.3 : la variation de la position angulaire et leur référence en fonction du temps.

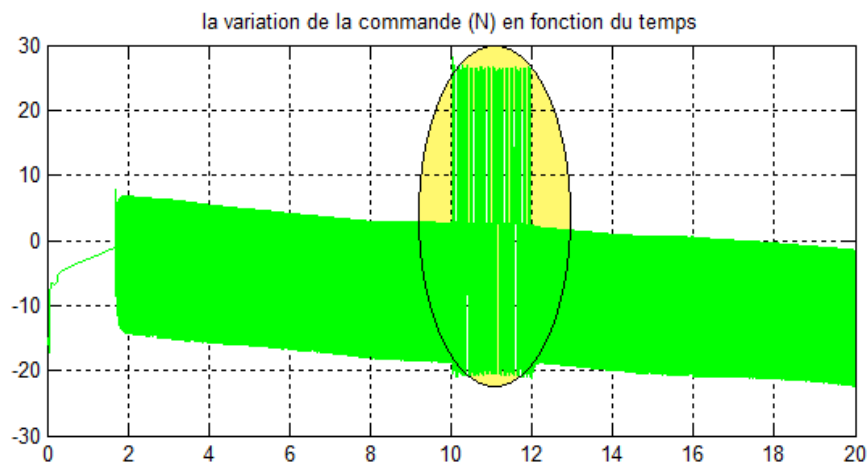


Figure 4.4 : la variation de la commande en fonction du temps.

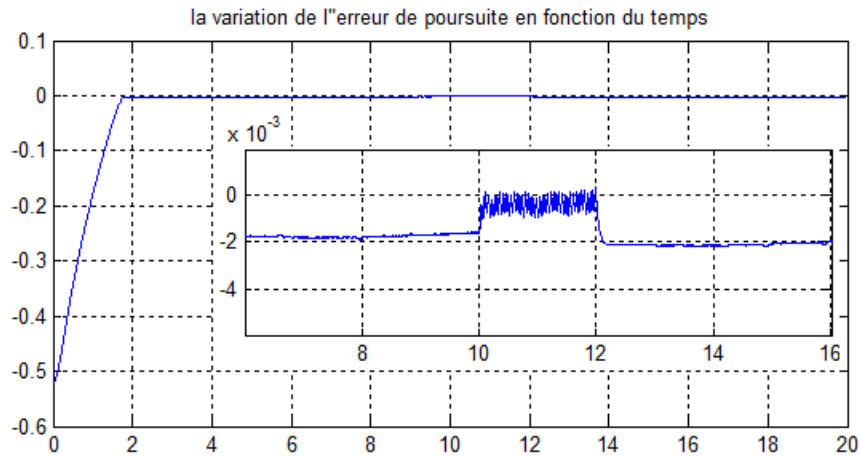


Figure 4.5 : la variation de l'erreur de poursuite en fonction du temps.

On remarque que malgré la forte perturbation, la commande appliquée force la sortie du système à suivre le signal de référence, cette poursuite s'effectue en minimisant l'erreur d'approximation d'une part, et en assurant la stabilité du système d'autre part.

Mais, son inconvénient réside de cette commande l'utilisation du terme $\text{sign}(S)$ dans le signal de commutation provoque le phénomène de broutement qui peut exciter les hautes fréquences, Comme illustrée à la figure 4.5. et détériorer le système commandé. Pour résoudre ce problème, il existe plusieurs méthodes, parmi ces méthodes on note deux types d'améliorations par un contrôleur flou dans le premier temps un contrôleur de type MAMDANI puis de type SUGENO.

4.5 Amélioration de la commande floue adaptative par mode glissant :

4.5.1 Amélioration par un contrôleur flou de type de MAMDANI :

Une commande adaptative floue par mode glissant, d'un système non linéaire perturbée a été développée dans la partie précédente du chapitre. L'objectif de cette approche était de garantir la stabilité, la robustesse du système bouclé ainsi que la convergence de l'erreur de poursuite vers zéro.

Pour minimiser l'erreur de poursuite du système on propose d'utiliser un contrôleur flou supplémentaire, Dans ce cas la commande additive est représentée par une composante notée u_f .

La loi de commande (4.3) devient alors:

$$u = \frac{-\psi_{fc1}(x)}{\psi_{fc2}(x)} + \frac{1}{\psi_{fc2}(x)} v - \frac{1}{\psi_{fc2}(x)} u_{sl} + \frac{1}{\psi_{fc2}(x)} u_f \quad (4.12)$$

Le principe de la loi de commande (4.12) est illustré à la figure 4.6.

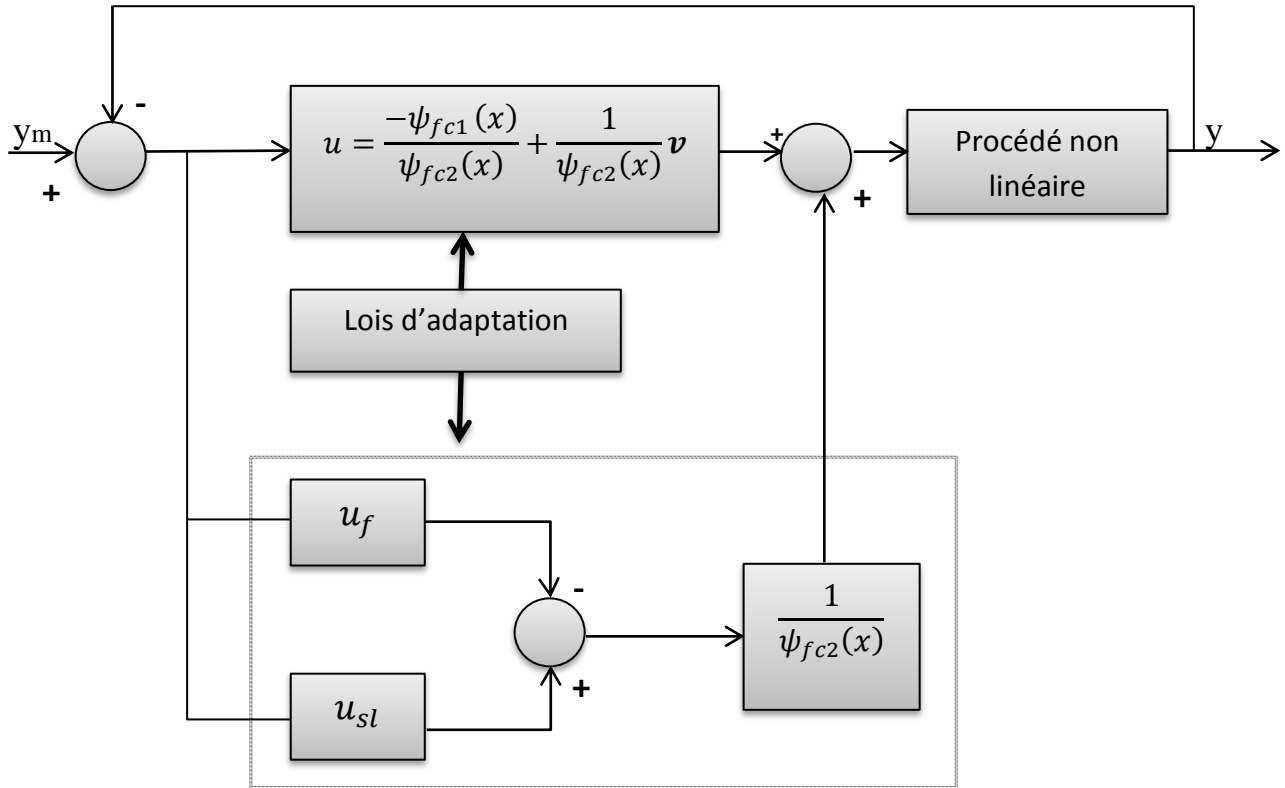


Figure 4.6 : principe de la loi de commande avec l'amélioration.

4.5.1.1 Résultats de simulation :

Pour valider les approches proposées, on considère le pendule inversé présenté dans la partie précédente.

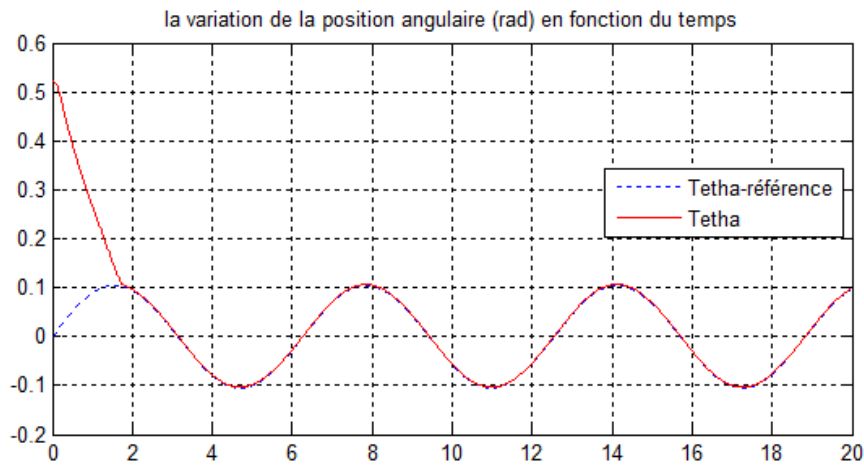


Figure 4.7 : la variation de la position angulaire et leur référence en fonction du temps.

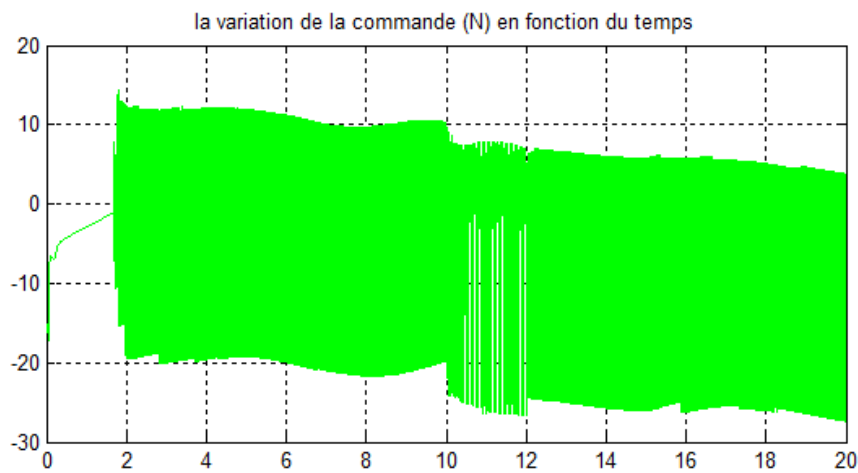


Figure 4.8 : la variation de la commande en fonction du temps.

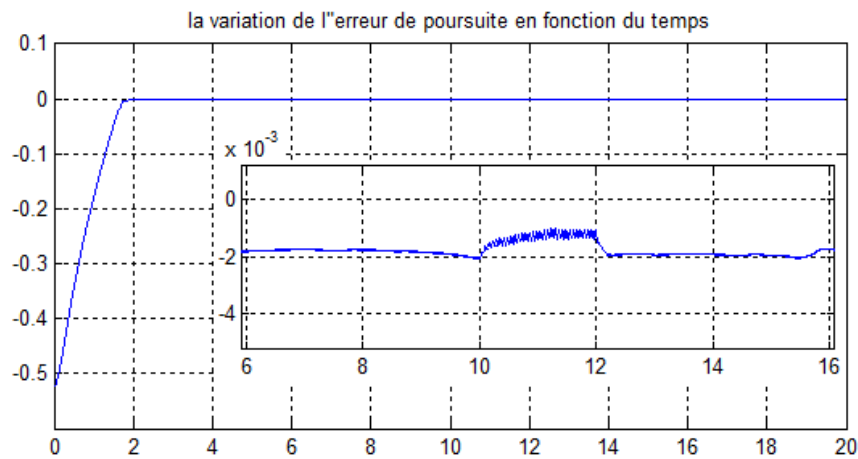


Figure 4.9 : la variation de l'erreur de poursuite en fonction du temps.

D'après la figure (4.4), on constate l'apparition du phénomène de broutement, tandis qu'après l'application de la méthode de MAMDANI, le phénomène de broutement est disparu complètement (figure 4.8), ce qui explique la nette amélioration des caractéristiques du système

4.5.2 Amélioration par un contrôleur flou de type de SUGENO :

Dans ce cas la commande générée par le superviseur supplémentaire proposée est donnée par :

$$u_f = \theta^T \xi(x) \quad (4.13)$$

Où $\xi^T(x)$ le vecteur des degrés de validité des prémisses de règles. et θ le vecteur de paramètre ajustés ou adapté.

4.5.2.1 Résultats de simulation :

Pour valider les approches proposées, on considère le pendule inversé présenté dans la partie précédente.

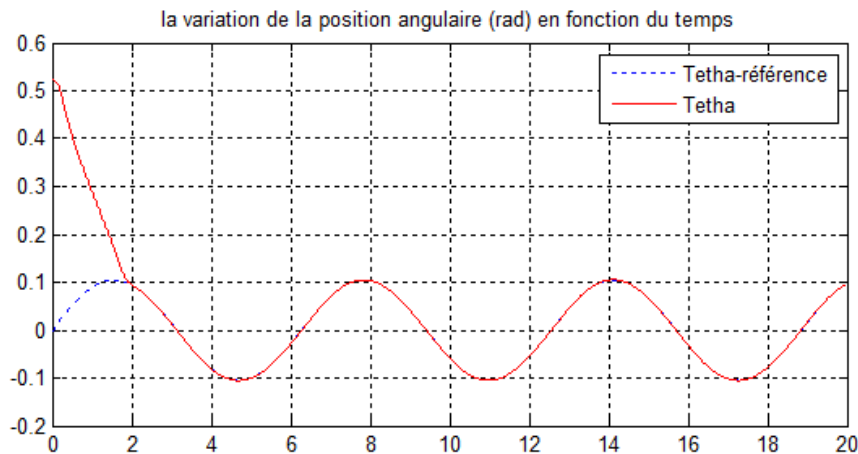


Figure 4.10 : la variation de la position angulaire et leur référence en fonction du temps.

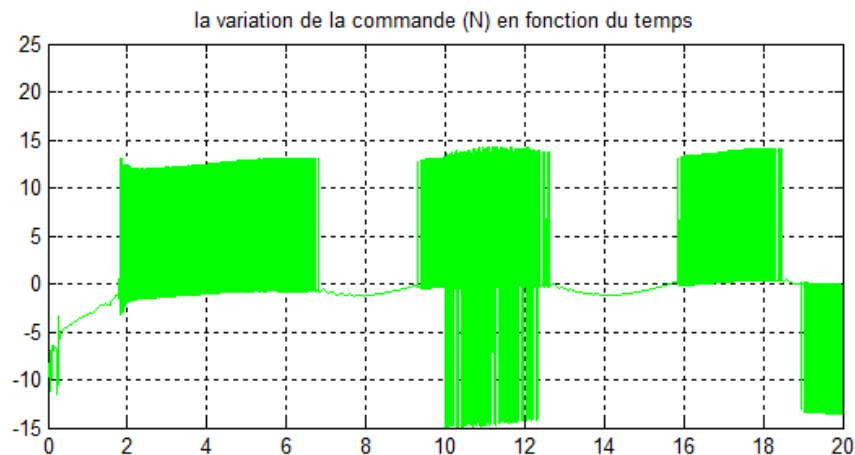


Figure 4.11 : la variation de la commande en fonction du temps.

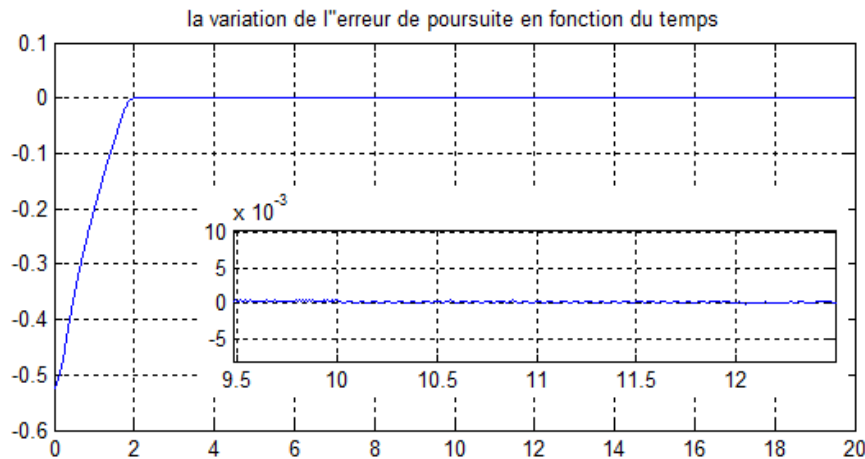


Figure 4.12 : la variation de l'erreur de poursuite en fonction du temps.

Nous remarquons que malgré la position initiale choisie loin de la trajectoire désirée et l'amplitude des perturbations, la commande floue adaptative par mode glissant permet d'atteindre les performances de poursuite désirées et garantit la robustesse du système bouclé. Nous avons introduit un signal supplémentaire généré par un contrôleur flou permet donc d'améliorer les performances de poursuite.

Les figures (4.9) et (4.12) illustrent que le phénomène de broutement ne peut pas exciter les hautes fréquences sur la perturbation, cette poursuite s'effectue en minimisant l'erreur d'approximation d'une part, et en assurant la stabilité du système d'autre part.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la robustification de la commande adaptative floue d'une classe des systèmes non linéaires incertains et perturbés à l'aide de l'approche mode glissant.

Concernant cette approche, on a considéré d'abord qu'un modèle est disponible. Celui-ci peut être obtenu par l'exploitation d'informations linguistiques décrivant le comportement dynamique du système sous forme des règles « Si Alors ». Les incertitudes ont été atténuées par l'ajout d'un signal de commande par mode glissant, un signal de commande supplémentaire est ajouté issu d'un système flou pour améliorer les performances de poursuites et réduire les signaux de commandes.