



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA



Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la
Communication

Département de l'électronique et de télécommunication

MEMOIRE MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Électronique

Spécialité : Automatique

Présenté par :

TEMMAR Romaiassa

THEME

**COMMANDE TOLERANTE AUX DEFAUTS ADAPTATIVE
FLOUE POUR LES SYSTEMES NON LINEAIRES INCERTAINS
SISO VIA BACKSTEPPING**

Soutenu publiquement

Le : 23 /05 / 2017

Devant le jury :

Mr	MELHGUEG Nacer	MAA	Président	UKM Ouargla
Mr	BENYOUNES Abdelhafid	MAB	Examineur	UKM Ouargla
Mm	KARA Fouzia	MAA	Encadreur	UKM Ouargla
Mr	CHEBBARA Fouad	MCA	Co-Encadreur	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2016/2017

Remerciements

Je remercie Allah, le tout puissant, pour m'avoir donné, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaire, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, qui se sont hissés au travers de mon chemin, durant toutes mes années d'études.

J'adresse mes sincères remerciements à tous mes enseignants de l'université de OUARGLA, notamment à ma promotrice Mm. KARA Fouzia et mon Co-promoteur Mr CHEBBARA Fouad d'avoir proposé le sujet sur lequel j'ai travaillé, et qu'ils ont assurés la direction et l'encadrement du travail présenté dans ce mémoire.

Je tiens notamment, à adresser l'expression de ma sincère reconnaissance aux membres du jury d'examen, pour l'intérêt qu'ils ont portés à ce travail.

Enfin, mes remerciements vont à tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin à réussir ce travail.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur la commande tolérante aux défauts	
I.1. Introduction	4
I.2. Systèmes de commande tolérants aux défauts	4
I.3. Classification des défauts	5
I.4. Diagnostic et la tolérance aux défauts	6
I.5. Classification des approches FTC	7
I.5.1. Approche passive	8
I.5.2. Approche active	9
I.6. FTC active pour les systèmes non linéaires	10
I.7. Conclusion	12
Chapitre II : Commande adaptative floue et Commande par backstepping	
II.1. Introduction	13
II.2. Approximateurs flous	13
II.2.1. Système flou	14
II.2.2. Approximation par les systèmes flous	16
II.3. Commande adaptative	16
II.3.1. Principe de commande adaptative	17
II.3.2. Différentes techniques de commande adaptative	17
II.3.3. Commande adaptative floue	18
II.4. Commande par backstepping	20
II.4.1. Méthode directe de Lyapunov	20
II.4.2. Technique de la commande par backstepping	21

II.5. Conclusion	25
------------------	----

Chapitre III : Commande tolérante aux défauts adaptative floue via backstepping

III.1. Introduction	26
III.2. Problématique	26
III.3. Synthèse de la loi de commande	28
III.4. Simulation et Résultats	36
III.5. Conclusion	41
Conclusion générale	42
Références bibliographiques	43

Liste de figures

Figure I.1	Principe d'un système de commande tolérante aux défauts.	5
Figure I.2	Boucle de régulation et différents défauts agissants.	5
Figure I.3	Types des défauts.	6
Figure I.4	Système muni d'un module de diagnostic et une commande tolérante aux défauts.	7
Figure I.5	Classification des commandes tolérantes aux défauts.	8
Figure I.6	Schéma de principe d'une loi de commande FTC passive.	8
Figure I.7	Schéma de principe d'une loi de commande FTC active.	9
Figure II.1	Représentation des systèmes flous.	14
Figure II.2	Principe des systèmes de commande adaptative.	17
Figure II.3	Schéma synoptique de la commande adaptative directe d'un processus.	18
Figure II.4	Schéma synoptique de la commande adaptative indirecte d'un processus.	18
Figure II.5	Commande adaptative floue directe.	19
Figure II.6	Commande adaptative floue indirecte.	19
Figure II.7	Interprétation géométrique du théorème de Lyapunov.	21
Figure III.1	Principe de la commande tolérante aux défauts par la commande adaptative floue.	28
Figure III.2	Evolution du signal de sortie et sa référence.	37
Figure III.3	Evolution de l'erreur $z_1 = x_1 - y_r$	37
Figure III.4	Evolution des lois d'adaptations.	38
Figure III.5	Evolution du signal de la commande.	38
Figure III.6	Evolution du signal de sortie et sa référence.	39
Figure III.7	Evolution de l'erreur $z_1 = x_1 - y_r$	39
Figure III.8	Evolution des lois d'adaptations.	40
Figure III.9	Evolution du signal de la commande.	40

Abréviations et symboles

Abréviations

AFTC	Active Fault Tolerant Control
FBF	Fonctions Floues de Base
FDI	Fault Detection and Isolation
FTC	Fault Tolerant Control
FTCS	Fault Tolerant Control System
IP	Indice de Performance
MRAC	Commande Adaptative à Modèle de Référence
PFTC	Passive Fault Tolerant Control
SISO	Single Input Single Output (Mono entrée Mono sortie)
STC	Régulateur Auto-Ajustable
URI	Unité de Référence Inertiel

Symboles

θ	Vecteur de paramètres
z	Erreur de suivi
y	Sortie du système
x	Vecteur d'état
u	Commande du système
d	Perturbations externes
$V(x)$	Fonction de Lyapunov
$\mu_A(x)$	Fonction d'appartenance d'un variable floue
y_r	Trajectoire désirée

Introduction générale

Un défaut est un évènement qui agit sur un système et qui peut changer ses propriétés conduisant à une dégradation des performances du procédé voir à son instabilité. Ce défaut résulte essentiellement des actionneurs, des capteurs, du contrôleur ou du procédé lui-même. Pour faire face à ce problème, différentes stratégies ont été proposées dans la littérature pour maintenir la stabilité avec un certain degré de performances du système commandé en dépit de la présence d'un dysfonctionnement. Une telle commande porte le nom "commande tolérante aux défauts" [1].

Un système tolérant aux défauts possède la capacité de maintenir les objectifs nominaux en dépit de l'occurrence d'un défaut et à s'en accommoder de manière automatique. Il permet notamment de garantir la stabilité du système et/ou des performances dégradés acceptable en présence des défauts. On distingue deux approches de commande tolérante aux défauts : une approche passive, l'autre est active. Les méthodes passives se basent sur la synthèse de loi de commande robuste à certains défauts. Les méthodes actives de la commande tolérante aux défauts intègrent un mécanisme de diagnostic pour détecter et localiser les défauts pouvant affecter le système. Si un défaut est détecté par le module de diagnostic, la stratégie de commande tolérante aux défauts est activée via un mécanisme de reconfiguration [2].

Généralement, les systèmes réels sont essentiellement non linéaires incertains et sont soumis à des perturbations externes. L'une des méthodes active de commande tolérante aux défauts pour les systèmes non linéaire les plus connues est la commande adaptative qui est très utile pour le système de commande lorsque la dynamique du procédé est inconnue et/ou change au cours du temps. Cependant, la nature incertaine des systèmes non linéaires rend difficile, si ce n'est impossible, de disposer d'une description analytique de la dynamique du système à commander, une solution à ce problème peut être envisagée à partir d'une représentation du comportement du procédé non linéaire ou de la loi de commande par un modèle flou où les relations entre les entrées, les sorties et les états sont exprimées par des règles floues [3].

Pourtant, cette modélisation floue n'est qu'une représentation approximative du système réel que l'on souhaite commander du fait que le nombre de règles choisit pour décrire le comportement du système est fini. En plus, dans la majorité des cas, le système réel

a des paramètres variables et peut être affecté par des perturbations externes. Par conséquent, la représentation du système non linéaire est formée d'un modèle flou nominal auquel on associe des incertitudes [4].

Pour remédier aux problèmes des erreurs d'approximations et maintenir de bonnes performances de poursuite, l'utilisation d'approches de robustification s'avère nécessaire. Dans ce sens, plusieurs contrôleurs adaptatifs flous robustes utilisent la technique H_∞ pour atténuer les effets des incertitudes et des perturbations externes à un niveau arbitraire prescrit [5].

La méthode de backstepping est une procédure récursive utilisant la théorie de Lyapunov dans la recherche de la loi de commande et dans l'étude de la stabilité. La méthode du backstepping offre pour la commande adaptative floue, un outil de design très efficace qui permet de construire récursivement d'une manière systématique et directe, la loi de commande, la dynamique d'adaptation et la fonction de Lyapunov qui assurent la stabilité de la boucle de commande [6].

L'objectif principal de ce mémoire est de développer une technique de commande tolérante aux défauts via la méthode backstepping basée sur l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle (commande adaptative, les systèmes flous) pour une classe des systèmes non linéaires incertains monovariables, permettant de s'accommoder automatiquement l'effet des défauts qui peuvent apparaître sur un système tout en étant capable de maintenir le fonctionnement nominal. Afin de tester les performances de cette méthode, on effectue un exemple de simulation.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre, est un état de l'art des principales de commandes tolérantes aux défauts. Nous donnons les différentes notions théoriques, définitions et les concepts relatifs à ce domaine, aussi on présente les principales approches de la commande tolérante aux défauts développées dans la littérature.

Dans le deuxième chapitre, on entame les fondements théoriques de la technique de commande adaptative et la technique de la logique floue pour l'approximation des fonctions inconnues puis on présente la commande par backstepping.

Le troisième chapitre est consacré au développement d'une loi de commande tolérante aux défauts robuste utilisant la technique de commande adaptative floue via backstepping

pour les systèmes non linéaire incertains monovariante SISO, la technique proposée est testée par un exemple de simulation pour confirmer ses performances.

Le bilan de travail réalisé, dans le cadre de ce mémoire, et les perspectives envisagées sont donnés en conclusion.

Chapitre I

Généralités sur la commande
tolérante aux défauts

I.1. Introduction

Le problème de la commande tolérante aux défauts a été largement abordé dans ces dernières décennies et a fait l'objet d'un nombre important de résultats expérimentaux et de publications. Dans le domaine industriel, la commande tolérante aux défauts a été implantée dans divers applications militaires et civiles pour accommoder l'effet des défauts dans différents domaines tels que les systèmes de contrôle des avions, la technologie d'espace, les véhicules sous-marins, les centrales nucléaires et aussi les systèmes de guidage des missiles [2].

Nous présentons, dans ce chapitre, les principaux concepts de la commande tolérante aux défauts ainsi que les différentes méthodes et approches utilisées. Une classification des défauts qui peuvent se produire dans une chaîne de commande sera donnée.

I.2. Systèmes de commande tolérants aux défauts (FTCS)

Un système tolérant aux défauts est un système capable à maintenir les objectifs nominaux en dépit de l'occurrence d'un défaut et à s'en accommoder de manière automatique de telle sorte qu'un faible défaut affectant un sous-système n'évolue pas en défaut critique au niveau du système global.

La tâche principale dans un système de commande tolérante aux défauts est la synthèse de lois de commande avec une structure adéquate permettant de garantir la stabilité du système et maintenir les performances de commande proches de celles désirées. Non seulement lorsque tous les composants de la commande sont opérationnels, mais aussi après l'apparition de défauts aux niveaux des capteurs, des actionneurs ou du système [7].

Les systèmes tolérants aux défauts sont utilisés dans différentes applications telles que les réacteurs nucléaires, aéronautique, réseaux mobiles de communications...etc. Par exemple, dans les centrales nucléaires, l'occurrence d'un défaut peut générer une catastrophe écologique/humaine. Une action de commande appropriée pourrait être, dans ce cas, l'arrêt du système en situation d'urgence [2].

On prend par exemple la catastrophe de Tchernobyl. Cet accident est nucléaire qui s'est produit le 26 Avril 1986 dans la centrale nucléaire Lénine en Ukraine. Une explosion énorme au niveau d'une centrale nucléaire, suivie d'une fusion progressive du réacteur No 4. La raison principale de cette tragédie a été l'absence d'un mécanisme d'accommodation aux

défauts. Un autre exemple est la fusée Ariane 5, qui a explosé en plein vol, le 4 Juin 1996, 37 secondes après son décollage. Cela a été causé par un défaut software au niveau de l'unité de Référence Inertiel (URI) qui a fourni des informations erronées au système de contrôle. Ces dernières étaient relatives à la trajectoire et à la vitesse de la fusée. Les conséquences catastrophiques de ces pannes auraient pu être évitées, ou du moins atténuées, si le système de commande était conçu de manière à intégrer un certain degré de tolérance aux défauts [2].

Le principe de la commande tolérante aux défauts est illustré par le schéma de la figure I.1.

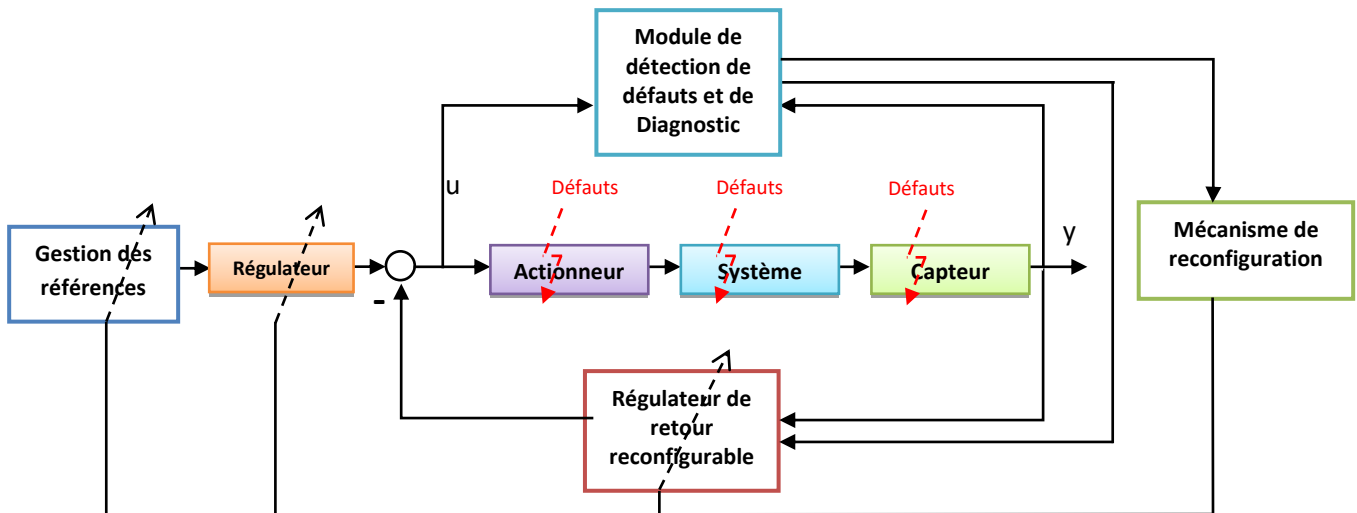


Figure I.1 : Principe d'un système de commande tolérante aux défauts.

I.3. Classification des défauts

Un défaut peut être défini comme étant une déviation, indésirable, d'au moins une propriété caractéristique ou d'un paramètre du système. Un défaut peut apparaître à différents endroits du système. Il peut provoquer des mauvais fonctionnements ou la perte totale du système [7]. Trois classes de défauts peuvent être définies (figure I.2):

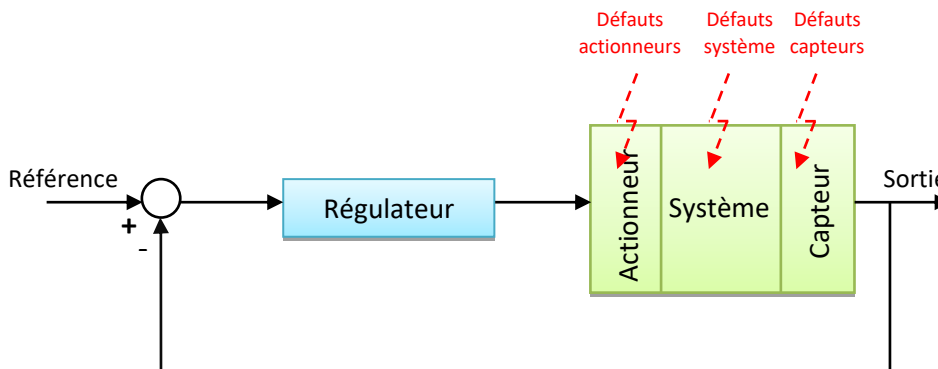


Figure I.2 : Boucle de régulation et différents défauts agissants.

- **Défauts d'actionneurs** : agissant au niveau de la partie opérative du système de commande. Ils conduisent à une perte partielle ou totale du signal de commande.

- **Défauts de capteurs** : Ce type de défaut est la cause d'une mauvaise image de l'état physique du système. Un défaut capteur partiel produit un signal avec plus ou moins d'adéquation avec la valeur vraie de la variable à mesurer. Un défaut capteur total produit une valeur qui n'est pas en rapport avec la grandeur à mesurer [8].
- **Défauts composants ou systèmes** : Ce sont des défauts qui apparaissent dans les composants du système lui-même, c.-à-d. les défauts qui ne peuvent pas être classés ni parmi les défauts capteurs, ni parmi les défauts actionneurs. Ils représentent des changements dans les paramètres du système, ce qui induit un changement du comportement dynamique de ce dernier [1].

Si les défauts doivent être classés relativement à leurs effets sur les performances du système, deux types de défauts peuvent être distingués : des défauts additifs et des défauts multiplicatifs (figure I.3) [7].

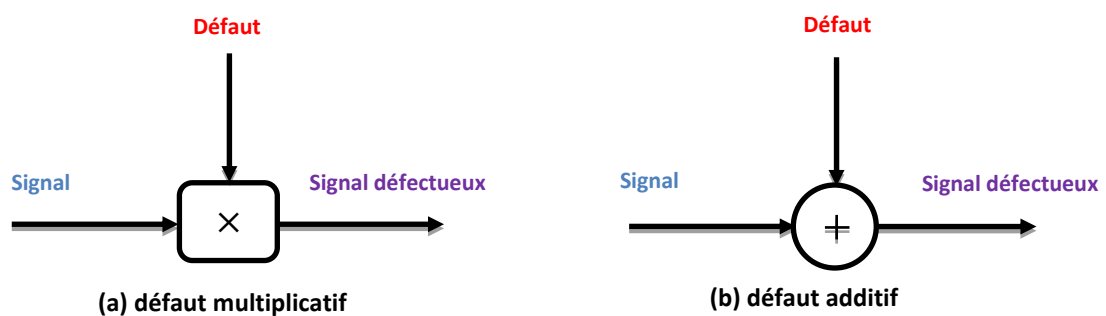


Figure I.3 : Types des défauts.

I.4. Diagnostic et la tolérance aux défauts

La plupart des travaux de recherche dans le domaine de la commande tolérante aux défauts ont été développés en supposant l'existence d'un module de diagnostic fonctionnant d'une façon intégrative avec un module de reconfiguration des lois de commande [2].

Le diagnostic de défauts est une procédure qui consiste à détecter, localiser et identifier un composant ou un élément défectueux dans un système dynamique [8].

La figure (I.4) représente un schéma général d'un système tolérant aux défauts munis d'un système de diagnostic. Il comprend [2]:

- Un système commandé muni de son correcteur, de ses actionneurs et de ses capteurs,
- Une module de détection et diagnostic de défauts surveille le système et donne au superviseur des informations sur l'état du système,

- Un superviseur qui, en cas de défaut, exploite ces informations et redéfinit les consignes et les modifications à apporter aux lois de commande tolérante aux défauts.

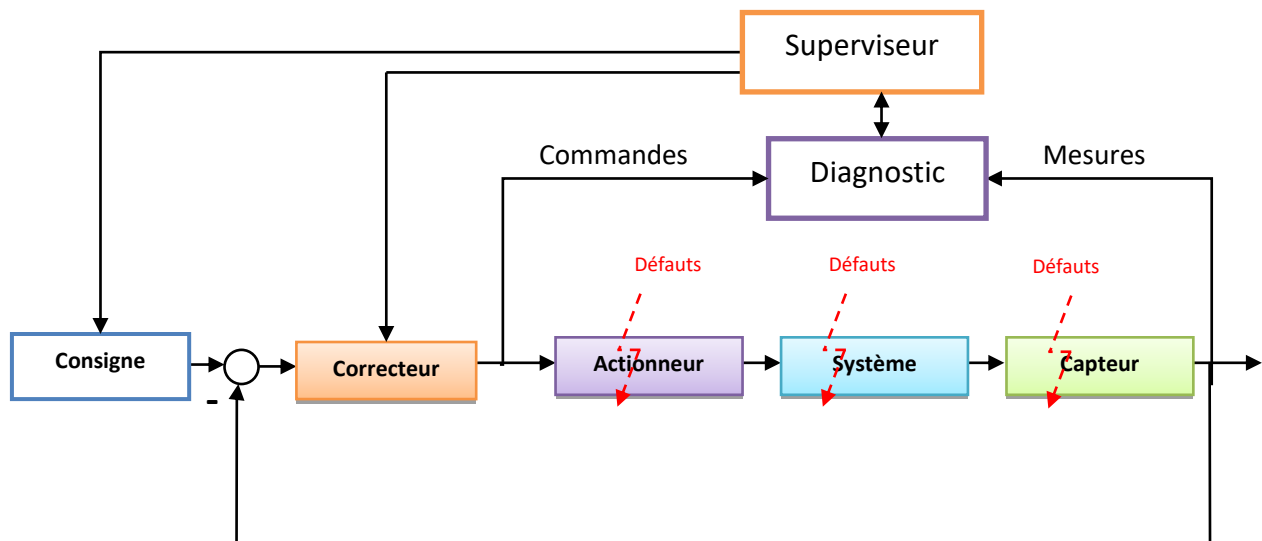


Figure I.4 : Système muni d'un module de diagnostic et une commande tolérante aux défauts.

I.5. Classification des approches FTC

L'objectif principal de la commande tolérante aux défauts est de déterminer une stratégie de commande qui permet d'annuler, ou aux moins limiter les effets de défauts sur la stabilité et les performances du système [1].

En présence d'un défaut de faible amplitude, les techniques de contrôle robuste sont utilisées de manière à ce que le système en boucle fermée reste insensible à un ensemble connu de défauts: on parle alors d'accommodation passive du défaut.

Par contre, en présence de défauts critiques, un module de diagnostic de défauts est nécessaire afin de mettre en œuvre une stratégie active de commande tolérante aux défauts. Dans ce cas, on distingue l'accommodation, la reconfiguration et la restructuration suivant les performances souhaitées après l'occurrence de défaut.

Le diagramme de la figure I.5 illustre cette classification.

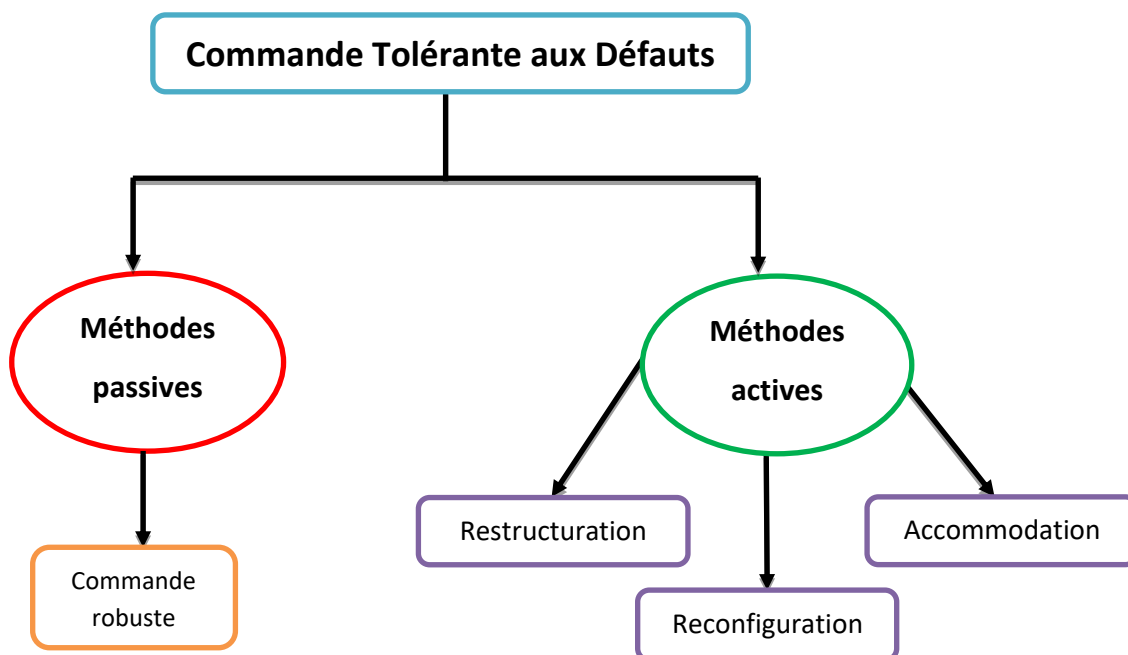


Figure I.5 : Classification des commandes tolérantes aux défauts.

I.5.1. Approche passive

Dans cette approche la FTC est capable à tolérer un certain ensemble de défauts en tenant compte de ces fautes lors de la conception du contrôleur. Le système de commande peut tolérer ce genre de défauts sans modifier la stratégie de commande ni les paramètres du contrôleur. Elle utilise les techniques de la commande robuste par rapport aux incertitudes structurées et perturbations extérieures qui sont les défauts (commande H_∞ , commande rejet de perturbations, commande en mode glissant, . . .) [9].

Ce type d'approche n'a besoin ni d'un module de diagnostic pour détecter la présence des défauts ni d'un bloc de reconfiguration de la loi de commande et/ou des paramètres du système [1].

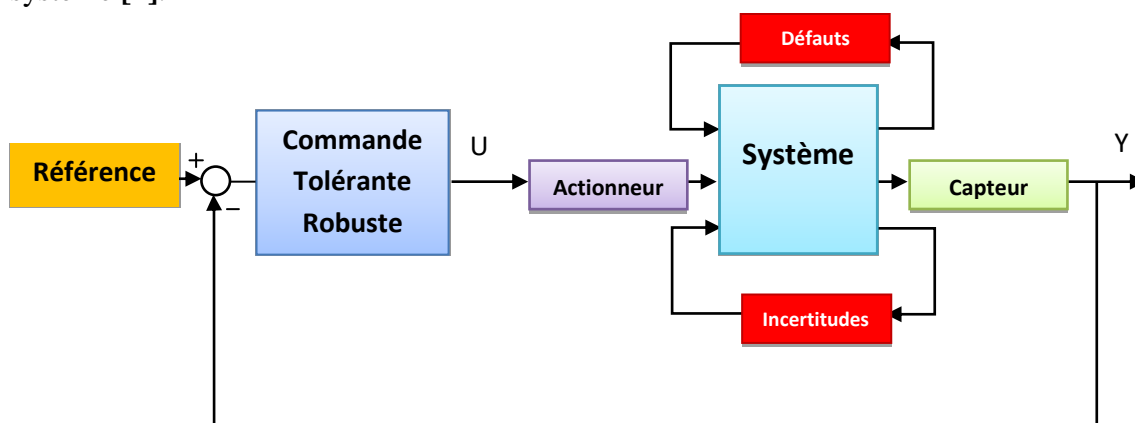


Figure I.6 : Schéma de principe d'une loi de commande FTC passive.

I.5.2. Approche active

Dans cette approche la FTC réagit à l'apparition d'un ou plusieurs défauts en reconfigurant en ligne la loi de commande de manière à maintenir la stabilité et les performances nominales du système. Des outils efficaces de détection et d'isolation des défauts sont alors nécessaires pour détecter et localiser, en ligne, les défauts affectant le système. Le principe d'une commande FTC active est illustré dans la figure 1.7.

Le bloc de détection et identification de défauts (FDI) utilise l'entrée et les sorties mesurées du système pour détecter et estimer, en ligne, le défaut ainsi que les variables d'état du système. Une fois que le défaut est apparu, le bloc "FDI" fournit en ligne les informations concernant l'état du système et le défaut (l'instant d'apparition, le type et l'amplitude du défaut) ainsi qu'un modèle de défaut du système au bloc "FTC".

Le bloc "FTC" accommode ou reconfigure en ligne la loi de commande afin de maintenir la stabilité, la dynamique du système ainsi que ses performances nominales basant sur les informations délivrées par le bloc "FDI" [7].

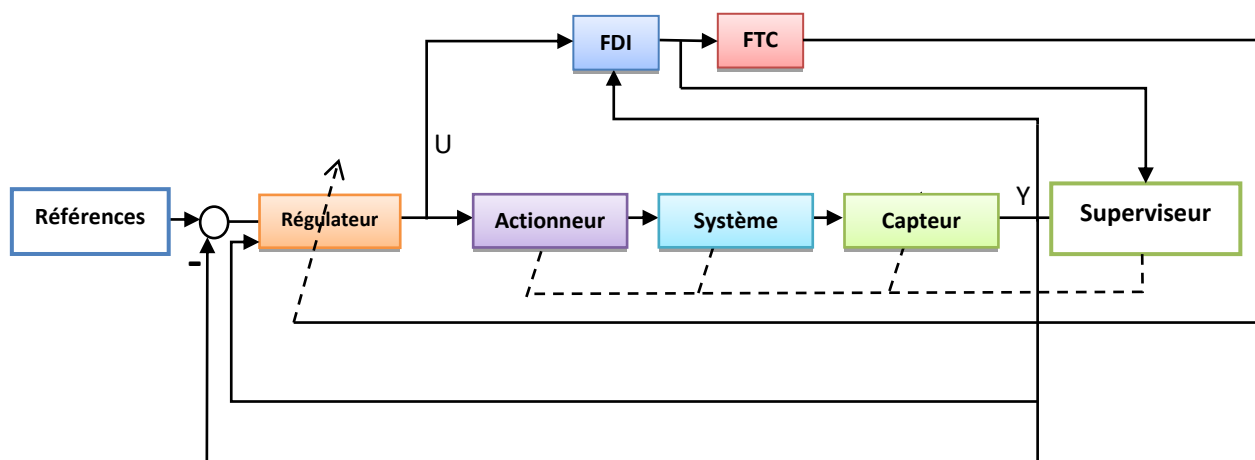


Figure I.7 : Schéma de principe d'une loi de commande FTC active.

Les méthodes actives sont généralement classifiées en trois sous classes : l'accommodation de défauts, la reconfiguration du système et la restructuration [8] :

- **L'accommodation des défauts** : Dans ce cas, seuls les défauts de faibles amplitudes sont pris en compte. La nouvelle loi de commande est générée par l'adaptation en ligne des paramètres du régulateur. Le système à contrôler reste inchangées.

- **La reconfiguration du système :** elle est utilisée dans le cas où les parties défaillantes ne peuvent pas être accommodées. Elle est caractérisée par la modification de la structure du système de façon à compenser le défaut.
- **La restructuration :** il s'agit de synthétiser une nouvelle loi de commande en modifiant les paramètres du régulateur et la structure du système à commander. Elle est utilisée dans le cas où le problème de commande n'a pas de solution avec l'accommodation et la reconfiguration.

Le grand inconvénient de l'approche active est la limitation du temps disponible pour recalculer la nouvelle loi de commande à chaque instant de détection d'un défaut [7].

I.6. FTC active pour les systèmes non linéaires

Dans le cas d'un modèle non linéaire, de nombreuses techniques de FTC active existent. Nous pouvons citer :

I.6.1. Méthode basée sur banc de régulateurs

Son principe est basé sur l'existence d'un banc de régulateurs pré-calculés pour chaque mode de fonctionnement. Elle est connue aussi sous le nom "commande multi-modèle", ces modèles dérivent toutes les situations possibles du système, où chaque modèle représente un type de défaut. Ainsi, pour chaque modèle, un régulateur est synthétisé.

L'objectif de cette méthode est de synthétiser en ligne la loi de commande à appliquer au système en utilisant une logique de commutation liant les différentes lois de commande issues de chaque régulateur. Ces régulateurs sont pondérés à travers des fonctions d'activation. La combinaison de ces lois de commande permet notamment de synthétiser une loi de commande globale sur le système [8].

I.6.2. Méthode basée sur la commande prédictive

Tout le potentiel de la commande prédictive à résoudre le problème de l'accommodation aux défauts, a été montré par Maciejowki. Cette approche permet de réadapter le correcteur en présence de défauts de manière à garantir la stabilité du système et à maintenir des performances très proches de celles du système nominal. Cependant, la plupart de ces méthodes restent valables sous certaines hypothèses : le modèle des défauts (et leurs effets sur le système) doit être parfaitement connu ; les défauts considérés doivent être

de faible amplitude de telle sorte que les objectifs à atteindre par le système puissent rester inchangés après l'apparition des défauts [9,10].

I.6.3. Méthode basée sur la commande adaptative

Cette approche comprend l'ensemble des techniques utilisées pour l'ajustement automatique en temps réel des régulateurs, afin de maintenir un certain niveau de performances quand des paramètres du procédé à commander sont inconnus et/ou variant dans le temps [7].

Il est remarquable que ce type de méthode ne contienne pas de module de détection des défauts. Par conséquent, un défaut interne apparaît sur le système, il entraîne alors une modification de ses paramètres. L'identification en ligne de ces derniers permet alors la modification des paramètres du correcteur à structure fixe. Dans le domaine de l'aéronautique, ces méthodes ont fait l'objet de beaucoup d'études. Généralement, elles ne font souvent intervenir que des défauts peu sévères et en l'absence de bruit [2].

I.6.4. Méthode basée sur la logique floue

La logique floue a été utilisée pour concevoir des stratégies de commande tolérante aux défauts dans le cadre de systèmes non linéaires. Une technique d'accommodation basée sur une commande floue adaptative permettant l'apprentissage en ligne de nouvelles dynamiques inconnues causées par l'apparition des défauts a été développé.

Les méthodes d'accommodation aux défauts basées sur la logique floue ont été également appliquées à plusieurs systèmes non linéaires, comme par exemple, une chaudière à gaz, un système d'air conditionné, un moteur, une centrale nucléaire, et un avion. Les modèles flous de types Takagi-Sugeno ont été utilisés en FTC à l'aide d'observateurs et de régulateurs Takagi-Sugeno [1].

I.6.5. Méthode basée sur les réseaux de neurones

Les stratégies d'AFTC basées sur les réseaux de neurones, ont aussi reçu une grande attention de la communauté s'intéressant à la commande tolérante aux défauts. Une approche permettant d'estimer le défaut en ligne à l'aide de réseaux de neurones a été développée. Cette estimation sert aux mêmes temps au diagnostic et à l'accommodation aux défauts. L'accommodation est assurée en ajoutant des nouvelles lois l'adaptation en ligne des paramètres du correcteur. Une procédure systématique pour la mise en œuvre d'un algorithme

d'estimation non linéaire a été développée. En se basant sur la théorie de Lyapunov, un schéma d'apprentissage a été également proposé. Cette approche est valable pour une classe particulière de systèmes multivariables non linéaires soumis à des défauts de type biais uniquement, en supposant que tous les états du système soient mesurés de ces dernières [8].

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un rappel des principales de commandes tolérantes aux défauts. Les deux méthodes excitantes de commande tolérante aux défauts ont été rappelées : la commande tolérante aux défauts passive et active. Les méthodes passives sont basées sur les techniques de commande robuste. En revanche, les méthodes actives permettent de traiter des défauts éventuels mais nécessitent une commande reconfigurable et un module de détection et isolation des défauts.

Chapitre II

Commande adaptative floue
et commande par
backstepping

II.1. Introduction

Depuis quelques années, beaucoup de recherche ont été effectuées dans le domaine de la commande des systèmes non-linéaires, la commande adaptative floue et la commande par backstepping font partie de ces nouvelles méthodes.

La commande adaptative est basée sur l'utilisation d'un mécanisme d'adaptation pour la commande des systèmes partiellement connus. Elle a été bien développée depuis les années 70. En pratique, les modèles mathématiques ne pourraient pas être disponibles pour beaucoup des systèmes complexes par conséquent le problème de la commande adaptative de ces systèmes est loin d'être résolu d'une manière satisfaisante. Des systèmes flous basés sur les fonctions floues de base sont employés pour représenter les fonctions non linéaires inconnues des systèmes qui possèdent des variations intrinsèques inconnues [11].

La commande par backstepping est une technique de commande non linéaire robuste, la synthèse d'une telle commande se fait de manière systématique et basée sur l'approche de Lyapunov.

Dans ce chapitre, on présente les concepts de base liés aux systèmes d'approximation flous ainsi que la commande adaptative floue. On abordera aussi la technique de commande par backstepping.

II.2. Approximateurs flous

La logique floue a été introduite en 1965 par L.A Zadeh, ses principes ont été appliqués en 1974 par E.H. Mamdani à la construction d'un premier contrôleur flou. L'intérêt de la logique floue réside dans sa capacité à traiter l'imprécision et l'incertitude. Elle est issue de la capacité de l'homme à décider et agir d'une façon adéquate malgré la nature floue des connaissances disponibles [12].

Elle a connu un succès considérable non seulement dans la modélisation mais aussi dans la commande de systèmes non linéaires. Ce succès revient à sa capacité à traduire une stratégie de contrôle d'un opérateur qualifié en un ensemble de règles linguistiques « si ... alors » facilement interprétables [11].

Des applications utilisant les systèmes flous ont été développées dans des domaines variés : traitement d'images, l'automatisme, la robotique, la gestion de la circulation routière, le contrôle aérien, l'environnement (météorologie, climatologie, sismologie).

II.2.1. Système flou

Le système flou peut être considéré comme un système logique qui utilise des ensembles flous et la structure correspondante pour donner une formulation mathématique afin d'établir des relations entre la sortie du système à son entrée. Cette formulation mathématique est obtenue en décrivant le chemin de cette sortie qui passe à travers trois blocs de base, un fuzzificateur, un mécanisme d'inférence, et un défuzzificateur. La structure de base d'un système flou est donnée par la figure II.1 [13].

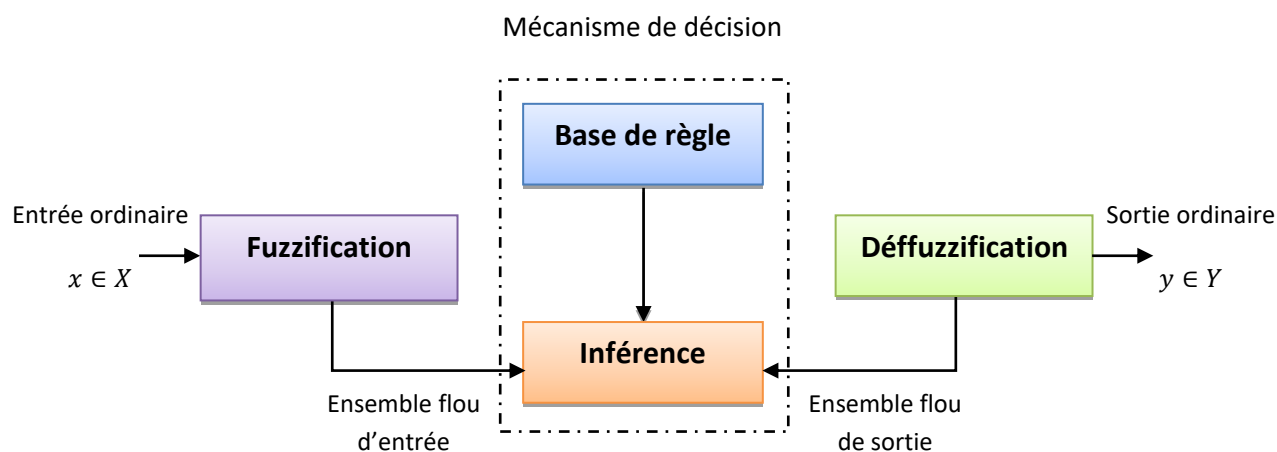


Figure II.1 : Représentation des systèmes flous.

II.2.1.1. Fuzzification

La fuzzification est la projection de la variable physique réelle sur des ensembles flous caractérisant cette variable. Cette opération permet d'avoir une mesure précise sur le degré d'appartenance de la variable d'entrée à chaque ensemble flou [11].

Deux approches de fuzzification sont généralement utilisées : la fuzzification singleton et la fuzzification non singleton.

L'ensemble flou A défini sur l'univers de discours X est un ensemble caractérisé par sa fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ qui fait correspondre à chaque point dans X un nombre réel appartenant à l'intervalle $[0 \ 1]$:

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0 \ 1]$$

II.2.1.2. Base de règles d'un système flou

La base de règles, comprend les connaissances de l'expert humain pour la commande du système (cas de la conception d'un régulateur flou) ou l'identification (approximation des fonctions non linéaires à dynamique complexe) ainsi que le domaine de variation des variables d'entrées/sorties. Ces règles sont exprimées par des règles de la forme « Si-Alors » [5]:

Si prémisse Alors conclusion.

où la prémisse porte sur l'entrée du contrôleur flou et la conclusion sur la sortie. Le nombre des règles flous dépendent, de la partition des univers de discours des variables d'entrée et de sortie.

II.2.1.3. Inférence floue

Le mécanisme d'inférence combine les règles floues pour effectuer une transformation à partir des ensembles flous dans l'espace d'entrée vers des ensembles flous dans l'espace de sortie. Les trois méthodes d'inférence les plus usuelles sont: Max-Min, Max-Produit et Somme-Produit. Néanmoins, la méthode Max-Min est la plus utilisée à cause de sa simplicité.

II.2.1.4. Défuzzification

Elle consiste à transformer l'ensemble flou résultant de l'inférence de différentes règles en une seule valeur numérique représentative de cet ensemble, cette valeur numérique est appliquée pour commander un processus réel. Plusieurs stratégies de défuzzification sont proposées dans la littérature sont [5]:

1. La méthode du centre de gravité.
2. La méthode de la valeur maximum.
3. La méthode de la moyenne des maximums.
4. La méthode de hauteurs pondérées.

La méthode de défuzzification la plus utilisée est celle du centre de gravité qui est donnée par :

$$y' = \frac{\sum_{j=1}^F U_{B'}(y_j) y_j}{\sum_{j=1}^F U_{B'}(y_j)} \quad (\text{II.1})$$

où F est le nombre des éléments y_j dans Y (le domaine continu Y doit être discrétisée pour pouvoir calculer le centre de gravité).

II.2.2. Approximation par les systèmes flous

La classe des systèmes flous, utilisant la fuzzification par singleton, le produit d'inférence et la défuzzification par centre de gravité est la plus utilisée et peut être représentée par [14]:

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l (\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i))}{\sum_{l=1}^M (\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i))} \quad (\text{II.2})$$

où $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ est le vecteur d'entrée, \bar{y} sont les centres des fonctions d'appartenance des conséquences, $\mu_{F_i^l}(x_i)$ est la fonction d'appartenance l'entrée x_i de la $l^{\text{ème}}$ règle, et la conjonction « ET » dans les prémisses, est réalisée par le produit.

Le système flou (II.2) peut être réécrit sous la forme suivante [14] :

$$f(x) = \theta^T \xi(x) \quad (\text{II.3})$$

où $\theta = (\bar{y}^1, \dots, \bar{y}^M)^T$ est un vecteur de paramètres et $\xi(x) = (\xi^1(x), \dots, \xi^M(x))^T$ est un vecteur régressif avec $\xi^l(x)$ comme régresser (appelé aussi fonction floue de base). Alors on définit les fonctions floues de base (FBF) comme [14]:

$$\xi^l(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i)}{\sum_{l=1}^M (\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i))} \quad (\text{II.4})$$

II.3. Commande adaptative

L'origine de la commande adaptative remonte aux années 1950 : les automaticiens se sont vite aperçus en effet qu'un contrôleur avec des paramètres fixes n'était pas toujours capable d'assurer les performances voulues, par exemple dans le cas où les paramètres du système variaient avec le temps [11].

Un contrôleur adaptatif est un régulateur qui peut changer son comportement en réponses aux changements dus aux dynamiques d'un système et aux perturbations. La commande adaptative consiste à éliminer les perturbations structurelles (les variations des paramètres) agissant sur la performance du système de contrôle [12].

II.3.1. Principe de commande adaptative

La commande adaptative est un ensemble de techniques utilisées pour l'ajustement automatique en ligne des paramètres du régulateur afin de réaliser ou de maintenir un certain niveau de performances, quand les paramètres du procédé à commander varient dans le temps ou ne sont pas préalablement connus [15].

En principe, un système de commande adaptative mesure un certain indice de performance (IP) du système à commander à partir de l'écart entre l'indice de performance désiré et l'indice de performance mesuré. Les paramètres du régulateur sont adaptés de manière à poursuivre le système dans son évolution [3].

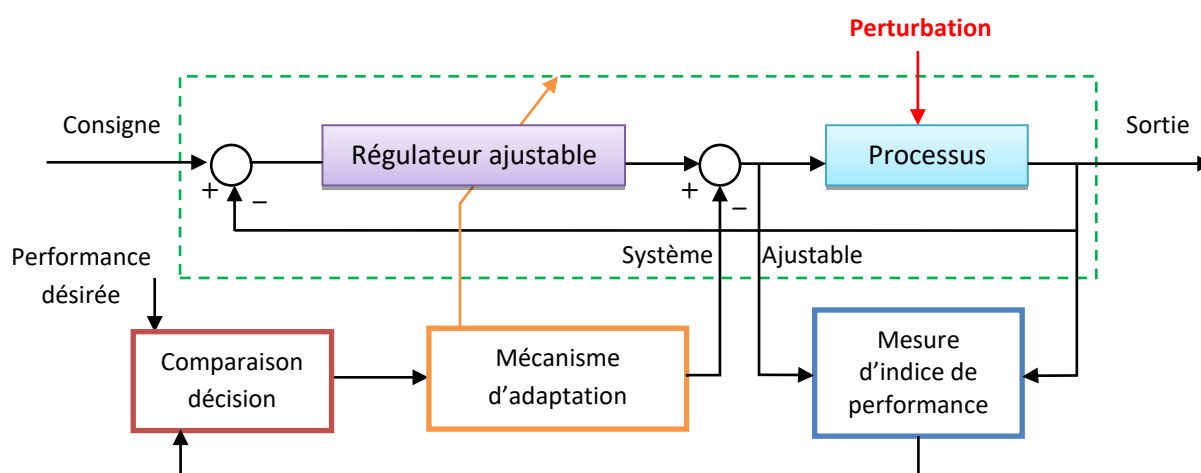


Figure II.2 : Principe des systèmes de commande adaptative.

II.3.2. Différentes techniques de commande adaptative

II.3.2.1. Commande adaptative directe

En utilisant cette commande, les paramètres du régulateur sont ajustés directement et en temps réel, à partir de comparaison entre les performances réelles et les performances désirées ; c'est le cas, en particulier, de la commande adaptative à modèle de référence (MRAC)[12], dont l'objectif est de concevoir un modèle de référence dont les performances correspondent avec ceux du système en boucle fermée, la fonction de la commande est

d'éliminer toute divergence entre la réponse du modèle et celle du système quelque soient le signal d'entrée et les conditions de perturbation (internes et externes) [11].

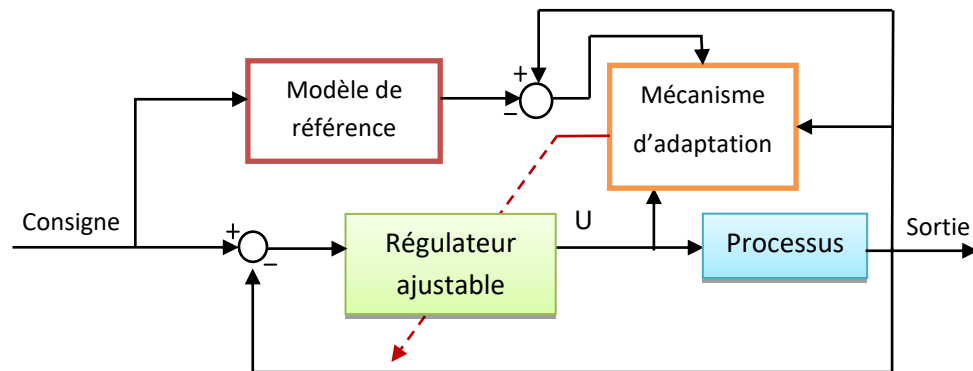


Figure II.3 : Schéma synoptique de la commande adaptative directe d'un processus.

II.3.2.2. Commande adaptative indirecte

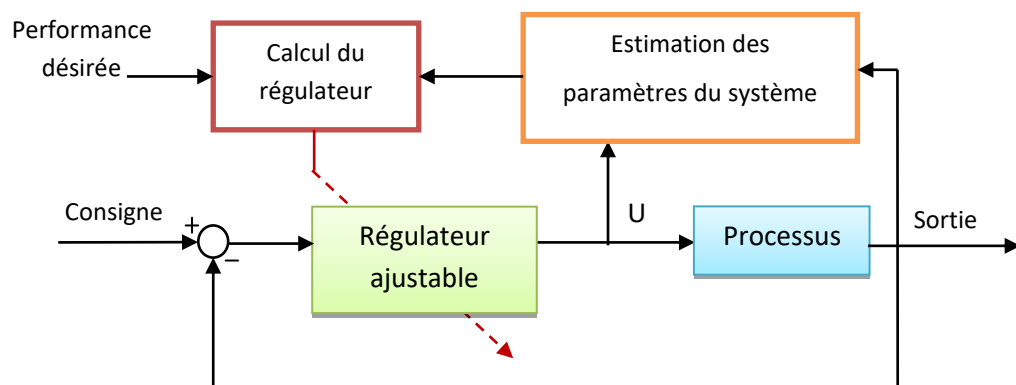


Figure II.4 : Schéma synoptique de la commande adaptative indirecte d'un processus.

Dans la commande adaptative indirecte les paramètres du système réel sont estimés par une procédure d'identification et le régulateur est choisi en supposant que les valeurs estimées du modèle sont les vraies valeurs du système réel, c'est le cas des régulateurs auto-ajustables (STC).

II.3.3. Commande adaptative floue

Le plus souvent, les régulateurs flous sont utilisés dans des systèmes qui possèdent des variations inconnues intrinsèques. La différence principale entre un régulateur adaptatif flou et un régulateur adaptatif conventionnel est que le premier peut prendre en compte des informations linguistiques. Ceci qui est très important lorsque le système possède des incertitudes que l'opérateur humain a appris à anticiper.

Les régulateurs adaptatifs flous sont classés en deux catégories [3] :

II.3.3.1. Commande adaptative floue directe (auto-ajustable)

La loi de commande est directement approximée par un ou plusieurs systèmes adaptatifs flous. La structure de cette commande est montrée sur la figure (II.5).

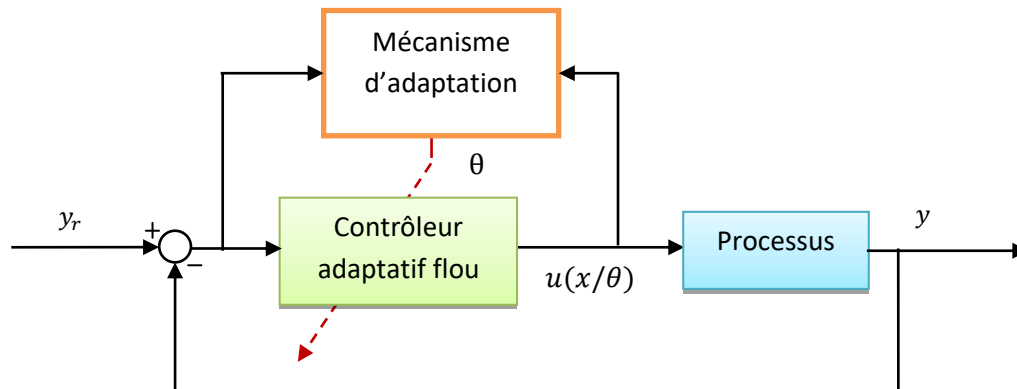


Figure II.5 : Commande adaptative floue directe.

II.3.3.2. Commande adaptative floue indirecte (par modèle de référence MRAC)

Dans cette méthode on approxime d'abord le modèle du processus par des systèmes adaptatifs flous puis on synthétise la loi de commande à partir du modèle approximé. La figure (II.6) montre la structure de la commande adaptative floue indirecte.

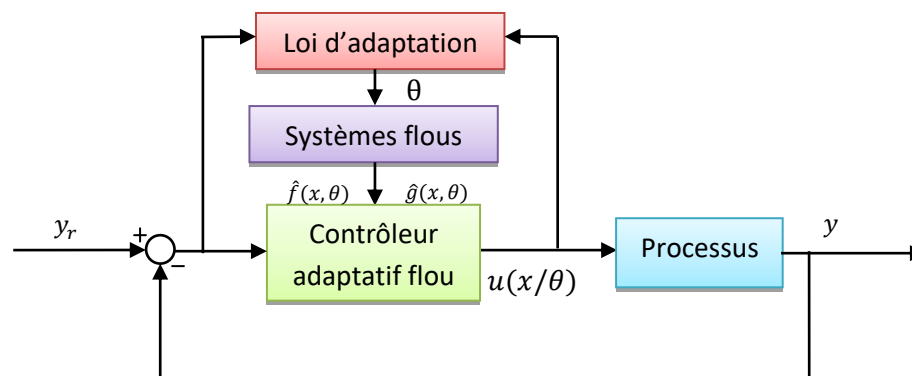


Figure II.6 : Commande adaptative floue indirecte.

II.4. La commande par backstepping

La technique du backstepping a fait son apparition dans les années 1990 par P. Kokotovic. Elle est généralement reconnue plus intéressante que la commande par linéarisation car elle évite le principe d'élimination de non linéarités qui pourraient s'avérer utiles [6].

Cette technique offre une méthode systématique pour effectuer la conception d'un contrôleur pour les systèmes non linéaires, l'idée consiste à calculer une loi de commande afin de garantir pour une certaine fonction (Lyapunov) définie positive que sa dérivée soit toujours négative. L'objectif de cette technique est de synthétiser une loi de commande d'une manière réursive qui garantit la stabilité globale du système [8].

Le backstepping s'applique aux systèmes non linéaires triangulaires (strict feedback systems en anglais).

L'étude de la stabilité des systèmes non linéaire est très complexe. L'approche de Lyapunov est l'approche la plus utilisée pour étudier ce problème. Il existe deux méthodes de Lyapunov pour l'analyse de la stabilité des systèmes non linéaire : La méthode de linéarisation et la méthode directe.

On s'intéresse par la méthode directe de Lyapunov car la commande par backstepping est basée sur cette méthode.

II.4.1. Méthode directe de Lyapunov

L'objectif de la méthode directe de Lyapunov, est de définir une méthode permettant d'analyser la stabilité d'un système sans le résoudre explicitement les solutions des équations différentielles qui le décrivent. La philosophie de cette méthode n'est que l'extension mathématique d'un phénomène physique observé, car les systèmes mécaniques et électriques perdent de l'énergie pour se stabiliser au point d'équilibre.

Théorème de Lyapunov

Soit le système autonome [8]:

$$\dot{x} = f(x), x_e = 0$$

Ce système aura un point d'équilibre $x_e = 0$, globalement asymptotiquement stable s'il existe une fonction scalaire $V(x)$ continue avec une dérivée partielle par rapport au temps $\dot{V}(x)$ continue ayant les propriétés suivantes :

1. $V(0) = 0$,
2. $V(x) > 0, \quad \forall x \neq 0$,
3. $\lim_{|x| \rightarrow \infty} V(x) = \infty$ (radialement non bornée),
4. $\dot{V} < 0 \forall x \neq 0$.

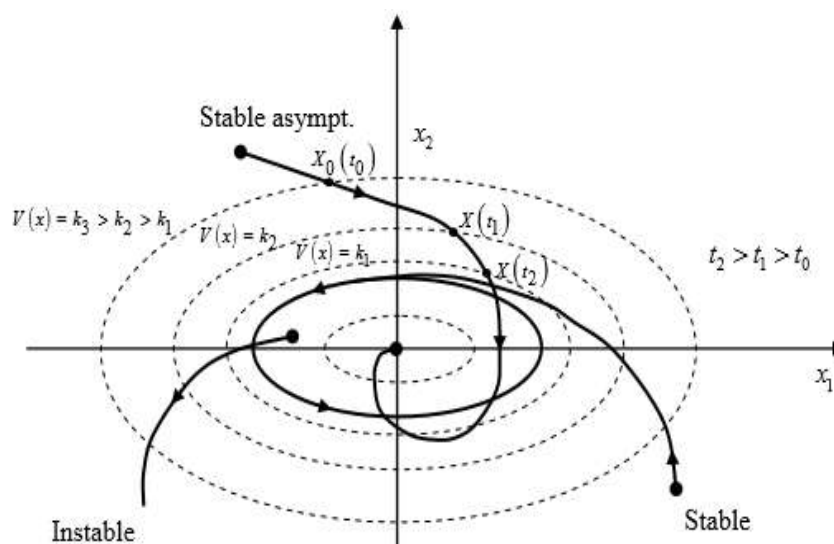


Figure II.7: Interprétation géométrique du théorème de Lyapunov.

II.4.2. Technique de la commande par backstepping

II.4.2.1. Algorithme de base

Afin d'illustrer le principe de la méthode backstepping, on considère le cas des systèmes non linéaires de la forme [8]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 \\ \dot{x}_3 = f_3(x_1, x_2, x_3) + g_3(x_1, x_2, x_3)u \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

où, f_i et g_i ($i=1,2,3$) sont des fonctions non linéaires connues tel que $f_i(0) = 0$ et $g_i(x) \neq 0, \forall (x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3$. Le but de la commande est de faire suivre à la sortie $y = x_1$ le signal de référence y_r , où $y_r, \dot{y}_r, \ddot{y}_r$ et $\ddot{\ddot{y}}_r$ sont supposées connues et uniformément bornées. Le système étant du troisième ordre, le design s'effectue en trois étapes.

Etape 1 :

On considère d'abord le premier sous-système :

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \quad (\text{II.6})$$

La variable d'état x_2 est traitée comme une commande et l'on définit la première valeur désirée :

$$(x_1)_d \triangleq \alpha_0 = y_r \quad (\text{II.7})$$

La première variable d'erreur se définit par :

$$z_1 = x_1 - \alpha_0 \quad (\text{II.8})$$

Sa dérivée est donnée comme suit :

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 - \dot{\alpha}_0 = f_1 + g_1 x_2 - \dot{\alpha}_0 \quad (\text{II.9})$$

Pour un tel système, la fonction quadratique :

$$V(z_1) = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (\text{II.10})$$

Sa dérivée est donnée par :

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1 [f_1 + g_1 x_2 - \dot{\alpha}_0] \quad (\text{II.11})$$

Un choix judicieux de x_2 rendre \dot{V}_1 négative et assure la stabilité de l'origine du sous-système décrit par (II.6), ce choix se donne comme suit :

$$(x_2)_d \triangleq \alpha_1 = \frac{1}{g_1} [-k_1 z_1 - f_1 + \dot{\alpha}_0] \quad (\text{II.12})$$

où $k_1 > 0$ est un paramètre de design.

Par conséquent, l'équation (II.11) devienne :

$$\dot{V}_1 = -k_1 z_1^2 \leq 0 \quad (\text{II.13})$$

Etape 2 :

On considère, dans ce cas, les deux premiers sous-systèmes :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Et on définit la nouvelle variable d'erreur :

$$z_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (\text{II.15})$$

La dynamique des erreurs (z_1, z_2) s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = f_1 + g_1(z_2 + \alpha_1) - \dot{\alpha}_0 \\ \dot{z}_2 = f_2 + g_2 x_3 - \dot{\alpha}_1 \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

Pour lequel on choisit comme fonction de Lyapunov :

$$V_2(z_1, z_2) = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 \quad (\text{II.17})$$

Cette fonction de Lyapunov a pour dérivée :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(z_1, z_2) &= \dot{V}_1 + \frac{1}{2} z_2 \dot{z}_2 \\ &= z_1 [f_1 + g_1(z_2 + \alpha_1) - \dot{\alpha}_0] + z_2 [f_2 + g_2 x_3 - \dot{\alpha}_1] \\ &= -k_1 z_1^2 + z [f_2 + g_1 z_1 + g_2 x_3 - \dot{\alpha}_1] \end{aligned} \quad (\text{II.18})$$

On prend x_3 comme une deuxième commande virtuelle, sa valeur est donné par :

$$(x_3)_d \triangleq \alpha_2 = \frac{1}{g_2} [\dot{\alpha}_1 - g_1 z_1 - f_2 - k_2 z_2] \quad (\text{II.19})$$

où $k_2 > 0$, avec $\dot{\alpha}_1$ calculée analytiquement

$$\dot{\alpha}_1 = \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \dot{y}_r + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \dot{y}_r} \ddot{y}_r \quad (\text{II.20})$$

Un tel choix permet de réduire la dérivée à :

$$\dot{V}_2(z_1, z_2) = -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 \leq 0 \quad (\text{II.21})$$

Etape 3 :

Le système (II.5) est maintenant considéré dans sa globalité. La nouvelle variable d'erreur est :

$$z_3 = x_3 - \alpha_2 \quad (\text{II.22})$$

Ce qui permet d'écrire la dynamique des erreurs (z_1, z_2, z_3) :

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = f_1 + g_1(z_2 + \alpha_1) - \dot{\alpha}_0 \\ \dot{z}_2 = f_2 + g_2 x_3 - \dot{\alpha}_1 \\ \dot{z}_3 = f_3 + g_3 u - \dot{\alpha}_2 \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

On prend comme fonction de Lyapunov :

$$V_3(z_1, z_2, z_3) = V_2 + \frac{1}{2} z_3^2 \quad (\text{II.24})$$

Sa dérivée s'écrit sous la forme :

où :

$$\begin{cases} z_i = x_i - \alpha_{i-1} \\ \varphi_i = \sum_{k=1}^i \left(\frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_k} g_k x_{k+1} + \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial y_r^{(k-1)}} y_r^{(k)} \right) - \omega_i & i = 1, \dots, n \\ \omega_i = f_i - \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_k} f_k \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

Les différentes fonctions de Lyapunov sont données par :

$$V_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^i [x_j - \alpha_{j-1}]^2 \quad (\text{II.32})$$

II.5. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à quelques rappels sur la commande adaptative floue et ses types, directe et indirecte, en exploitant la propriété d'approximation des systèmes flous et la robustesse de la commande par backstepping basé sur la théorie de stabilité de Lyapunov.

Chapitre III

La commande tolérante aux défauts adaptative floue via backstepping

III.1. Introduction

L'objectif principal de la commande tolérante aux défauts est de déterminer une stratégie de commande qui permet d'annuler ou aux moins limiter les effets de défauts sur la stabilité et les performances du système. Plusieurs techniques de commande tolérante aux défauts sont proposées dans la littérature, parmi eux on trouve les techniques de commande adaptative qu'elles sont utilisées pour l'ajustement automatique en temps réel des régulateurs afin de maintenir un certain niveau de performances quand des paramètres du procédé à commander sont inconnus et/ou variant dans le temps [2].

Dans ce chapitre on combine la commande adaptative floue et la méthode de backstepping pour concevoir une structure de commande stable et robuste tolérante aux défauts d'actionneurs pour une classe de systèmes non linéaires incertains. Après une formulation du problème, nous allons utiliser les systèmes flous pour apprendre en ligne les nouvelles dynamiques inconnues causées par l'apparition des défauts ainsi l'approximation des fonctions inconnues concernant le système non linéaire étudié, et on intègre les lois d'adaptation pour ajuster les paramètres de contrôleur, ensuite on ajoute une loi de commande robuste type H_∞ pour atténuer les effets des erreurs d'approximation et les incertitudes dues aux perturbations. La recherche de la loi de commande globale et l'étude de la stabilité sont obtenues en appliquant la méthode de backstepping qui est une procédure récursive basée sur la théorie de Lyapunov.

Nous allons montrer d'une manière constructive la procédure de développement d'un contrôleur tolérant aux défauts permettant au système d'atteindre les objectifs désirés. La performance des lois de commande développées, sera mise en évidence à travers un exemple d'application.

III.2. Problématique

On considère une classe des systèmes non linéaires d'ordre n SISO, décrite par l'équation suivante [16] :

$$\begin{cases} \dot{x}_i = f_i(\bar{x}_i) + g_i(\bar{x}_i)x_{i+1} + d_i(\bar{x}_n, t) & i = 1, 2, 3, \dots, n-1 \\ \dot{x}_n = f_n(\bar{x}_n) + g_n(\bar{x}_n)(u(t) + \beta(t - T_d)\phi(\bar{x}_n)) + d_n(\bar{x}_n, t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

où x est le vecteur d'état de ce système, $u(t)$ est l'entrée de commande, y est la sortie du système, f_i et g_i sont des fonctions non linéaires lisses inconnues et d_i est une perturbation externe. La fonction inconnue ϑ représente le changement dans le système due à l'apparition de défaut à $t = T_d$. On définit la fonction d'activation $\beta(t - T_d)$ comme suit :

$$\beta(t - T_d) = \begin{cases} 0 & t \leq T_d \\ 1 & t \geq T_d \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Supposition 1

Le gain de commande $g_i(x)$ est différent de zéro pour tout x et de signe connu. Il existe des constants g_{i0} et g_{i1} tel que $\forall \bar{x}_i \in \Omega \subset R^i$, $g_{i1} \geq g_i(\cdot) \geq g_{i0}$.

Supposition 2

Il existe des constants g_{id} tel que $\forall \bar{x}_i \in \Omega \subset R^i$, $|\dot{g}_i(\cdot)| \leq g_{id}$.

Supposition 3

Soit $F(x)$ est une fonction continue inconnue définie sur un ensemble compact borné Ω_x , on l'approxime par les systèmes floues, de la forme :

$$\hat{F}(x, \theta) = \theta^T \xi(x) \quad \forall x \in \Omega_x$$

avec θ est un vecteur de paramètre ajustable, $\xi(x)$ est des un vecteur de fonctions floues de base supposé convenablement fixe en avance par l'utilisateur. La fonction $F(x)$ peut être exprimée en fonction des approximations floues de la manière suivante:

$$F(x, \theta) = \hat{F}(x, \theta^*) + \varepsilon(x) \quad (\text{III.3})$$

Avec $\varepsilon(x)$ représente l'erreur d'approximation floue, θ^* est le paramètre optimal de θ minimisant l'erreur d'approximation $|\varepsilon(x)|$. Ce paramètre optimal satisfait :

$$\theta^* = \arg \min_{\theta \in R^P} \left\{ \sup_{x \in \Omega} |F(x) - \hat{F}(x, \theta)| \right\}$$

Supposition 4

Il existe un paramètre inconnu $\varphi_i^* \geq 0$ et une fonction positive lisse inconnue $\rho_i(x_1 \dots x_i)$ tel que : $|d(\bar{x}_n, t)| \leq \varphi_i^* \rho_i(x_1, \dots, x_i)$ pour $\forall \bar{x}_n \in \Omega \subset R^n$ et $t \in R^+$.

La commande tolérante aux défauts est synthétisée comme suit [16]:

$$u = \begin{cases} u_n(x) & t < T_d \\ u_n(x) + u_f(x) & t \geq T_d \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

- (i) Sous les conditions normales de fonctionnement ($t < T_d$) une commande directe nominale $u_n(x)$ est synthétisée pour garantir la stabilité globale de système et que tous les signaux et les états sont globalement bornés.
- (ii) Après la détection de défaut ($t \geq T_d$), la commande nominale est reconfigurée $u_f(x)$ de telle sorte qu'elle compense l'effet de défaut, cette commande doit forcer la sortie y du système à suivre le signal de référence y_r .

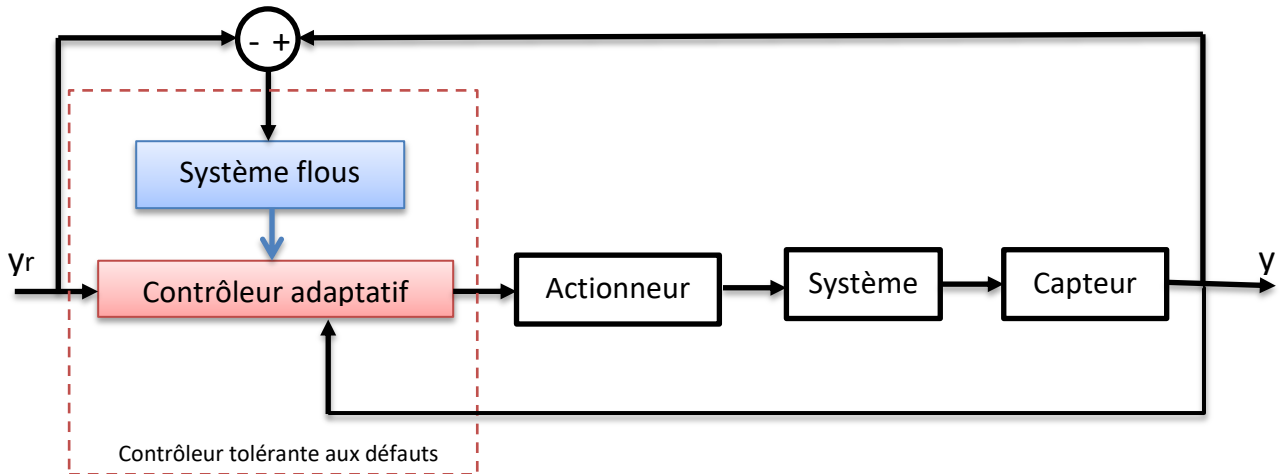


Figure III.1 : Principe de la commande tolérante aux défauts par la commande adaptative floue.

III.3. Synthèse de la loi de commande

La procédure de conception passe par n étapes. Dans chaque étape, une fonction de la commande virtuelle α_i devrait être développée en utilisant une fonction de Lyapunov V_i . Les étapes de conception détaillées pour le système (III.1) sont décrites comme suit [16]:

Etape 1 :

Pour l'équation : $\dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 + d_1(\bar{x}_n, t)$

On définit la variable de l'erreur z_1 comme :

$$z_1 = y - y_r = x_1 - x_{d1}$$

Prenant x_2 comme une commande virtuelle, on définit α_1 la fonction stabilisante de sous-système 1.

$$\dot{z}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 + d_1(\bar{x}_n, t) - \dot{x}_{d1}$$

En mettant $\Lambda_1 = d_1(\bar{x}_n, t)$, selon la supposition 4 on a : $|\Lambda_1| \leq \bar{\varphi}_1^* \bar{p}_1$, où $\bar{\varphi}_1^* = \varphi_1^*$ et $\bar{p}_1 = p_1$ on définit :

$$z_2 = x_2 - \alpha_1$$

Si les fonctions $f_1(x_1)$ et $g_1(x_1)$ sont inconnues et $d_1(\bar{x}_n, t) = 0$, il existe une commande linéarisante de rétroaction (*feedback control*):

$$\alpha_1^* = -k_1 z_1 - \frac{1}{g_1(x_1)} (f_1(x_1) - \dot{x}_{d1}) \quad (\text{III.5})$$

où $k_1 > 0$ est le gain de commande de rétroaction.

Comme les fonctions $f_1(x_1)$ et $g_1(x_1)$ sont inconnues et lisses, la commande désirée α_1^* ne peut pas être mis en pratique, de (III.5) on considère $\frac{1}{g_1(x_1)} (f_1(x_1) - \dot{x}_{d1})$ comme une fonction lisse de x_1 , on définit:

$$h_1(x_1) = \frac{1}{g_1(x_1)} (f_1(x_1) - \dot{x}_{d1}) \quad (\text{III.6})$$

Selon la supposition 3, on peut utiliser les systèmes flous pour approximer $h_1(x_1)$:

$$h_1(x_1) = \theta_1^{*T} \xi_1(x_1) + \varepsilon_{11}(x_1), \quad |\varepsilon_{11}(x_1)| \leq \varepsilon_{11}^*$$

$$\alpha_1^* = -k_1 z_1 - \theta_1^{*T} \xi_1(x_1) - \varepsilon_{11}(x_1)$$

où ε_{11}^* est une constante positive, pour traiter le problème des erreurs d'approximation, on ajoute le terme de robustification à la loi de commande équivalente, alors la commande virtuelle est définie comme suit :

$$\alpha_1 = -k_1 z_1 - \theta_1^T \xi_1(x_1) - \rho_1(x_1, \varphi_1) \quad (\text{III.7})$$

où θ_1 est l'estimation de θ_1^* et $\rho_1(x_1, \varphi_1)$ est un terme continu robuste qui peut être exprimé comme :

$$\begin{aligned} \rho_1(x_1, \varphi_1) &= \varphi_1(t) \frac{\bar{p}_1(x_1)}{g_{i0}} \tanh \left[z_1 \frac{\bar{p}_1(x_1)}{g_{i0} \varepsilon_{12}} \right] \\ \dot{\varphi}_1(t) &= \gamma_1 \left[z_1 \frac{\bar{p}_1(x_1)}{g_{i0}} \tanh \left[z_1 \frac{\bar{p}_1(x_1)}{g_{i0} \varepsilon_{12}} \right] - \sigma_{12} (\varphi_1 - \varphi_1^0) \right] \end{aligned} \quad (\text{III.8})$$

où $\varepsilon_{12}, \gamma_1, \sigma_{12}, \varphi_1^0$ sont des paramètres positifs choisis par le concepteur.

On obtient :

$$\dot{z}_1 = g_1 \left[z_2 - k_1 z_1 - \tilde{\theta}_1^T \xi_1(x_1) + \varepsilon_{11} - \rho_1(x_1, \varphi_1) \right] + \Lambda_1 \quad (\text{III.9})$$

où $\tilde{\theta}_1 = \theta_1 - \theta_1^*$ est le vecteur d'erreur d'estimation paramétrique.

Choisissons une fonction de Lyapunov pour le sous-système 1 comme :

$$V_1 = \frac{1}{2g_1(x_1)} z_1^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_1^T \Gamma_1^{-1} \tilde{\theta}_1 + \frac{1}{2\gamma_1} \chi_1^2$$

où $\Gamma_{11} = \Gamma_{11}^T > 0$ est une matrice de gain adaptative,

$$\chi_1(t) = (\varphi_1(t) - \varphi_1^M(t)) \text{ et } \varphi_1^M(t) = \max\{\varphi_1^*, \varphi_1^0\}$$

Alors :

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & z_1 z_2 - k_1 z_1^2 - \tilde{\theta}_1^T \xi_1(x_1) z_1 + z_1 \varepsilon_{11}(x_1) - z_1 \rho_1(x_1, \varphi_1) + \frac{z_1}{g_1} \Lambda_1 - \frac{\dot{g}_1}{2g_1^2} z_1^2 + \\ & \tilde{\theta}_1^T \Gamma_1^{-1} \dot{\theta}_1 + \chi_1 \left[z_1 \frac{\bar{p}_1(x_1)}{g_{i0}} \tanh \left[z_1 \frac{\bar{p}_1(x_1)}{g_{i0} \varepsilon_{12}} \right] - \sigma_{12} (\varphi_1 - \varphi_1^0) \right] \end{aligned} \quad (\text{III.10})$$

En mettant $k_1 = k_{10} + k_{11}$ on a :

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & z_1 z_2 - \left(k_{10} + \frac{\dot{g}_1}{2g_1^2} \right) z_1^2 - k_{11} z_1^2 + z_1 \varepsilon_{11} - \sigma_{11} \tilde{\theta}_1^T \theta_1 - \chi_1 \sigma_{12} (\varphi_1 - \varphi_1^0) \\ & - \varphi_1^M z_1 \frac{\bar{p}_1(x_1)}{g_{i0}} \tanh \left[z_1 \frac{\bar{p}_1(x_1)}{g_{i0} \varepsilon_{12}} \right] + \frac{z_1}{g_1} \Lambda_1 \end{aligned} \quad (\text{III.11})$$

On choisit la loi d'adaptation comme :

$$\dot{\theta}_1 = \Gamma_1 (z_1 \xi_1(x) - \sigma_{11} (\theta_1 - \theta_1^0)) \quad (\text{III.12})$$

Il est noté que :

$$\begin{aligned} -\chi_1 \sigma_{12} (\varphi_1 - \varphi_1^0) &= -\frac{\sigma_{12}}{2} \chi_1^2 - \frac{\sigma_{12}}{2} (\varphi_1 - \varphi_1^0)^2 + \frac{\sigma_{12}}{2} (\varphi_1^M - \varphi_1^0)^2 \\ -k_{11} z_1^2 + z_1 \varepsilon_{11} &\leq -k_{11} z_1^2 + z_1 |\varepsilon_{11}| \leq \frac{\varepsilon_{11}^2}{4 k_{11}} \leq \frac{\varepsilon_1^{*2}}{4 k_{11}} \end{aligned}$$

$$-\sigma_{11} \tilde{\theta}_1^T \theta_1 = -\sigma_{11} \frac{\|\tilde{\theta}_1\|^2}{2} - \sigma_{11} \frac{\|\theta_1 - \theta_1^0\|^2}{2} + \sigma_{11} \frac{\|\theta_1^* - \theta_1^0\|^2}{2}$$

$$0 \leq |x| - x \tanh\left(\frac{x}{\varepsilon_{12}}\right) \leq 0.2785 \varepsilon_{12}, \forall \varepsilon_{12} > 0, x \in R$$

$$-\left(k_{10} + \frac{\dot{g}_1}{2g_1^2}\right) z_1^2 \leq -\left(k_{10} + \frac{g_{1d}}{2g_{10}^2}\right) z_1^2$$

$$k_{10}^* = k_{10} + \frac{g_{1d}}{2g_{10}^2} > 0$$

on obtient :

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 \leq z_1 z_2 - k_{10}^* z_1^2 + \frac{\varepsilon_1^{*2}}{4k_{11}} - \sigma_{11} \frac{\|\tilde{\theta}_1\|^2}{2} + \sigma_{11} \frac{\|\theta_1^* - \theta_1^0\|^2}{2} - \frac{\sigma_{12}}{2} \chi_1^2 + \frac{\sigma_{12}}{2} (\varphi_1^M - \varphi_1^0)^2 \\ + 0.2785 \varphi_1^M \varepsilon_{12} \end{aligned} \quad (\text{III.13})$$

d'où la stabilité du premier sous-système.

Etape i : ($2 \leq i \leq n - 1$) soit : $z_i = x_i - \alpha_i$, on a :

$$\dot{z}_i = f_i(\bar{x}_i) + g_i(\bar{x}_i) x_{i+1} + d_i(\bar{x}_n, t) - \dot{\alpha}_{i-1}$$

Prenant x_2 comme une commande virtuelle, on définit α_i la fonction stabilisante de sous-système (z_1, z_2, \dots, z_n) . on a :

$$\Lambda_i = d_i(\bar{x}_n, t) - \sum_{l=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_i}{\partial x_l} d_l(\bar{x}_n, t)$$

Ainsi il existe $\bar{\varphi}_1^*$ et \bar{p}_1 , tel que $|\Lambda_1| \leq \bar{\varphi}_1^* \bar{p}_1$.

Choissant une commande de rétroaction (*feedback control*):

$$\alpha_i^* = -z_{i-1} - k_i z_i - \frac{1}{g_i(\bar{x}_i)} (f_i(\bar{x}_i) - \dot{\alpha}_{i-1})$$

où :

$$\dot{\alpha}_{i-1} = \sum_{l=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_l} (f_l(\bar{x}_l) + g_l(\bar{x}_l) \bar{x}_{l+1}) + \varphi_{i-1} + \sum_{l=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_l} d_l(\bar{x}_n, t) \quad (\text{III.14})$$

$$\varphi_{i-1} = \sum_{l=1}^{i-1} \left[\frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_d} \dot{x}_d + \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial \theta_l^T} \dot{\theta}_l + \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial \varphi_l} \psi_l \right] \quad (\text{III.15})$$

$$h_i(\bar{x}_i) = \frac{1}{g(\bar{x}_i)} (f(\bar{x}_i) - \sum_{k=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_k} (f_k(\bar{x}_k) + g_k(\bar{x}_k)x_{k+1}) - \varphi_{i-1}) \quad (\text{III.16})$$

On peut utiliser les systèmes flous pour approximer $h_i(\bar{x}_i)$:

$$h_i(\bar{x}_i) = \theta_i^{*T} \xi_i(x_i) + \varepsilon_{i1}(\bar{x}_i), \quad |\varepsilon_{i1}(x_i)| \leq \varepsilon_{i1}^*$$

où ε_{i1}^* est un constant positif. Donc on a :

$$\alpha_i^* = -z_{i-1} - k_i z_i - \theta_i^{*T} \xi_i(x_i) - \varepsilon_{i1}(\bar{x}_i) \quad (\text{III.17})$$

On choisit une commande virtuelle :

$$\alpha_i = -z_{i-1} - k_i z_i - \theta_i^{*T} \xi_i(\bar{x}_i) - \rho_i(\bar{x}_i, \varphi_1, \dots, \varphi_i)$$

où θ_i est l'estimation de θ_i^* et $\rho_i(x_i, \varphi_i)$ est un terme continue robuste qui peut être exprimé comme :

$$\rho_i(\bar{x}_i, \varphi_1, \dots, \varphi_i) = \varphi_i(t) \frac{\bar{p}_i(\bar{x}_i)}{g_{i0}} \tanh \left[z_i \frac{\bar{p}_i(x_i)}{g_{i0} \varepsilon_{i2}} \right] \quad (\text{III.18})$$

$$\dot{\varphi}_i(t) = \gamma_i \left[z_i \frac{\bar{p}_i(x_i)}{g_{i0}} \tanh \left[z_i \frac{\bar{p}_i(x_i)}{g_{i0}} \right] - \sigma_{i2} (\varphi_i - \varphi_i^0) \right] \quad (\text{III.19})$$

où $\varepsilon_{i2}, \gamma_i, \sigma_{i2}, \varphi_i^0$ sont des paramètres positifs choisis par le concepteur.

On obtient :

$$\dot{z}_i = g_i \left[-z_{i-1} + z_{i+1} - k_i z_i - \tilde{\theta}_i^T \xi_i(x_i) + \varepsilon_{i1} - \rho_i(\bar{x}_i, \varphi_1, \dots, \varphi_i) \right] + \Lambda_i \quad (\text{III.20})$$

où $\tilde{\theta}_i = \theta_i - \theta_i^*$ est le vecteur d'erreur d'estimation paramétrique.

Choisisant une fonction de Lyapunov suivante [16]:

$$V_i = V_{i-1} + \frac{1}{2g_i(\bar{x}_i)} z_i^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_i^T \Gamma_i^{-1} \tilde{\theta}_i + \frac{1}{2\gamma_i} \chi_i^2$$

où $\Gamma_{i1} = \Gamma_{i1}^T > 0$ est une matrice de gain adaptative,

$$\chi_i(t) = (\varphi_i(t) - \varphi_i^M(t))$$

$$\varphi_i^M(t) = \max\{\varphi_i^*, \varphi_i^0\}$$

On choisit la loi d'adaptation comme :

$$\dot{\theta}_i = \Gamma_i(z_i \xi_i(\bar{x}_i) - \sigma_{i1}(\theta_i - \theta_i^0)) \quad (\text{III.21})$$

on obtient alors :

$$\begin{aligned} \dot{V}_i \leq & z_i z_{i+1} - \sum_{l=1}^i k_{l0}^* z_l^2 + \sum_{l=1}^i \frac{\varepsilon_l^{*2}}{4k_{l1}} + \sum_{l=1}^i \left(\sigma_{l1} \frac{\|\theta_l^*\|^2}{2} - \sigma_{l1} \frac{\|\bar{\theta}_l - \theta_l^0\|^2}{2} \right) - \sum_{l=1}^i \left(\frac{\sigma_{l2}}{2} \chi_l^2 - \right. \\ & \left. \frac{\sigma_{l2}}{2} (\varphi_l^M - \varphi_l^0)^2 \right) + \sum_{l=1}^i 0.2785 \varphi_l^M \varepsilon_{l2} \end{aligned} \quad (\text{III.22})$$

Etape n : Soit $z_n = x_n - \alpha_{n-1}$, on a :

$$\dot{z}_n = f_n(\bar{x}_n) + g_n(\bar{x}_n)(u + \beta_n(t - T)\phi(x_n)) + d_i(\bar{x}_n, t) - \dot{\alpha}_{n-1} \quad (\text{III.23})$$

On a: $\Lambda_n = d_n(\bar{x}_n, t) - \sum_{l=1}^{n-1} \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial x_l} d_l(\bar{x}_n, t)$, Il existe $\bar{\varphi}_n^*$, \bar{p}_n tel que $|\Lambda_n| \leq \bar{\varphi}_n^* \bar{p}_n$.

$$h_n(\bar{x}_n) = \frac{1}{g_n(\bar{x}_n)} (f_n(\bar{x}_n) - \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial x_k} (f_k(\bar{x}_k) + g_k(\bar{x}_k)x_{k+1}) - \varphi_{n-1})$$

en utilisant l'approximation floue :

$$h_n(\bar{x}_n) = \theta_n^{*T} \xi_n(x_n) + \varepsilon_{n1}(\bar{x}_n)$$

où $|\varepsilon_{n1}(x_n)| \leq \varepsilon_{n1}^*$ et ε_{n1}^* est un constant positif.

En l'absence de défauts dans le système, i.e., $\beta_n(t - T_d) = 0$, dans ce cas la commande est :

$$u_n(\bar{x}_n) = -z_{n-1} - k_n z_n - \theta_n^{*T} \xi_n(\bar{x}_n) - \rho_n(\bar{x}_n, \varphi_1, \dots, \varphi_n) \quad (\text{III.24})$$

Si un défaut se produit, i.e., $\beta_n(t - T_d) = 1$, la commande devient :

$$u_n(\bar{x}_n) = u_n(\bar{x}_n) + u_f(\theta|\bar{x}_n) \quad (\text{III.25})$$

où $u_f(\theta|\bar{x}_n)$ est un système flou utilisé pour approximer la fonction $-\phi(\bar{x}_n)$.

On obtient :

$$\dot{z}_n = f_n(\bar{x}_n) + g_n(\bar{x}_n)(u + \beta_n(t - T_d)\phi(x_n)) + d_i(\bar{x}_n, t) - \dot{\alpha}_{n-1}$$

$$\begin{aligned} \dot{z}_n = & g_n(\bar{x}_n) \left(-z_{n-1} - k_n z_n - \tilde{\theta}_n^{*T} \xi_n(\bar{x}_n) + \varepsilon_{n1} - \theta_n^{*T} \xi_n(\bar{x}_n) + \theta_n^{*T} + \omega_n + \bar{\omega}_n - \rho_n \right) \\ & + \Lambda_n \end{aligned}$$

$$\dot{z}_n = g_n(\bar{x}_n) \left(-z_{n-1} - k_n z_n - \tilde{\theta}_n^{*T} \xi_n(\bar{x}_n) + \varepsilon_{n1} - \tilde{\theta}_n^{*T} \xi_n(\bar{x}_n) + \omega_n + \bar{\omega}_n - \rho_n \right) + \Lambda_n$$

$$\omega_n = \phi(\bar{x}_n) - \theta_n^T \xi_n(\bar{x}_n)$$

$$\tilde{\theta}_n^T = \theta_n^{*T} - \theta_n^T$$

$$\bar{\omega}_n = \phi(\bar{x}_n) - \theta_n^{*T} \xi_n(\bar{x}_n)$$

Nous considérons la fonction globale de Lyapunov comme :

$$V = V_{n-1} + \frac{1}{2g_n(\bar{x}_{n-1})} z_n^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_n^T \Gamma_{n1}^{-1} \tilde{\theta}_n + \frac{1}{2\gamma_n} \chi_n^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_n^T \Gamma_{n2}^{-1} \tilde{\theta}_n \quad (\text{III.26})$$

où $\Gamma_{n1} = \Gamma_{n1}^T > 0$ est une matrice de gain adaptatif,

$$\chi_n(t) = (\varphi_n(t) - \varphi_n^M(t))$$

$$\varphi_n^M(t) = \max\{\varphi_n^*, \varphi_n^0\}$$

On choisit les lois d'adaptation suivantes [16]:

$$\dot{\theta}_n = \Gamma_{n2}(z_n \xi_n(\bar{x}_n) - \sigma_{n1}(\theta_n - \theta_n^0))$$

$$\dot{\tilde{\theta}}_n = \Gamma_{n2}(z_n \xi_n(\bar{x}_n) - \sigma_{n2} \tilde{\theta}_n) \quad (\text{III.27})$$

La dérivée de V est :

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\sum_{l=1}^n k_{l0}^* z_l^2 + \sum_{l=1}^n \frac{\omega^U}{4k_{l1}} + \sum_{l=1}^n \left(-\sigma_{l1} \frac{\|\tilde{\theta}_l\|^2}{2} + \sigma_{l1} \frac{\|\theta_l^* - \theta_l^0\|^2}{2} \right) - \sum_{l=1}^i \left(\frac{\sigma_{l2}}{2} \chi_l^2 + \right. \\ & \left. \frac{\sigma_{l2}}{2} (\varphi_l^M - \varphi_l^0)^2 \right) + \sum_{l=1}^n 0.2785 \varphi_l^M \varepsilon_{l2} + \sigma_{n2} \frac{\|\theta_n^*\|^2}{2} - \sigma_{n2} \frac{\|\tilde{\theta}_n\|^2}{2} \end{aligned} \quad (\text{III.28})$$

$$-\sigma_{n2} \tilde{\theta}_n^T \theta_n = -\sigma_{n2} \tilde{\theta}_n^T (\theta_n^* + \tilde{\theta}_n)$$

$$\leq \sigma_{n2} \|\tilde{\theta}_n\| \|\theta_n^*\| - \sigma_{n2} \|\tilde{\theta}_n\|^2$$

$$\leq \frac{\sigma_{n2} \|\theta_n^*\|^2}{2} - \frac{\sigma_{n2} \|\tilde{\theta}_n\|^2}{2}$$

On met : $\varepsilon_{n1} + \omega_n + \bar{\omega}_n = \omega^U$, on a :

$$-k_{n1} z_n^2 + z_n (\varepsilon_{n1} + \omega_n + \bar{\omega}_n) \leq -k_{n1} z_n^2 + z_n |\omega^U| \leq \frac{\omega^U}{4k_{n1}}$$

$$-(k_{n0} + \frac{\dot{g}_n(\bar{x}_n)}{2g_n^2(\bar{x}_n)})z_n^2 \leq -(k_{n0} + \frac{g_{nd}}{2g_{n0}^2})z_n^2$$

$$k_{n0}^* = k_{n0} - \frac{g_{nd}}{2g_{n0}^2} > 0$$

On choisit :

$$\eta = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\omega^U}{4k_{l1}} + \sigma_{l1} \frac{\|\theta_l^* - \theta_l^0\|^2}{2} + \frac{\sigma_{l2}}{2} (\varphi_l^M - \varphi_l^0)^2 + 0.2785\varphi_l^M \varepsilon_{l2} \right) + \sigma_{n2} \frac{\|\theta_n^*\|^2}{2}$$

$$k_{l0}^* > \frac{\mu}{2g_{l0}}, l = 1, 2, \dots, n$$

où μ est une constant positive.

Avec le choix de $\sigma_{l1}, \sigma_{n2}, \Gamma_{l1}, \Gamma_{l2}$ tel que : $\sigma_{l1} \geq \mu \lambda_{\max}\{\Gamma_{l1}^{-1}\}, \sigma_{n2} \geq \mu \lambda_{\max}\{\Gamma_{n2}^{-1}\}$ et $\sigma_{n2} \geq \frac{\mu}{\gamma_l}, l = 1, 2, \dots, n$, nous obtenons :

$$\dot{V} \leq - \left(\left(\sum_{l=1}^n k_{l0}^* z_l^2 + \sigma_{l1} \frac{\|\tilde{\theta}_l\|^2}{2} + \frac{\sigma_{l2}}{2} \chi_l^2 \right) + \sigma_{n2} \frac{\|\tilde{\theta}_n\|^2}{2} \right) + \eta$$

$$\dot{V} \leq - \left(\sum_{l=1}^n \frac{\mu}{2g_{l0}} z_l^2 + \sum_{l=1}^n \frac{\mu \tilde{\theta}_l^T \Gamma_{l1}^{-1} \tilde{\theta}_l}{2} + \frac{\mu}{2\gamma_l} \chi_l^2 + \frac{\mu \tilde{\theta}_n^T \Gamma_{n2}^{-1} \tilde{\theta}_n}{2} \right) + \eta \quad (\text{III.29})$$

$$\dot{V} = -\mu V + \eta \leq 0$$

Théorème: Considérons le système (III.1) et le signal de référence $y_r(t)$. Supposons que les hypothèses [1-4] Sont satisfaites, la loi de commande définie par (III.25) avec les lois d'adaptation(III.12), (III.21), (III.27), garantit les propriétés suivantes [16]:

- tous les signaux de système sont bornés.
- l'erreur de poursuite et ses dérivées convergent vers zéro, $z_1 = y(t) - y_r(t) \rightarrow 0$ quand $t \rightarrow \infty$.

III.4. Simulation et Résultats

Considérons le système non linéaire suivant [16]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_1 e^{-0.5x_1} + x_2 + 0.6 \sin(x_2) \\ \dot{x}_2 = x_1 x_2^2 + (3 + \cos(x_1 x_2))(u + 30x_1) + \sin(x_2) \\ y = x_1 \end{cases}$$

où x_1 et x_2 sont les états, y est la sortie du système et $y_r = \sin(t)$ est la référence.

Notre objectif est de forcer la sortie du système à suivre la trajectoire de référence. On choisit les fonctions d'appartenance comme [16]:

$$\mu_{F_1^l}(x_1) = \exp\left[-\frac{(x_1 + 0.l)^2}{4}\right] * \exp\left[-\frac{(x_2 + 0.l)^2}{4}\right]$$

$$\mu_{F_2^l}(x_1) = \exp\left[-\frac{(x_1 + 0.ll)^2}{4}\right] * \exp\left[-\frac{(x_2 + 0.ll)^2}{4}\right]$$

Avec : $l = 1, \dots, 5$.

À $T_d = 10s$ un défaut se produit, la fonction de défaut est $\phi(\bar{x}_2) = 30 x_1$, le système flou $u_f(\theta|\bar{x}_n)$ est construit afin d'approximer la fonction $-\phi(\bar{x}_n)$.

$$u_n(\bar{x}_n) = -z_{n-1} - k_n z_n - \theta_n^{*T} \xi_n(\bar{x}_n) - \rho_n$$

$$u_n(\bar{x}_n) = u_n(\bar{x}_n) + u_f(\theta|\bar{x}_n)$$

Les paramètres de conception du contrôleur proposé et les lois d'adaptations sont choisis comme suit :

$$\sigma_{11} = \sigma_{12} = \sigma_{21} = \sigma_{22} = 0.2, k_1 = 30, k_2 = 1.5, k_3 = 10, \gamma_1 = 200, \gamma_2 = 200,$$

$$g_{10} = g_{10} = 1, \bar{p}_1 = 1, \bar{p}_2 = x_1^2 + x_2^2,$$

$$\dot{\varphi}_1 = \gamma_1 [z_1 \tanh[z_1] - \sigma_{12} (\varphi_1 - \varphi_1^0)], \dot{\varphi}_2 = \gamma_2 [z_2 \bar{p}_2 \tanh[z_2 \bar{p}_2] - \sigma_{22} (\varphi_2 - \varphi_2^0)],$$

$$\varphi_1^0 = \varphi_1^0 = 0.01$$

Le terme continu robuste est décrit par :

$$\rho_1 = \varphi_1(t) \tanh[z_1], \rho_2 = \varphi_2(t) \bar{p}_2 \tanh\left[\frac{z_2 \bar{p}_2}{\varepsilon_{22}}\right]$$

Avec les conditions initiales :

$$\theta(0) = [0; 0; 0; 0; 0], \theta(10) = [-0.6; 0.9; 0.6; 0.8; 0.2; 0; 0.7; 0.7; 0.5; 0.2]$$

$$\varphi_1(0) = \varphi_2(0) = 0.1; \varphi_1(10) = \varphi_2(10) = 0.2$$

- **Cas 1 : Sans accommodation des défauts**

Les résultats de simulation pour ce cas sont illustrés sur les figures (III.2-III.5), les figures (III.2), (III.3), (III. 4) et (III.5) présentent l'évolution de la sortie du système $y(t)$ avec sa référence, les paramètres d'adaptation, l'erreur de poursuite et le signal de commande, respectivement sans accommodation des défauts.

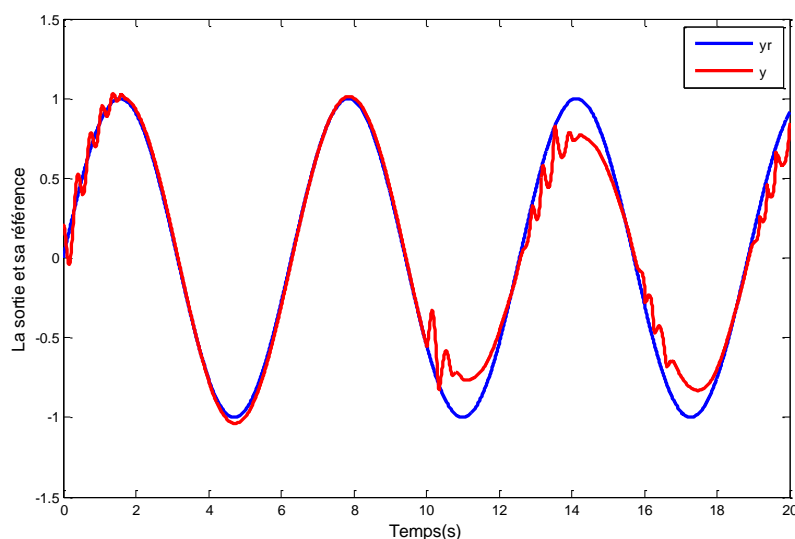


Figure III.2 : Evolution du signal de sortie et sa référence.

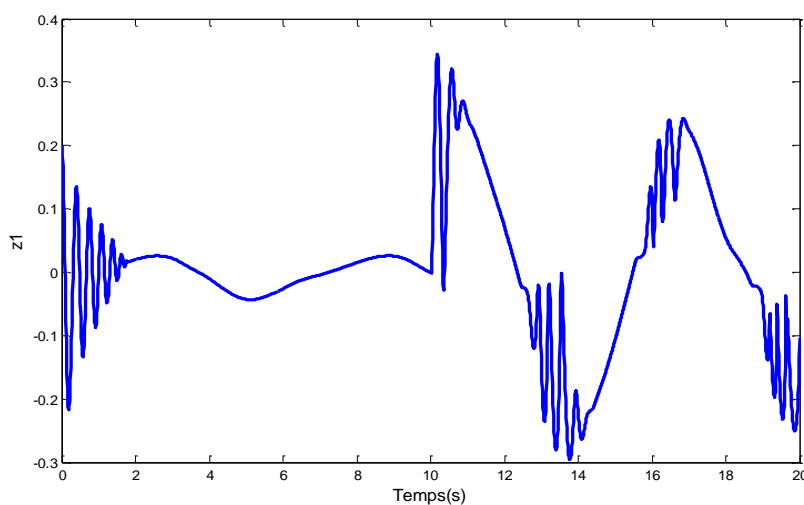


Figure III.3: Evolution de l'erreur $z_1 = y - y_r$

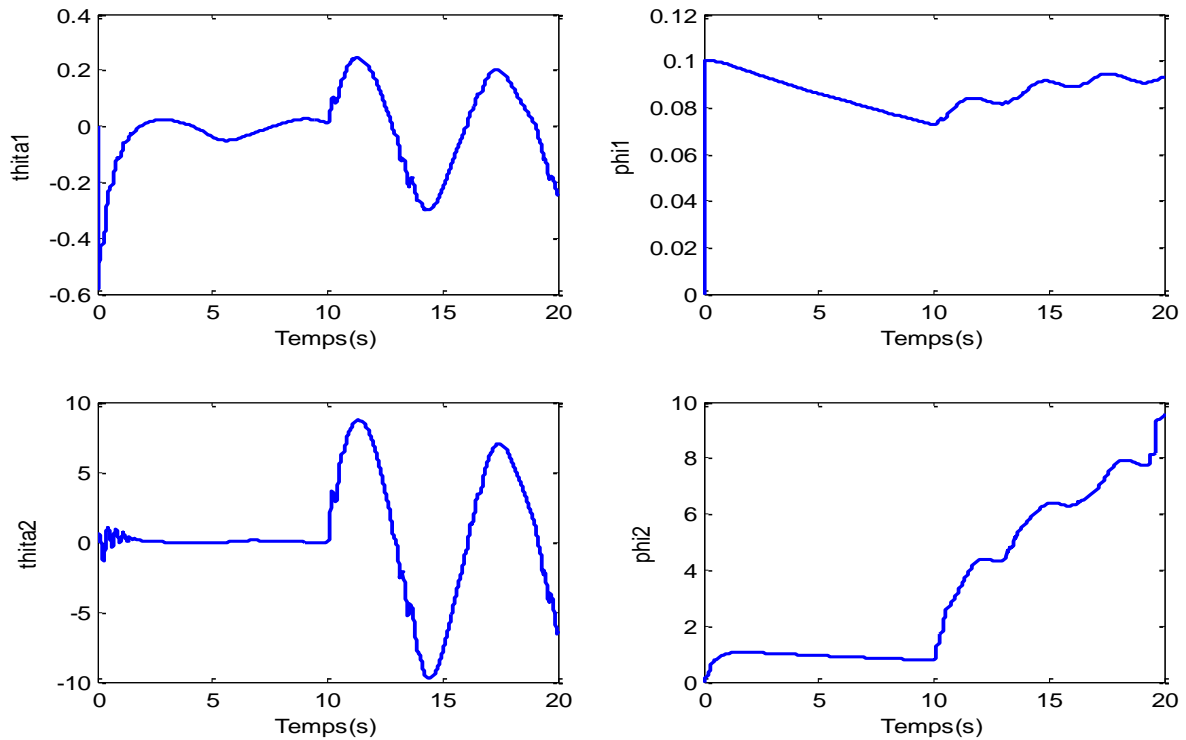


Figure III.4 : Evolution des lois d'adaptations.

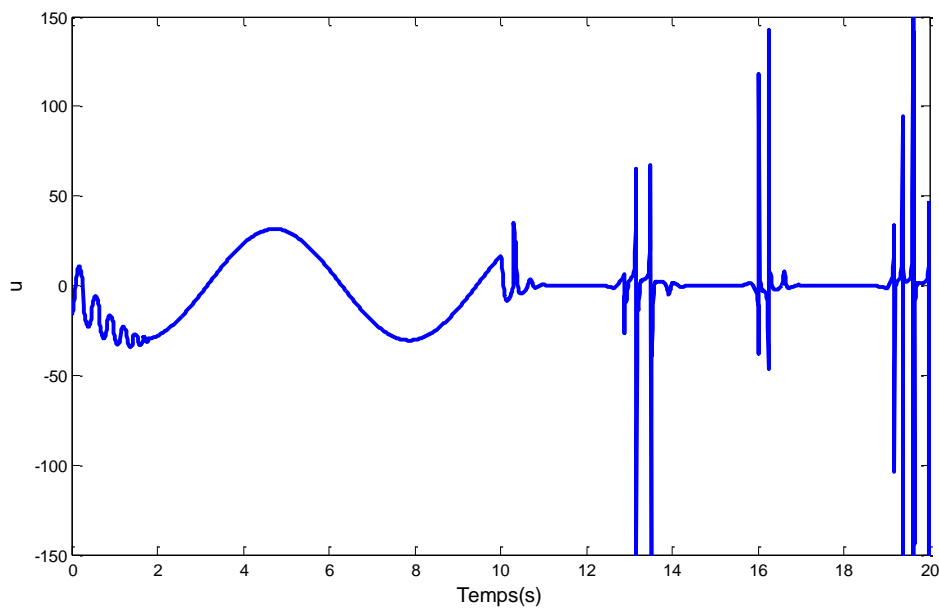


Figure III.5 : Evolution du signal de la commande.

D'après les figures présentées ci-dessus, on remarque bien que la technique de commande (III.24) appliquée dans ce test rend le système incapable de suivre sa référence après l'apparition de défauts à $t=10s$.

- **Cas 2 : Avec accommodation des défauts**

Les résultats de simulation pour ce cas sont illustrés sur les figures (III.6-III.9), les figures (III.6), (III.7), (III. 8) et (III.9) présentent l'évolution de la sortie du système $y(t)$ avec sa référence, les paramètres d'adaptation, l'erreur de poursuite et le signal de commande, respectivement avec l'accommodation des défauts.

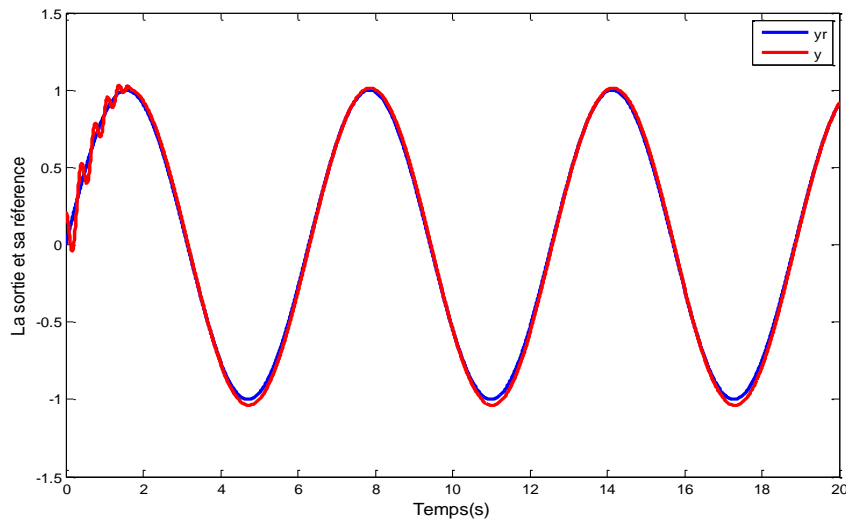


Figure III.6: Evolution du signal de sortie et sa référence.

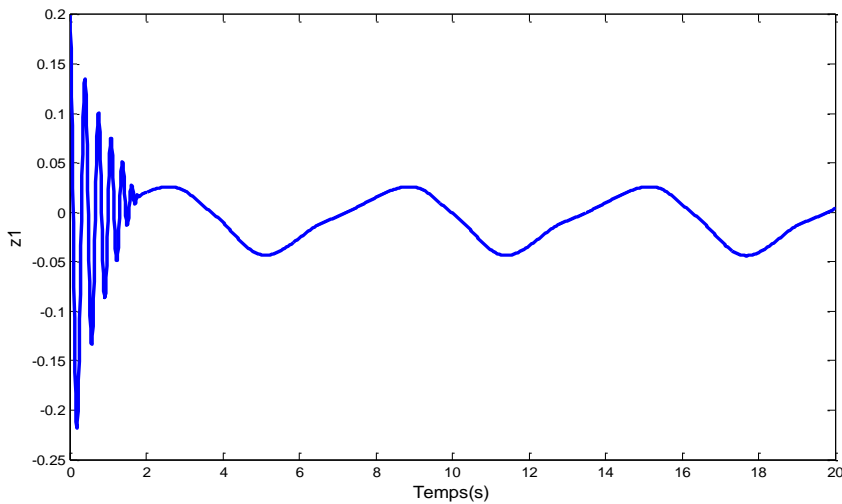


Figure III.7 : Evolution de l'erreur $z_1 = y - y_r$

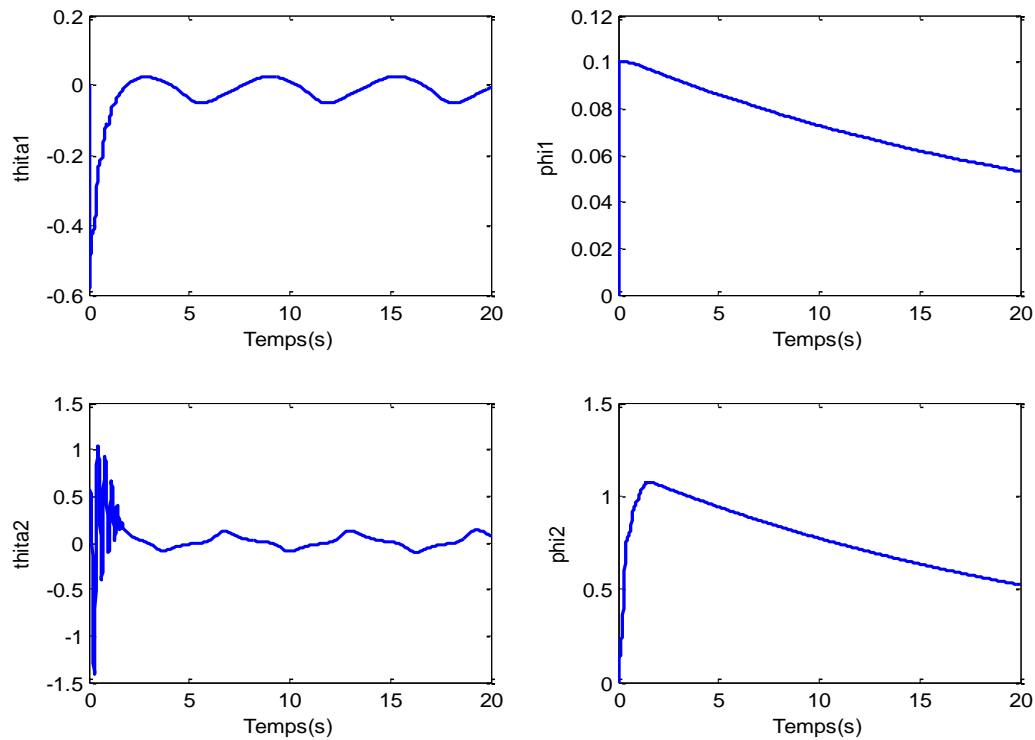


Figure III.8 : Evolution des lois d'adaptations.

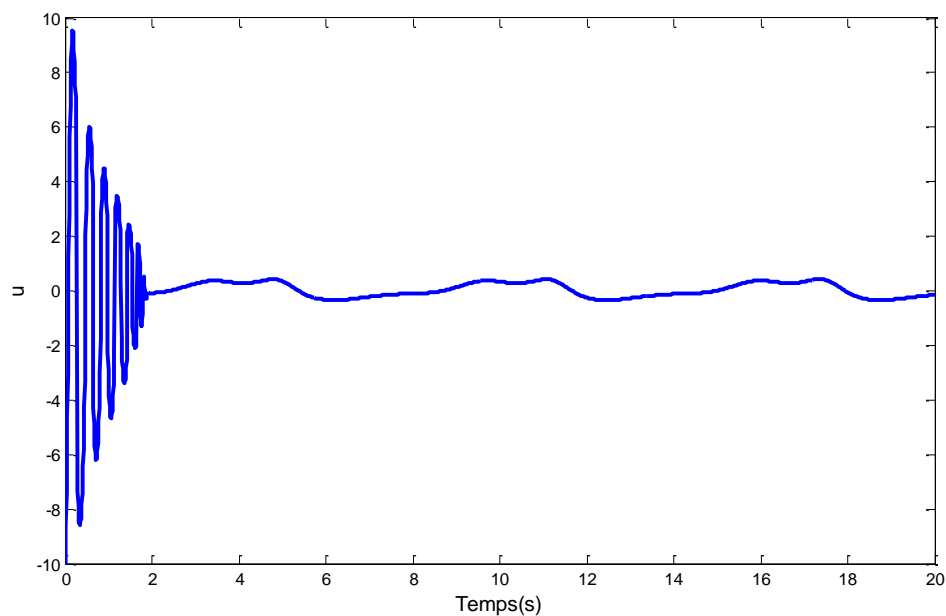


Figure III.9 : Evolution du signal de la commande.

D'après les figures présentées ci-dessus, on remarque que les trajectoires réelles convergent vers les trajectoires désirées même après l'occurrence de défauts d'actionneurs, et on voit bien aussi l'efficacité de les lois de commande proposé (III.25), qui est la somme

de deux termes, un terme de commande dite adaptative qui sert à pallier les problèmes de non linéarités, et l'autre terme dite de robustesse est évoqué pour contourner le problème des erreurs d'approximations.

Nous pouvons conclure que l'approche de commande tolérante aux défauts proposée garantit que :

- tous les signaux et la commande u sont globalement bornés.
- l'erreur de poursuite du système converge vers un petit voisinage de l'origine.

Il est à noter qu'un choix judicieux des valeurs des gains des sous-systèmes permet d'améliorer les performances du système.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté une approche de commande tolérante aux défauts via le backstepping en utilisant la technique de commande floue adaptative pour une classe de systèmes non linéaires incertains monovariables dont une technique a été étudiée et appliquée, cette approche sert en même temps au diagnostic et à l'accommodation aux défauts.

Nous avons utilisé un système d'inférence flou, dans la première partie, et une loi d'adaptation paramétrique basée sur la synthèse de Lyapunov dans la deuxième partie. Le type de défaut que nous avons considéré dans la simulation effectuée est celui des actionneurs et l'effet de ce défaut ont été modélisés par une augmentation dans les signaux de commande.

En combinant la commande adaptative floue et la technique de conception de Backstepping, une approche de commande tolérante aux défauts adaptative floue robuste a été développée et la stabilité du système en boucle fermée, la convergence de l'erreur de poursuite sont rigoureusement prouvées en utilisant la théorie de Lyapunov.

Conclusion générale

Le travail effectué dans ce mémoire concerne le développement d'une stratégie de commande tolérante aux défauts pour les systèmes non linéaires incertains monovariables via la technique de backstepping. Cette stratégie utilise la méthode de la commande adaptative et les systèmes d'approximation flous.

Le but de la commande tolérante aux défauts (FTC) est de s'accommoder automatiquement de l'effet des défauts tout en étant capable de maintenir la stabilité et au mieux les performances nominaux du système.

On distingue deux types de commande tolérante aux défauts : une approche passive et une approche voie active qui nécessite un module de diagnostic.

Après un bref état de l'art sur la commande tolérante aux défauts, avec la citation de différents travaux de recherche effectués dans ce domaine, nous avons présenté les techniques de commande utilisés : la commande adaptative et la commande par backstepping ajustés par deux techniques non linéaires (la logique floue et la méthode de Lyapunov). Enfin nous avons proposé une commande FTC active pour les systèmes non linéaire incertains monovariables, la dynamique inconnue du système étudiée due à l'apparition du défaut est approximée par des systèmes flous, les lois d'adaptation permettent d'assurer l'ajustement en ligne des paramètres de régulateur. La loi de commande globale est construite récursivement utilisant la technique de backstepping basant sur la synthèse de Lyapunov qui permet d'étudier la stabilité globale du système. L'ajout d'un terme de commande robuste est nécessaire afin d'éliminer les incertitudes due aux perturbations externes et les erreurs d'approximation.

Les résultats de simulation ont montré une grande efficacité de l'approche FTC développé vis-à-vis des défauts actionneurs. Cet approche préserve les performances du système et garantit la stabilité et la poursuite.

Les résultats obtenus dans ce mémoire, nous a permet de proposer comme perspective, une étude basée sur des algorithmes d'optimisations pour la détermination des différents paramètres et gains de la loi de commande.

Références bibliographiques

- [1] M. Oudghiri, "Commande multi-modèles tolérante aux défauts : Application au contrôle de la dynamique d'un véhicule automobile", Thèse de Doctorat, L'université De Picardie Jules Verne ,2008.
- [2] M. Achbi, "Commande tolérante aux défauts en utilisant les réseaux de neurones artificiels et les systèmes d'inférence floue", Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider Biskra ,2012.
- [3] S. Graidia, "Commande adaptative floue type-2 par mode glissant des systèmes chaotiques", Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2012.
- [4] A. El Ougli, "Intégration des techniques floues à la synthèse de contrôleurs adaptatifs", Thèse de Doctorat, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès ,2009.
- [5] Doudou Sofiane, "Contribution à la commande moderne des systèmes non linéaires multivariables non affines", Thèse de Doctorat, Université Sétif 1, 2013.
- [6] F. Daikh, "Contribution des approches de l'intelligence artificielle pour la stabilisation robuste des systèmes non linéaires", Thèse de Doctorat, Université d'Oran1 A.Ben Bella, 2015.
- [7] A. Bouguerra, "Commande Tolérante aux Défauts d'un Appareil à Vol Vertical", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf De M'sila ,2015.
- [8] H.Khebbache, "Tolérance aux défauts via la méthode backstepping des systèmes non linéaires", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas De Sétif ,2012.
- [9] N.Belkhrichi, "Contribution à l'étude du diagnostic et de la commande tolérante aux fautes par l'approche structurelle – application aux procédés biologiques", Thèse de Doctorat, L'université De Toulouse, 2011.
- [10] H. Jamouli, "Génération de résidus directionnels pour le diagnostic des systèmes linéaires stochastiques et la commande tolérante aux défauts", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré Nancy 1, 2003.

- [11] T. Amieur, "Commande des Systèmes Non Linéaires par Mode Glissant Flou", Mémoire de Master , Université Mohamed Khider – Biskra,2009.
- [12] Kh. Khettab, "Commande Adaptative Floue Des Systèmes Non Linéaires Par La Méthode De Backstepping Utilisant Le Mode Glissant", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif 1,2005.
- [13] A.Bounemour, "Commande Adaptative Floue Des Systèmes Non Linéaires", Mémoire de Magister, Université Constantine 1, 2014.
- [14] F. Khaber, A. Hamzaoui, "Commande Adaptative Floue Pour Les Systemes Non Lineaires Incertains", Courrier du Savoir – N°02, pp. 35-40 , Juin 2002.
- [15] V. Lacrose, "Réduction de la complexité des contrôleurs flous : Application à la commande multivariable", Thèse de Doctorat, Université de Toulouse- France, 1997.
- [16] Shaocheng Tong and Lijie Ren, "Fuzzy adaptive robust fault-tolerant control for SISO uncertain nonlinear systems via backstepping", *2008 Chinese Control and Decision Conference*, Yantai, Shandong, 2008, pp. 2644-2649.

Commande Tolérante aux Défauts Adaptative Floue pour les Systèmes Non Linéaires Incertains SISO via Backstepping

Résumé: Dans ce travail, nous développons une approche de commande tolérante aux défauts adaptative floue via la méthode backstepping pour une classe des systèmes non linéaires incertains, permettant de s'accommoder automatiquement l'effet des défauts qui peuvent apparaître sur un système tout en étant capable de maintenir le fonctionnement nominal.

Après un état de l'art sur les systèmes FTC, on a exposé les fondements théoriques de deux techniques de commande : la commande adaptative floue et la commande par backstepping. En combinant ces techniques un contrôleur tolérant aux défauts stable et robuste est synthétisé et la stabilité du système en boucle fermée, la convergence de l'erreur de poursuite sont rigoureusement prouvées utilisant la théorie de Lyapunov. Afin de tester les performances de cette méthode, on effectue un exemple de simulation.

Mots Clés : Systèmes non linéaires, Commande tolérante aux défauts, Backstepping, Commande Adaptative Floue, Stabilité.

التحكم المتحمل للخلل المتأقلم الغامض لقسم من الأنظمة اللاخطية غير الدقيقة أحادية المدخل و المخرج عن طريق الرجوع المرحلي

ملخص : الهدف من هذا العمل هو تقديم منهج في التحكم المتأقلم الغامض المتحمل للخلل عن طريق الرجوع المرحلي بالنسبة لقسم من الأنظمة اللاخطية غير الدقيقة أحادية المدخل و المخرج الذي يسمح بالتصحيح التلقائي لأثر الخلل الذي من الممكن أن يتعرض لنظام ما و القدرة على المحافظة على سير عمله المعين.

بعد تقديم حالة فنية على أنظمة التحكم المتحملة للخلل استعرضنا الأسس النظرية لتقنيتين في التحكم : التحكم المتأقلم الغامض والتحكم عن طريق الرجوع المرحلي . بدمج كلا التقنيتين قمنا بتطوير متحكم متحمل للخلل مستقر و متين ، تمت البرهنة على كل من استقرار النظام في الحلقة المغلقة و تقارب خطأ التتبع باستخدام نظرية ليابونوف، للتأكد من كفاءة هذا المنهج تم تطبيق المحاكاة العددية لمثال.

كلمات مفتاحية : الأنظمة اللا خطية، التحكم المتحمل للخلل ، الرجوع المرحلي، التحكم المتأقلم الغامض،استقرار .

Fuzzy Adaptive Fault-Tolerant Control for SISO Uncertain Non Linear Systems via Backstepping

Abstract: In this work, we have developed an adaptive fuzzy fault tolerant control approach for a class of uncertain nonlinear systems, which can be accommodated to compensate the effect of the fault on the system and also to ensure the nominal performances.

After a state of the art for FTC systems, we exposed the theoretical basis of two control techniques: fuzzy adaptive control and backstepping control. Combining these techniques, a robust fuzzy adaptive fault controller is synthesized and the closed-loop stability of the system and the convergence of the error of tracking are rigorously proved using Lyapunov theory and illustrated based on a simulation example.

Key words : Nonlinear systems, Fault Tolerant Control, Backstepping, Adaptive Fuzzy Control, Stability.