

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**UNIVERSITE HADJ LAKHDAR BATNA**

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE INDUSTRIEL

**THESE**

présentée pour obtenir le titre de diplôme de  
DOCTEUR en SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE BATNA

Discipline / Spécialité : Génie Industriel/Génie industriel

Par

**BENBRAHIM Meriem**

Magister en Génie Industriel- Université de Batna

**Thème**

*Un environnement évolutif d'aide au diagnostic  
et à la conduite des systèmes industriels*

Soutenue le 27/04/2014 devant le jury composé de:

ABDESSEMED Rachid	Prof, Université de Batna	Président
BETTA Ammar	MCA, Université de Batna	Rapporteur
ESSOUNBOULI Najib	Prof, Univ- Reims IUT Troyes	Co-rapporteur
HAMZAQUI Abdelaziz	Prof, Univ- Reims IUT Troyes	Examineur
TITAOUINE Abdennacer	Prof, Université de Biskra	Examineur
MOUSS Mohamed Djamel	Prof, Université de Batna	Examineur
CHAFAA Kheireddine	MCA, Université de Batna	Invité

*Dédicace*

*A la mémoire de mes chers parents et frère,*

*à ma famille.*

# Remerciements

**A**vant tout, je suis contente d'être libre d'écrire ce que je veux, sans être dirigée, la seule direction appartient au bon sens de dire les choses.

Ce travail de recherche n'aurait jamais pu voir le jour qu'en collaboration avec des scientifiques qui ont cru et croient en moi. Alors, je tiens à exprimer ma profonde et sincère gratitude à toute personne qui a contribué à sa réalisation.

**L**e travail présenté dans cette Thèse a été effectué dans sa majorité en collaboration avec l'Université de Reims Champagne Ardenne (URCA) au niveau du laboratoire du Centre de Recherche en Sciences et Techniques de l'Information et de la Communication (CReSTIC) à l'IUT de TROYES.

**J**e remercie Monsieur Abdelaziz HAMZAOUI Professeur des Universités en tant que directeur de l'IUT de Troyes et responsable de l'équipe troyenne du groupe Auto du CReSTIC, pour m'avoir accueillie dans son établissement.

**M**es sincères remerciements vont directement aux rapporteur et co-rapporteur, Messieurs Ammar BETTA Maître de Conférences à l'Université de Batna de m'avoir donnée l'opportunité et la chance de découvrir un domaine de recherche passionnant et Najib ESSOUNBOULI Professeur des Universités, responsable du pôle de recherche de l'IUT de Troyes que je ne peux assez remercier pour sa patience, sa bienveillance, sa présence continue pour les lectures attentives aux différentes étapes de la réalisation de ce travail et ses précieux conseils, en m'apprenant comment appréhender la science avec amour en me poussant à ne jamais baisser les bras lorsqu'un problème me bloquait, qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour m'avoir soutenue et encouragée dans les moments les plus difficiles. Merci pour toutes les heures de travail qu'on a passées ensemble.

**J**e remercie mon sauveur en informatique, Monsieur Adelhamid Dekhinet, Maître Assistant à l'Université de Batna pour son aide durant toutes ces années.

**J**e tiens à exprimer mes vifs remerciements à Monsieur Nouredine Bouguechal, Professeur à l'université de Batna pour son aide, ses encouragements et son soutien moral dans des moments très difficiles.

**J'**exprime mes vifs remerciements à ma famille, mes amis et à tous ceux qui par un simple mot, sourire ou un geste, m'ont aidée à surmonter la pente tout au long de la réalisation de cette Thèse.

**J'**adresse mes remerciements aux membres de jury pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail et de porter leur critique objective et instructive remplie d'expérience.

**Je** suis honorée par la présence de Messieurs, Rachid ABDESSEMED, Professeur à l'Université de Batna d'avoir accepté de présider ce jury, Abdelaziz. HAMZAOUI, Professeur des Universités à l'Université de Reims, IUT de Troyes et Abd Ennacer TITAOUINE, Professeur à l'Université de Biskra, d'avoir accepté d'examiner ce travail. Je remercie également Monsieur Mohamed Djamel MOUSS, Professeur à l'Université de Batna pour avoir accepté d'examiner ce travail. Je ne peux m'empêcher d'exprimer mes remerciements à Monsieur Kheireddine CHAFAA, Maître de Conférences à l'Université de Batna, d'être parmi ce jury.

**Je** ne saurais terminer sans porter un remerciement particulier à des amis que j'ai perdus de vue suite à des circonstances et à ceux qui m'ont soutenue pendant mon séjour en France, je voudrais ici leur témoigner ma gratitude.

**Merci.**

*La règle d'or de la conduite est  
la tolérance mutuelle, car nous ne  
penserons jamais tous de la même  
façon, nous ne verrons qu'une  
partie de la vérité et sous des  
angles différents.*

*Gandhi*

# Table des matières

## Table des matières

Remerciements .....	2
Table des matières .....	5
Liste des figures .....	7
Liste des tableaux .....	9
Notations et abreviations .....	10
Avant-propos .....	11
Introduction Générale.....	13
Organisation du manuscrit .....	15
Chapitre 1. Diagnostic des systèmes industriels: Terminologie et outils.....	17
1. Introduction .....	17
2. Qu'est-ce qu'un diagnostic ?.....	18
3. Terminologie et définitions .....	19
4. Système de diagnostic .....	21
5. Diagnostic et tolérance aux défauts.....	22
5.1 Diagnostic de défauts .....	22
5.2. Principe de diagnostic de défauts .....	23
5.3. Procédure de diagnostic .....	23
5.4. Classification de défauts.....	24
5.5. Structure de la technique de diagnostic.....	28
6- Diagnostic des systèmes industriels.....	30
6.1. Intérêts du diagnostic des systèmes industriels.....	30
6.2. Évaluation des performances de la commande .....	31
7. Problème de diagnostic .....	31
7.1. Formulation du problème de diagnostic des systèmes .....	31
8. Classification des méthodes de diagnostic des systèmes dynamiques .....	33
8.1. Méthodes internes (diagnostic à approches internes).....	34
8.2. Méthodes externes (diagnostic à approches externes) .....	36
8.3. Méthodes inductive et déductive (méthodes cause- effets).....	36
9. Dilemme commande-diagnostic.....	36
10. Caractérisation de la démarche de diagnostic .....	37
10.1. Détection des défauts .....	37
10.2. Localisation de défaut .....	41
10.3. Identification de défaut.....	41
10.4. Prise de décision.....	41
10.5. Validation des résultats .....	42
11. Conclusion.....	42
Chapitre 2. Généralités sur la logique floue et les modes glissants .....	43
1. Introduction .....	43
2. Généralités sur la logique floue.....	44
3. Concepts de base de la logique floue .....	44
3.1. Variables linguistiques et ensembles flous.....	45
3.2. Généralités sur la logique floue type-1 .....	46
3.3. Généralités sur la logique floue type-2 .....	49
4. Commande adaptative floue type-1.....	53
4.1. Généralités.....	53

4.2. Commande adaptative floue directe .....	56
4.3. Commande adaptative floue indirecte.....	58
4.4. Exemple de simulation .....	61
5. Commande par modes glissants .....	68
5.1. Mise en œuvre d'une commande par modes glissants .....	68
5.2. Formulation du problème d'une commande par modes glissants .....	68
6. Conclusion.....	72
Chapitre 3. Approches dédiées au diagnostic des systèmes industriels .....	74
1. Introduction .....	74
2. Tolérance aux défauts des systèmes évolutifs.....	75
3. Classification de défauts et leurs modélisations.....	75
3.1. Définition d'un défaut .....	75
3.2. Modélisation de défauts .....	76
3.3. Exemple de modélisation de défauts .....	76
3.4. Evaluation des performances d'un système .....	78
4. Etat de l'art sur la commande tolérante aux défauts .....	80
4.1. Principe de la tolérance aux défauts.....	82
4.2. Paramètres de performances d'un système tolérant aux défauts.....	82
5. Commande tolérante aux défauts des systèmes industriels.....	83
6. Classification de la commande tolérante aux défauts .....	84
6.1. Approche passive .....	85
6.2. Approche active avec reconfiguration.....	86
6.3. Approche active avec accommodation.....	90
7. Commande adaptative floue tolérante aux défauts .....	90
8. Conclusion.....	92
Chapitre 4. Commande adaptative floue tolérante aux défauts.....	93
1 Introduction .....	93
1 <sup>ère</sup> Approche: Commande adaptative floue directe robuste .....	95
1. Formulation du problème .....	95
2. Système flou .....	96
3. Commande par modes glissants .....	97
4. Synthèse de la loi de commande proposée.....	98
5. Exemple de simulation .....	100
6. Conclusion.....	103
2 <sup>ème</sup> Approche: Commande adaptative floue directe robuste.....	105
1. Description du problème .....	105
2. Synthèse de l'approche proposée .....	109
3. Exemple de simulation .....	112
4. Conclusion.....	113
3 <sup>ème</sup> Approche: Commande adaptative floue robuste indirecte.....	115
1. Description du problème .....	115
2. Conception de la commande tolérante aux défauts.....	116
3. Mise en œuvre de l'approche proposée.....	118
4. Exemple de simulation .....	121
5. Conclusion.....	125
Conclusion générale .....	126
1. Bilan de point de vue méthodologie.....	126
2. De point de vue contributions .....	127
Perspectives.....	127
Références bibliographiques .....	128

## Liste des figures

Figure 1. 1: Diagnostic d'ordre général d'un système.	18
Figure 1. 2: Diagnostic cas d'un système.	19
Figure 1. 3: Représentation des fonctions d'appartenance.	22
Figure 1. 4: Évolution temporelle des différents défauts.	26
Figure 1. 5: Différents types de défauts.	27
Figure 1. 6: Présentation de l'architecture de diagnostic.	29
Figure 1. 7: Schéma général pour la détection et la localisation de défaut.	30
Figure 2. 1: Représentation des différentes fonctions d'appartenance.	47
Figure 2. 2: Système flou.	47
Figure 2. 3: Représentation d'un singleton.	48
Figure 2. 4: Structure d'un système flou type-2, avec ses deux sorties.	50
Figure 2. 5: Ensemble flou type-2 représentant un ensemble flou type-1 avec une incertitude de variance appartenant à l'intervalle $[0.05; 0.45]$ pour $x=4$ .	51
Figure 2. 6: Ensemble flou type-2 représentant un ensemble flou type-1 avec une incertitude de valeur moyenne appartenant à l'intervalle $[0.29; 0.69]$ pour $x=4$ .	52
Figure 2. 7: Schéma de commande d'un contrôleur adaptatif flou direct.	58
Figure 2. 8: Schéma synoptique de la commande floue indirecte.	60
Figure 2. 9: Système de pendule.	62
Figure 2. 10: Réponse du système avec une commande adaptative floue indirecte: (a) position angulaire, (b) erreur quadratique.	63
Figure 2. 11: Effort appliqué au chariot.	64
Figure 2. 12: Réponse du pendule avec une commande floue indirecte pour différentes valeurs initiales des paramètres ajustables : (a) position angulaire, (b) effort appliqué.	64
Figure 2. 13: Perte de poursuite dans le cas de la commande indirecte.	65
Figure 2. 14: Les fonctions non linéaires et leurs approximations en utilisant des valeurs initiales à partir des connaissances a priori: (a): la fonction $f(\alpha, \dot{\alpha})$ , (b): la fonction $g(\alpha, \dot{\alpha})$ .	65
Figure 2. 15: La réponse du système avec une commande adaptative floue indirecte: (a) position angulaire, (b) effort appliqué au chariot.	66

Figure 2. 16: Réponse du système avec la commande adaptative floue directe: (a) position angulaire, (b) erreur quadratique.	67
Figure 2. 17: Effort appliqué au chariot.	67
Figure 2. 18: Réponse du pendule avec la commande floue directe pour différentes valeurs initiales des paramètres ajustables: (a) position angulaire, (b) effort appliqué.	68
Figure 2. 19: Perte de poursuite dans le cas de la commande.	68
Figure 2. 20: Position angulaire (trait plein) et sa trajectoire de référence (trait discontinu).	72
Figure 2. 21: Vitesse angulaire (trait plein) et sa trajectoire de référence (trait discontinu).	72
Figure 2. 22: Erreur de poursuite.	73
Figure 2. 23: Effort appliqué.	73
Figure 3. 1: Localisation de défauts.	81
Figure 3. 2: Présentation d'un système PFTC.	87
Figure 3. 3: Structure générale d'un système tolérant aux défauts.	88
Figure 3.4: Principe du système tolérant aux défauts actif à base de banc de régulateur.	89
Figure 3. 5: Principe de détection de défauts.	91
Figure 3. 6: Architecture de la commande tolérante aux défauts.	91
Figure 4. 1: Evolution des variables d'états.	103
Figure 4. 2: Signaux de commande.	104
Figure 4. 3: Evolution des variables d'états.	104
Figure 4. 4: Signaux de commande.	105
Figure 4. 5: Schéma global de la commande adaptative floue par modes glissants en présence de défauts.	106
Figure 4. 6: Trajectoire de référence.	115
Figure 4. 7: Evolution des variables d'états	115
Figure 4. 8: Taux d'efficacité des actionneurs.	125
Figure 4. 9: variables d'états ainsi que les trajectoires de référence.	125
Figure 4. 10: Signaux de commande calculés.	125

Figure 4. 11: Effort appliqué au pendule.	125
Figures 4.12:Taux d'efficacité des actionneurs	126
Figures 4.13: Evolution des états du pendule	126
Figures 4.14: Evolution des signaux de commade (actionneurs)	126
Figures 4.15: Effort appliqué	126

## Liste des tableaux

Tableau1.1. Exemples de mesures.	21
Tableau 4 1: Paramètres du modèle de défaut actionneur.	108
Tableau 4. 2: Paramètres du système.	123

## **Notations et abreviations**

FBF: Fonction à Base Floue.

FDD: Fault Detection and Diagnosis.

FDI: Fault Detection and Isolation.

FTC: Fault Tolerant Control.

FTCS: Fault Tolerant Control Systems.

LMI: Linear Matrix Inequality.

MIMO: Multi Input Multi Output (Multi entrées Multi sorties).

PFTC: Passive Fault Tolerant Control.

RdF: Reconnaissance de formes.

SISO: Single Input Single Output (mono entrée mono sortie).

## Avant-propos

Les travaux de Cette Thèse rentrent dans le cadre:

- i) de Projet CNEPRU d'une durée de trois ans (2006-2009), intitulé: Un environnement intelligent et évolutif d'aide au diagnostic et à la conduite des systèmes industriels
- ii) d'une Bourse Franco Algérienne (BAF) d'une durée de 18mois (Octobre 2008-Avril 2010).

Les objectifs tracés étaient de doter l'environnement évolutif d'un pouvoir d'anticipation de défauts, pouvant éventuellement survenir à l'aide des outils de plus en plus souples, adaptatifs et pourquoi pas reconfigurables, s'il le faut.

Ainsi, les travaux se sont orientés vers deux approches. La première repose sur le diagnostic des systèmes de production basé sur la détection dynamique des défauts et l'utilisation d'un modèle analytique pour les tâches de surveillance et de conduite des systèmes industriels. La seconde, n'est autre que la prise en considération des contraintes qui rendent parfois impossible la synthèse analytique d'un apprentissage dynamique. De ce fait, le recours aux techniques floues est indispensable pour contourner de tels problèmes.

Une partie de ces travaux s'inscrit dans la tâche contrôle-commande du projet CPER MOSYP porté par le Groupe Auto du CReSTIC mon laboratoire d'accueil. Ce projet est financé par la Région Champagne Ardenne et le Fond Européen FEDER.



# Introduction Générale

La complexité des installations industrielles n'a cessé d'augmenter avec le développement technologique et la croissance des contraintes économiques liées à la qualité du produit. La sûreté de fonctionnement des systèmes de production constitue un enjeu important tant sur le plan économique que scientifique. En effet, divers objectifs sont tracés, d'un côté, concernant les performances du système à savoir: garantir la qualité du produit, minimiser les coûts de production ou, d'un autre côté, assurer le bon fonctionnement du système. La réduction des coûts impose une maîtrise accrue de la disponibilité de l'outil de production et par conséquent, son automatisation. La sûreté de fonctionnement à son tour, exige la capacité du système à résister à des défaillances matérielles. La redondance matérielle peut être certes une solution, mais exige la présence de plusieurs capteurs et actionneurs ce qui représente un investissement très coûteux et difficilement rentabilisable. Pour contourner ce problème, on peut avoir recours à la redondance analytique.

Néanmoins, un système complexe est un système où l'exactitude et la dynamique des phénomènes rendent les décisions difficiles. Ce sont des systèmes dans lesquels beaucoup d'informations issues des sous-systèmes repartis et interconnectés doivent être gérées

De ce fait, l'automatisation intégrée ne s'attache pas, seulement, au maintien de quelques variables à de valeurs de référence, mais aussi au processus dans sa globalité et dans ses divers modes de fonctionnement. En général, les modes de fonctionnement normal et les modes de dysfonctionnement qui correspondent aux différents états affectés par une panne ou défauts sont pris en considération. Ces modes peuvent provoquer l'arrêt immédiat du processus, soit basculer la commande en mode dégradé qui consiste à modifier les consignes des boucles, soit un changement radical dans l'architecture de celle-ci ou du système.

Ainsi, la sûreté de fonctionnement trouve, maintenant, un terrain de prolongement vers bien d'autres aspects comme la tolérance aux défauts.

Bénéficiant des outils déjà existants en automatique, la recherche dans le domaine de surveillance et de supervision, a permis de développer des méthodes de sûreté de fonctionnement tels que le diagnostic et la commande tolérante aux défauts des systèmes [Bos et al, 1999],[Chen et al, 1999], [Bou et al, 2000] et [Gen, 2007].

Plusieurs techniques pour la surveillance et le diagnostic des défauts dans les systèmes dynamiques ont été développées ces dernières années [Cas et al, 1996], [Jam, 2003] et [Tou, 2005],. Cependant, la plupart de ces techniques est basée sur la surveillance du procédé seul

sans la prise en compte de son interaction avec le système de commande. Une des solutions est de proposer une stratégie de commande tolérante aux défauts, permettant de s'accommoder automatiquement de l'effet de certains types de défauts qui peuvent apparaître sur des capteurs, des actionneurs ou sur le système tout en étant capable de maintenir la stabilité de ce dernier et d'éviter les situations catastrophiques. Selon le degré de sévérité et de criticité du défaut, on peut avoir des situations contrôle- commande assez différentes.

**D**ans la majorité des applications, les défaillances de composants peuvent surgir dans un temps incertain et la grandeur de défaut peut être aussi inconnue. Ces défauts peuvent porter atteinte à la performance (robustesse) et à la stabilité du système. [Vei et al, 1992], [Vei, 1995] et [Yan et al, 2001].

**L**a complexité des systèmes et des processus ne leur permet pas de fonctionner normalement, que grâce à la présence de lois de commande élaborées pour satisfaire des performances spécifiées en termes de productivité, consommation énergétique, etc. Ainsi, il apparaît nécessaire de mettre en place une stratégie garantissant la tolérance aux défauts.

**B**ien évidemment, dans la plupart des cas, l'apparition d'un défaut ne puisse être évitée et qu'il n'engendre pas d'arrêt, ou au moins compenser son effet de manière à préserver des performances proches que celles désirées. Des études sont faites, dans ce cas, en diagnostiquant les défauts capteurs [Ait et al, 2002] et [Alw et al, 2006].

**P**lusieurs approches ont été proposées, des approches matérielles reposant sur des mécanismes de commutation d'un régulateur vers un autre à titre d'exemple, ou des approches analytiques basées sur des techniques de commande adaptative ou supervisée. Il convient donc de préciser que les conditions induites par la présence de défauts incitent à introduire des techniques et /ou des méthodes liées à la présence d'incertitudes paramétriques et entrées inconnues engendrées par le défaut [Sau et al, 2002] et [Sau et al, 2007].

**D**ans cet état d'esprit, la loi de commande tolérante aux défauts est un problème qui impose de mettre en œuvre une démarche, particulière, qui se fait en trois étapes:

- i) diagnostic et évaluation de performances;
- ii) synthèse d'accommodation ou de reconfiguration;
- iii) adaptation de la loi de commande.

**C'**est pourquoi, afin d'éviter la dégradation du fonctionnement du système, il faut détecter au plus vite l'occurrence du défaut et agir de façon que le système continue à assurer sa mission,

malgré la présence d'un défaut. Donc, il est important, après avoir caractérisé le défaut, d'analyser son impact sur le comportement du système.

Sachant qu'un défaut de système dynamique est perçu, comme une déviation du comportement des sorties en fonction des entrées, par rapport à un comportement nominal qui peut être décrit par un modèle de fonctionnement normal.

Or, dans la commande de processus, l'existence des variables difficiles à décrire avec exactitude, la présence de connaissances sur le processus exprimées linguistiquement par des experts, la complexité des descriptions mathématiques de certains systèmes font toute une raison pour exploiter de nouvelles techniques floues [Ber et al, 2003]. Aussi, la plupart des applications en intelligence artificielle ont besoin d'utiliser des approches directes et indirectes, exploitant la connaissance des experts, d'où l'introduction d'un nouveau terme le modèle flou utilisant des algorithmes d'apprentissage appelées modèles flous adaptatifs [Wan, 1992], [Wang et al, 1992] et [Wan, 1994]. Cependant, ce type de commandes présente un inconvénient majeur: il ne permet pas d'avoir les bonnes performances de poursuite en présence de perturbations externes. Pour contourner ces inconvénients, on peut utiliser une technique de robustification comme les modes glissants [Slo, 1991], [Utk, 1992], [Cha et al, 2000] et [Cha et al, 2001].

Dans cet objectif, les travaux de cette thèse ont pour but de maintenir le système en fonctionnement normal et d'assurer ses missions en présence de défauts. Pour cela, nous proposons une famille de commandes adaptatives floues tolérantes aux défauts, robustes basées sur les modes glissants pour une classe de systèmes non linéaires, incertains sujet de perturbations. La logique floue nous permet de s'affranchir d'une connaissance parfaite de la dynamique de notre système, et les modes glissants, quant à eux, permettent d'assurer la robustesse vis à vis des perturbations.

## **Organisation du manuscrit**

Nous consacrons le premier chapitre au diagnostic des systèmes industriels, abordant une terminologie et les méthodes utilisées pour le diagnostic.

Dans le deuxième chapitre, les concepts de base de la logique floue, ses avantages et ses limites seront évoqués, avec une mise en œuvre de commandes adaptatives floues. Des résultats de simulation seront présentés, pour montrer les performances de ces approches et leurs inconvénients.

**L**e chapitre trois sera consacré à une étude théorique des travaux de recherche traitant les méthodes de diagnostic des systèmes industriels. En se basant sur cette étude, nous choisissons une méthode de diagnostic tolérante aux défauts qui fera l'objet du chapitre suivant.

**L**e quatrième chapitre présentera la mise en œuvre de trois approches qui représentent notre principale contribution. La première est la mise d'une commande adaptative floue directe et la seconde indirecte, dont la robustification dans les deux cas est obtenue par le biais des modes glissants.

**D**ans la troisième approche nous utilisons les systèmes flous de type- 2 afin de prendre en compte les incertitudes non exploitées par le système flou type- 1 et rendre notre commande insensible aux bruits de mesure.

**L**es trois approches ont été validées par des simulations, pour illustrer leur apport en termes de performance et de robustesse.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale et des perspectives.

# Chapitre 1. Diagnostic des systèmes industriels:

## Terminologie et outils

### 1. Introduction

Le diagnostic a fait son apparition avec l'automatique moderne pour répondre aux nouvelles problématiques liées à l'utilisation d'une nouvelle génération de systèmes industriels plus complexes. Pour beaucoup d'applications industrielles, il s'agit d'assurer continuellement la sécurité du matériel et des personnes et encore de préserver leur environnement. Néanmoins, la détection et l'identification des fautes dans les systèmes dynamiques nécessitent plusieurs approches puisque celles-ci dépendent directement de la nature du système étudié. Notons que l'apparition d'un défaut au niveau d'un système ou de sa chaîne de commande peut provoquer une modification de son comportement.

L'automatisation des systèmes industriels a certes atteint un niveau très élevé et s'accroît continuellement, que ce soit dans les domaines d'aéronautique, de biomédicales, de l'automobile, mais, dans la plupart de ces applications le défaut n'est pas pris en considération, et souvent un petit défaut peut engendrer un autre pouvant influencer sa dynamique ou le détériorer. De manière générale, la démarche à entreprendre peut être interprétée comme suit [Fra, 2008]:

- il existe des variables ou des comportements observés qui permettent de savoir si le procédé est en fonctionnement normal,
- à partir de l'observation et de la connaissance acquise sur le procédé. Il est possible de générer un rapport de diagnostic pour décider s'il y a un défaut ou non et de l'identifier ensuite.

Enfin, le problème qui se pose est, est ce que les paramètres choisis sont appropriés à l'étude menée ou à mener? Et comment collecter et représenter la connaissance décrivant un comportement normal ou anormal?

Dans ce chapitre, nous allons essayer d'introduire quelques définitions et notions permettant de répondre à ces questions que nous allons utiliser dans la suite de cette thèse.

## 2. Qu'est-ce qu'un diagnostic ?

Le diagnostic est une procédure qui consiste à détecter et localiser un composant ou un élément défectueux dans un système dynamique. Par détecter, on désigne la capacité à mettre en évidence l'apparition d'un ou de plusieurs défauts. On parle de localisation quand on est, de plus, capable de préciser la nature du ou des défauts occurrents. La structure générale d'une procédure de diagnostic est représentée sur la figure (Figure 1.1), où le module de diagnostic est alimenté par toutes les connaissances disponibles (observation et modèle). Cette connaissance comprend les différentes mesures issues des capteurs et toute autre information pouvant être utile pour le diagnostic.

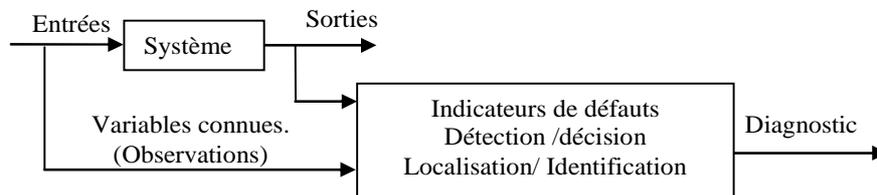


Figure 1. 1: Diagnostic d'ordre général d'un système.

Le module de diagnostic traite les observations et produit un "diagnostic" qui est une liste de défauts possibles pouvant affecter le système durant son fonctionnement. Souvent, le système est régulé par un contrôleur pour améliorer ses performances. Dans ce cas, les variables connues sont les sorties du contrôleur et les variables d'état mesurées à l'aide de capteurs.

En plus des défauts, on peut être confronté à la présence de perturbations externes, ce qui complique la synthèse du module de diagnostic (Figure 1.2). Ces deux types d'entrées, défauts et perturbations, sont non contrôlés et généralement non mesurables, affectent l'évolution du système et dégradent ses performances. Les perturbations appelées aussi entrées inconnues, ne sont pas considérées comme des défauts mais influencent également les performances du système.

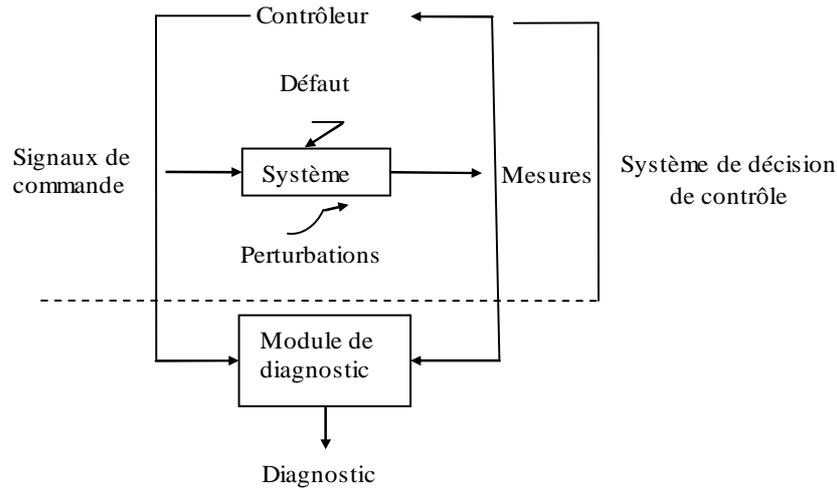


Figure 1. 2: Diagnostic cas d'un système.

Selon AFNOR<sup>1</sup>, le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un contrôle. Cette définition repose sur deux tâches essentielles pour le diagnostic:

- observer les symptômes des défaillances,
- identifier la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur des observations.

De façon générale, c'est la procédure entreprise permettant l'identification du défaut détecté.

L'objectif est donc, de donner à l'opérateur ou au superviseur, dans le cas de supervision, des informations sur les anomalies qui se sont produites.

Le diagnostic peut être défini comme un ensemble d'actions visant à évaluer l'état d'un procédé à partir de la connaissance des divers états de fonctionnement. A partir de l'observation du procédé, on détermine par comparaison avec les divers états de fonctionnement connus le degré de défaillance du système, leurs natures et leurs causes.

### 3. Terminologie et définitions

La terminologie adoptée dans cette thèse:

*Défaut*: dans [Ise et al, 1997a], le terme faute ou défaut est défini généralement comme une imperfection physique liée à la conception ou à la mise en œuvre du dispositif. Un défaut peut

<sup>1</sup> AFNOR: Association française de normalisation.

rester caché pendant un certain temps avant de donner lieu à une défaillance. Dans [Plo, 1998], le défaut est considéré comme une anomalie de comportement au sein d'un système physique. *Anomalie*: particularité non conforme à la loi naturelle ou à la logique.

**D**e point de vue automatique, l'anomalie est générique; elle décrit ce qui n'est pas conforme à une référence; cette dernière est définie à l'aide d'un modèle du système à diagnostiquer.

*Faute ou Défaillance*: la faute ou la défaillance concerne la modification suffisante et permanente des caractéristiques physiques d'un système ou d'un composant pour qu'une fonction requise ne puisse plus être assurée dans les conditions prévues [Rou, 1992] et [Ise, 1997b]. Les défaillances sont classées selon leurs origines en :

- *défaillances de capteur*: Ecart entre la valeur réelle de la grandeur et sa mesure.
- *défaillances d'actionneur*: Incohérence entre les commandes et la sortie (par exemple: la pompe délivre un débit incohérent avec sa caractéristique hydraulique).
- *défaillances du processus physique*: Ces défaillances sont dues à des modifications de la structure (fuite, rupture d'un organe,...) ou à la variation des paramètres du modèle (encrassement d'un tube d'un four, bouchage partiel d'une conduite, ..).
- *défaillances du contrôleur*: Ecart entre la valeur réelle de la sortie du contrôleur (selon l'algorithme implémenté) et sa mesure.

**D**ans [Plo, 1998], la défaillance est considérée comme une anomalie fonctionnelle au sein d'un système physique.

*Panne*: interruption permanente de la capacité du système à réaliser une fonction requise sous des conditions de fonctionnement spécifiées.

*Résidu*: un résidu ou un indicateur de faute exprime l'incohérence entre les informations disponibles et les informations théoriques fournies par un modèle (supposées décrire correctement le processus).

*Perturbation*: c'est l'écart entre le comportement d'un système physique et une référence dont l'origine n'est pas considérée comme une anomalie.

*Observation*: une information sur le comportement réel ou sur le fonctionnement du système et qui dépend a priori de l'environnement de ce dernier. [Com, 2000]

*Mesure*: une observation représentée par une variable dont le contenu est l'image d'une grandeur physique. L'obtention de cette mesure se fait par l'intermédiaire d'un système physique, le capteur comme exemple.

*Fiabilité*: la fiabilité est l'aptitude d'un système à accomplir sa mission pendant une période donnée et dans des conditions données d'utilisation [Rou, 1992] et [Zwi, 1995].

*Disponibilité*: c'est l'aptitude d'un système à fonctionner lorsqu'il est sollicité [Rou, 1992] et [Zwi, 1995].

Selon ces définitions, il faut prendre en compte les objectifs et les performances attendues: Que veut-on surveiller? Quelles sont les défaillances concernées et comment les définir ?

#### 4. Système de diagnostic

Un système de diagnostic peut être vu comme un capteur qui traite des informations en vue de fournir des observations, de plus haut niveau, ciblées sur les anomalies. Ces mesures peuvent être de natures différentes, et les valeurs prises par une mesure appartiennent à un ensemble de modalités définissant sa nature [Cas et al, 1996]. Elles peuvent être d'ordre quantitatif, logique ou bien qualitatif comme résumées dans le tableau suivant:

Tableau 1.1. Exemples de mesures

Nature de la mesure	Ensemble de modalités
Quantitatif	Intervalle défini sur l'ensemble $\mathfrak{R}$ : la plage de la mesure
Logique	{vrai, faux} ou {0,1}
qualitatif	Ensemble fini de modalités dont chacune est associée à un symbole

Cette mesure peut également être représentée à l'aide de la logique floue [Zad, 1965]. Ainsi, on peut définir un ensemble flou  $A$  comme suit:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$$

où  $\mu_A$  est le degré d'appartenance de  $x$  à l'ensemble flou  $A$ . Il est impossible de caractériser des informations de natures différentes, selon l'allure des fonctions d'appartenance et aussi unifier les différents types de mesures. C'est l'intérêt que porte la logique floue pour permettre

un raisonnement graduel (Figure 1.3): on peut définir une fonction d'appartenance selon la nature de données ou de mesures.

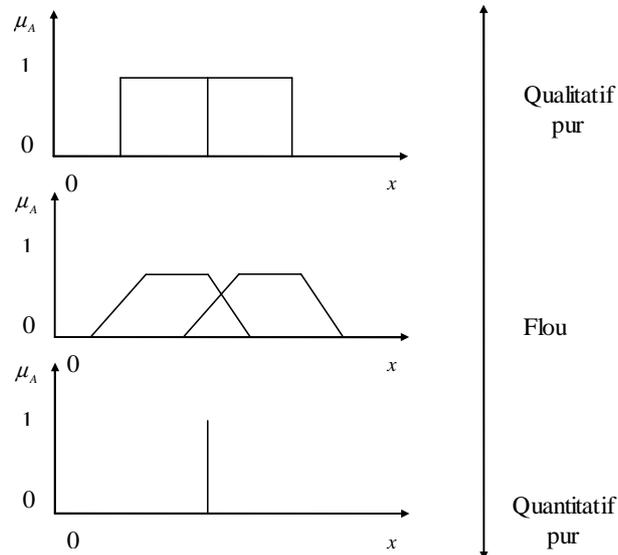


Figure 1. 3: Représentation des fonctions d'appartenance.

## 5. Diagnostic et tolérance aux défauts

Un système muni d'un système de diagnostic et de tolérance aux défauts peut être présenté comme suit:

- le système général est muni de son correcteur, de ses actionneurs et de ses capteurs, ainsi que les défauts pouvant affecter ces derniers.
- un système de diagnostic (FDD, Fault Detection Diagnosis) qui surveille le système et délivre 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 pour assurer un certain niveau de performance.

### 5.1 Diagnostic de défauts

Afin de permettre aux systèmes de continuer leur mission en cas de défauts, il est indispensable d'identifier les changements imprévus (défauts) du système avant que ces défauts ne le conduisent à une incapacité totale (défaillance). Les premières méthodes de détection de défauts utilisaient la redondance physique (comme capteurs et actionneurs multiples pour la

même fonction) qui est associée à de simples logiques à seuils. Bien qu'elle soit largement répandue dans l'industrie, elle engendre une augmentation de coûts. Pour cela, il faut faire appel à la redondance analytique permettant l'exploitation des relations entre les grandeurs mesurées ou bien estimées. Ce type d'approches est appelé méthodes à base de modèle analytique [Fra, 1990], [Coc, 1993], [Mac, 1994], [Tao, 2004] et [Bat, 2008].

## **5.2. Principe de diagnostic de défauts**

**A** partir de la méthodologie adoptée, un défaut est une modification inattendue d'une propriété ou d'un paramètre caractéristique du système surveillé par rapport au fonctionnement nominal. Il peut être annonciateur d'une défaillance, telle que l'interruption de la capacité du système à accomplir sa mission, tenant compte de ses conditions de fonctionnement.

**P**ar conséquent, la détection de défauts consiste à mettre en évidence la présence de défauts dans le système et leurs instants d'apparition. Cette opération est suivie de la localisation de défauts (isolation), qui a pour but de les classer en fonction de leur type et de leur emplacement dans le système. Ainsi, l'identification de défauts, à son tour, vise à caractériser leurs amplitudes et leurs évolutions temporelles. Ces trois opérations se résument au processus complet de détection et de diagnostic de défauts incluant l'identification, qui nécessitent dans la plupart du temps de générer des résidus. Ces derniers, étant des indicateurs de la présence de défauts, sont calculés à partir de l'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs théoriques obtenues à partir d'un modèle. Ces signaux sont, en général, de faible amplitude quand le système fonctionne en état normal et s'écartent notablement de leurs valeurs initiales pour être détectable en présence de défauts. Ainsi, la détection d'un défaut induit systématiquement à la modification ou la reconfiguration de la loi de commande pour maintenir les performances désirées. Cette action présente le principe de la commande tolérante aux défauts, qu'elle soit active où la reconfiguration utilise les informations issues du module de diagnostic ou, passive qui fait appel à une commande robuste [Gao et al, 1992], [Bas et al, 1996], [Cas et al, 1997], [Ger, 1997], [Bas, 1999], [Bos et al, 1999], [Com, 2005], [Gue et al, 2009].

## **5.3. Procédure de diagnostic**

**E**lle consiste à partir des défauts détectés, de localiser l'élément défaillant et d'identifier la cause probable qui a provoqué ce défaut. Si l'on dispose de la connaissance de la signature

de défauts, il est possible, à partir de celle-ci de remonter aux éléments défaillants. Cette étape nécessite un modèle de défauts du système permettant ce que l'on appelle la résolution inverse.

**En résumé**, le diagnostic passe par trois étapes: la détection, la localisation (isolation) et l'identification des défauts.

- **Etape 1:** la détection de défauts consiste à identifier le mode de fonctionnement du système physique, en se basant sur une connaissance préalable du mode de fonctionnement du système.
- **Etape 2:** la localisation de défauts consiste à déterminer, de manière plus approfondie, les composants défaillants ou la cause probable de la défaillance.
- **Etape 3:** l'identification de défauts a pour but de caractériser le défaut en durée et en amplitude, afin de le classifier par type et degré de sévérité. A l'opposé de l'étape précédente, dans celle-ci on recherche à identifier les causes précises de cette anomalie grâce à des signatures répertoriées et validées par les experts.

#### **5.4. Classification de défauts**

Les défauts affectant un système peuvent être classifiés selon leur nature, le type et l'évolution dans le temps. L'action du défaut affectant le système en lui-même, ses actionneurs et/ou ses capteurs, peut être de nature additive ou multiplicative et son évolution temporelle peut être brusque ou au contraire lente et peut survenir de manière aléatoire.

Par conséquent, on peut classifier les défauts d'une manière synthétique comme suit:

##### **5.4.1. Selon l'évolution temporelle**

Les défauts peuvent, apparaître ou déjà être présent sur le système, être de faible ou de forte amplitude, et brusque ou plutôt arriver graduellement sous forme de dérives lentes. Si le phénomène qui les caractérise est connu, ils sont dits déterministes. Dans le cas contraire, les défauts apparaissant par intermittence sont dits stochastiques, et ils sont caractérisés par des processus aléatoires. Cette catégorie est classifiée en défaut brusque (ou biais), défaut naissant (ou dérive) et en défaut intermittent (avec interruptions), comme illustré sur la figure (Figure 1.4).

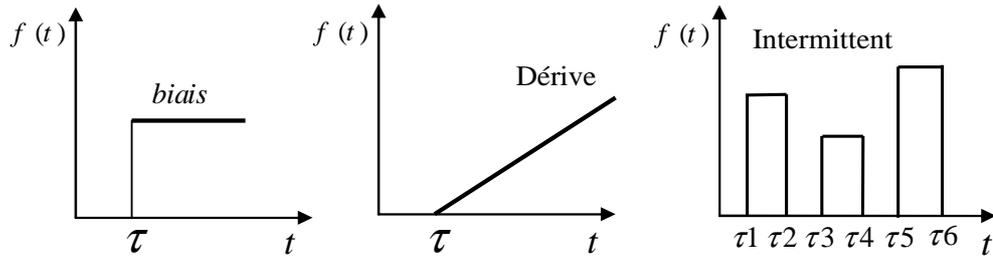


Figure 1. 4: Évolution temporelle des différents défauts.

### 5.4.2. Selon la nature

Il existe des défauts de nature additive et multiplicative; pour prendre en compte l'effet de ces défauts sur le système, ils sont modélisés de différentes manières. Les défauts additifs sont souvent modélisés par des entrées inconnues du système, quant aux défauts multiplicatifs sont, plutôt considérés comme des changements dans les paramètres du modèle.

#### 5.4.2.1. Défauts additifs

Les défauts additifs correspondent à des entrées inconnues agissant sur le système, soit sur son état ou bien sur sa sortie. Ils sont représentés de la manière suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Lf_u(t) \\ y(t) = Cx(t) + Mf_y(t) \end{cases} \quad (1-1)$$

où  $f_u(t)$  représente les défauts additifs affectant le vecteur d'état  $x(t)$  du système et  $f_y(t)$  représente les défauts additifs affectant le vecteur de sortie  $y(t)$ .

#### 5.4.2.2. Défauts multiplicatifs

Ce type de défauts est, généralement, caractéristique des installations vieillissantes, où les paramètres définis initialement ne sont plus valables pour le système en fonctionnement. Ces défauts correspondent aux modifications paramétriques du modèle représentant le système. Puisque, les défauts multiplicatifs affectent les paramètres du modèle, les variations des sorties dépendent de l'amplitude des défauts et des entrées inconnues. Ils peuvent être représentés de la manière suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + (B + \Delta B)u(t) \\ y(t) = (C + \Delta C)x(t) \end{cases} \quad (1-2)$$

où  $\Delta A$ ,  $\Delta B$ ,  $\Delta C$  représentent les défauts multiplicatifs affectant respectivement le système, les actionneurs et les capteurs.

### 5.4.3. Selon le type

Généralement, un modèle est utilisé pour caractériser le système et permet de décrire au mieux le comportement dynamique du système. Cependant, lorsque celui-ci est soumis à des défauts, le meilleur moyen de les prendre en compte est de les modéliser également. L'intérêt est de pouvoir différencier les défauts selon qu'ils affectent les actionneurs, le procédé ou les capteurs. De plus, leur intégration au modèle permet d'augmenter la sensibilité des résidus vis-à-vis des perturbations. Trois principaux types de défauts se distinguent en fonction de l'élément qu'ils affectent:

- le défaut actionneur, représente un dysfonctionnement d'un dispositif agissant sur la dynamique du système tel que, le blocage d'une vanne qui se traduit par un écart entre l'entrée de commande calculée  $U_c$  et celle effectivement réalisée  $U_a$ .
- le défaut capteur est une variation anormale d'une mesure; comme par exemple une erreur entachant subitement les données issues d'un débitmètre. De la même manière que le défaut d'un actionneur, un défaut capteur se traduit par l'écart entre la sortie réelle du système  $Y_a$  et la mesure associée  $Y_s$ .
- quant au troisième type, défauts du processus, des changements dans les paramètres internes du système entraînent des modifications dans sa dynamique.

Notons que les seules informations disponibles sont la connaissance de  $U_c$ ,  $Y_s$  et d'un modèle du système.

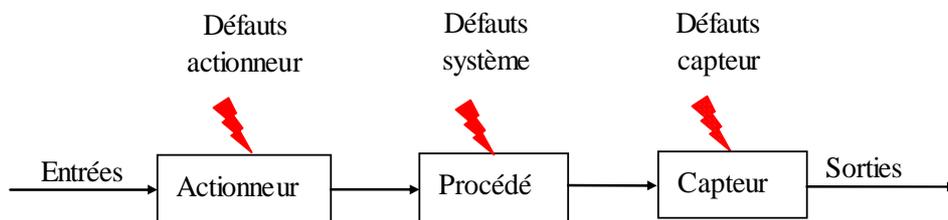


Figure 1. 5: Différents types de défauts [Bla et al, 2006].

### 5.4.3.1. Défauts d'actionneurs

Les défauts d'actionneurs se traduisent par une incohérence entre la commande des actionneurs et la réponse obtenue en leurs sorties. Un actionneur est la partie opérative qui agit sur le système. Or, cet actionneur peut être en perte totale (défaillance) ou en perte partielle. La première se caractérise par une incapacité fonctionnelle de l'actionneur à commander le système: par exemple, une vanne qui reste bloquée dans sa position initiale. La seconde se caractérise par un fonctionnement dégradé de l'actionneur, autrement dit, l'actionneur fonctionne d'une manière similaire au régime nominal mais, son action est seulement partielle.

Dans le cas où le défaut d'actionneur est considéré multiplicatif, il peut être représenté comme suit:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + (B + \Delta B)u(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (1-3)$$

Quand le défaut d'actionneur est considéré comme un vecteur d'entrée inconnue, l'entrée de la commande globale est donnée de la manière suivante:

$$U_f(t) = \Gamma U(t) + U_{fo}(t) \quad (1-4)$$

où  $U$  et  $U_{fo}$  sont respectivement l'entrée de la commande globale appliquée au système et l'entrée de la commande nominale pour le système défaillant.

On peut considérer:

$$u_f(t) = U_f(t) - U_o(t) \quad (1-5)$$

L'équation d'état est affectée par un défaut d'actionneur de la manière suivante:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu_f(t) \\ &= Ax(t) + B(U_f(t) - U_o(t)) \\ &= Ax(t) + B(\Gamma U(t) + U_{fo}(t) - U_o(t)) \\ &= Ax(t) + Bu(t) + B(\Gamma U(t) + U_{fo}(t) - U_o(t) - u(t)) \\ &= Ax(t) + Bu(t) + B[(\Gamma - I)U(t) + U_{fo}(t)] \end{aligned} \quad (1-6)$$

En considérant l'équation (1-4), le défaut d'actionneur est représenté par un vecteur d'entrées inconnues  $f_a$ , et le système d'équations redevient:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + E_a f_a(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (1-7)$$

où  $E_a$  est la matrice associée au vecteur d'entrées  $f_a$ .

#### 5.4.3.2. Défauts de système

Ces défauts caractérisent, de manière arbitraire, tous les défauts qui n'appartiennent pas aux défauts actionneurs et aux défauts capteurs. Ce type de défauts est lié au système lui-même.

#### 5.4.3.3. Défauts de capteurs

Ces défauts se traduisent par un écart entre la vraie valeur de la grandeur et sa mesure. Tout comme le défaut d'actionneur, ils peuvent être totaux ou partiels.

Un défaut de capteur partiel peut se traduire de diverses manières: un biais, une saturation, un défaut de calibrage, un bruit ou une dérive sur la mesure. Le signal du capteur reste plus ou moins en adéquation avec le signal réel du système. Par contre, un défaut de capteur total ne reflète nullement la grandeur mesurée; le signal du capteur ne peut donc être exploité.

Comme dans le cas des défauts d'actionneurs, on peut représenter les défauts de capteurs par un vecteur d'entrées inconnues affectant les sorties; ils peuvent être de nature additive, ce qui se traduit par:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + E_c f_c(t) \end{cases} \quad (1-8)$$

ou de nature multiplicative exprimée par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = (C + \Delta C)x(t) \end{cases} \quad (1-9)$$

La caractérisation d'un défaut de capteur sous la forme additive (1-8) ou multiplicative (1-9), dépend essentiellement de la nature physique du défaut et du modèle. La plupart des défauts de capteurs peuvent être modélisés sous forme de défauts additifs.

### 5.5. Structure de la technique de diagnostic

Le système de diagnostic reçoit les informations disponibles (observations) du processus, qui est régulé généralement par un contrôleur utilisant les signaux de capteurs et envoie ses commandes aux actionneurs. Les perturbations considérées comme entrée inconnue,

mais différentes de défauts, influencent aussi sur le processus surveillé comme montré sur la figure (Figure 1.6).

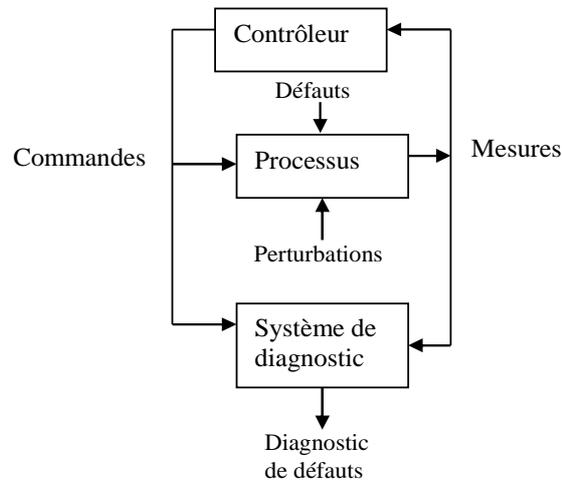


Figure 1. 6: Présentation de l'architecture de diagnostic.

Le diagnostic de défauts s'effectue, généralement, en associant un générateur de résidus avec une stratégie d'analyse afin de fournir un ensemble de décisions sur la présence de défauts. (Figure 1.7)

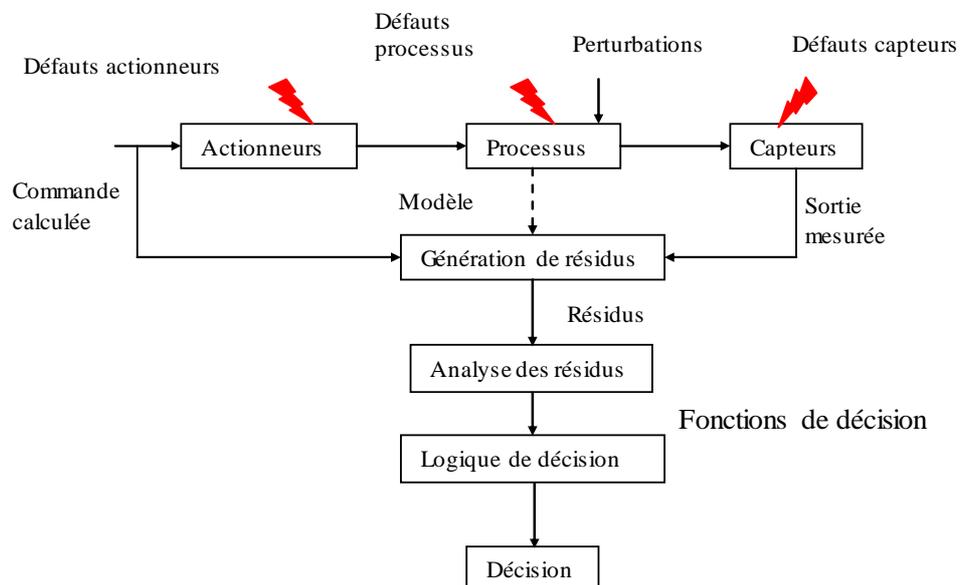


Figure 1. 7: Schéma général pour la détection et la localisation de défaut.

Dans l'étape de génération de résidus, le modèle du processus est utilisé pour prédire le comportement désiré en vue de le comparer avec celui obtenu.

## **6- Diagnostic des systèmes industriels**

Les systèmes industriels sont souvent soumis à des changements inattendus qui entraînent de mauvais fonctionnement [Ise et al, 1997a]. Selon les performances du système, il existe trois types d'anomalies à prendre en considération: l'erreur, le défaut et la défaillance. Ainsi, le diagnostic a pour objectif de trouver les causes de l'anomalie [Ise, 1997b]. Dans [Zwi, 1995], les caractéristiques des systèmes industriels sont: la fiabilité, la disponibilité et la sûreté. Le diagnostic donc, consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance [Gao et al, 1992]; si le système fonctionne correctement et en l'absence de bruit ou d'erreurs de modélisation, la valeur de résidu est nulle. Cette valeur reflète l'effet des défauts sur la dynamique du système. [Fra, 1990] et [Com, 2005].

### **6.1. Intérêts du diagnostic des systèmes industriels**

L'amélioration de la qualité et la réduction des coûts font l'objet d'une demande de la part des industriels pour une meilleure exploitation des systèmes dont la complexité ne cesse de croître. Néanmoins, surveiller le fonctionnement d'installations sans rentrer dans le détail de cette exécution de tâche, présente une difficulté majeure. Cependant, assurer la continuité de service nécessite un contrôle afin d'éviter toute incapacité fonctionnelle.

Comme les systèmes industriels sont devenus, de plus en plus, complexes avec l'automatisation des boucles de contrôle, un fort intérêt s'est manifesté à propos de la sûreté de fonctionnement de ces systèmes [Ise, 1984], [Vil, 1988] et [Har, 2003] et s'est focalisé sur ceux de grandes tailles. Ceci a ouvert à de nouveaux travaux, qui ont donné lieu à un nombre important de méthodes, traitant la détection et l'isolation de défauts (FDI) [Ger, 1997], [Ise, 1997b] et [Ger, 1998]. Théoriquement, il existe trois principales approches de la FDI [Fra, 2008]: la première est basée sur les modèles quantitatifs, la deuxième repose sur les modèles qualitatifs et la dernière approche utilise la connaissance heuristique du système.

Concernant l'approche basée sur les modèles quantitatifs, les techniques de résidus sont les plus utilisées, et plus particulièrement la redondance analytique, les observateurs, le filtre de Kalman, etc. Dans l'approche basée sur les modèles qualitatifs, on trouve les arbres de décisions qui sont les plus utilisées et les plus connues. Enfin, les systèmes experts, les réseaux de neurones et l'analyse en composantes principales, font partie de l'approche à base de connaissance. [Cho et al, 1984], [Chu, 1992], [Her et al, 1994], [Har, 2003], [Gen et al, 2004], [Jia et al, 2004] et [Fek et al, 2006].

## 6.2. Évaluation des performances de la commande

Vu son importance dans les systèmes industriels modernes, le domaine de diagnostic a vu le développement de plusieurs méthodes donnant une solution aux problèmes de détection et de localisation de défauts. Dans certains systèmes, la localisation d'un ou de plusieurs défauts est nécessaire mais n'est pas suffisante pour garantir la sûreté de fonctionnement, sachant bien qu'il est indispensable de modifier la loi de commande, en temps réel, afin de maintenir la stabilité du système et de garantir ainsi un fonctionnement en mode dégradé.

Ainsi, la loi de commande tolérante aux défauts s'avère nécessaire. Dans cet état d'esprit, des travaux de recherche concernant les méthodes d'isolation de défauts, réduisant les fausses alarmes robustes aux erreurs de modélisation et permettant également de rendre plus efficace la prise de décision en présence de défauts, ont été développées pour la conception des commandes qui maintiennent la stabilité et les performances des systèmes en présence de dysfonctionnement.

Pour synthétiser, en même temps, la commande et le générateur de résidus, le correcteur peut être réglé d'une façon à obtenir:

- une sortie  $y$  du système qui suit la référence  $y_{ref}$ ,
- une sortie pour le diagnostic qui suit les défauts,
- et finalement, ces deux propriétés soient maintenues en présence d'incertitudes de modèle.

## 7. Problème de diagnostic

Au moment de la détection de dysfonctionnement, il faut fixer des seuils de pré-alarme et d'alarme sur la valeur de l'écart mesurée entre la signature nominale et celle mesurée. Pour déterminer ces seuils, il faut faire ou définir des tests de décision (tests statistiques; binaires, min max, etc.).

### 7.1. Formulation du problème de diagnostic des systèmes

En général, pour un système donné, il existe un certain nombre de variables dont l'observation permet de déterminer si le comportement obtenu est attendu ou non. Par conséquent, la tâche principale du diagnostic de défauts est de décider, à partir des observations

et de la connaissance du système, s'il existe ou non un défaut de fonctionnement et de le localiser. Ainsi, le diagnostic de défauts consiste à:

- déterminer comment représenter la connaissance du comportement normal du système,
- définir les variables appropriées du système observé,
- formuler la procédure de la prise de décision, voire identifier le défaut et le localiser dans le système.

Supposons que le système en fonctionnement peut être trouvé dans l'un des deux cas suivants:

- **1<sup>er</sup> cas:** en l'absence de(s) défaut(s), le système est représenté de la manière suivante:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + d \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (1-10)$$

où  $(A, B, C)$  sont des matrices d'état,  $x$  représente le vecteur d'état,  $u$  représente l'entrée du système,  $y$  la sortie du système et  $d$  les perturbations externes.

- **2<sup>ème</sup> cas:** en présence de(s) défaut(s), le système est décrit par l'équation suivante:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Lf_u(t) + d \\ y(t) = Cx(t) + Mf_y(t) \end{cases} \quad (1-11)$$

où  $(L, M)$  sont des matrices,  $f_u$  et  $f_y$  sont des défauts affectant, respectivement, l'entrée et la sortie du système.

Lorsque le système est en fonctionnement normal (absence de défaut), les fonctions requises seront assurées. Par contre, si le système est en fonctionnement anormal (présence de défaut), les objectifs désirés ne sont pas atteignables soit de façon totale ou partielle.

Exemple: La formulation du diagnostic de défauts lorsqu'un modèle comportemental du système peut s'exprimer sous la forme suivante:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f_s(x, u, f, d), \quad x(0) = x_0 \\ y &= g_s(x, u, f, d) \end{aligned} \quad (1-12)$$

$f_s$  et  $g_s$  représentent les équations d'état continues du système. Le système d'équations (1-12) représente la structure d'un modèle décrivant une large classe de systèmes non linéaires où  $x$  est l'état inconnu a priori,  $u$  est le vecteur des entrées connues (c'est la consigne),  $y$  est la sortie mesurée,  $f$  et  $d$  représentent respectivement les défauts et les perturbations; ils peuvent être des entrées non additives et induisent une modification (entrée – sortie) du comportement du système, c'est-à-dire une modification entre  $u$  et  $y$  ce

qui est conforme avec les définitions des défauts et perturbations. Ainsi, la détection consiste à décider si le système est en défaut ou non ( $f = 0$  ou bien  $f \neq 0$ ) indépendamment des perturbations et des changements du point de fonctionnement.

## 8. Classification des méthodes de diagnostic des systèmes dynamiques

Dès l'apparition des systèmes technologiques, leur fiabilité est devenue un problème crucial et diagnostiquer une défaillance est devenu un sujet de recherche, de plus en plus, important. De ce fait, des outils de diagnostic ont été mis en exergue pour permettre de détecter plus rapidement les éventuels problèmes voire de les anticiper, ce qui a pour conséquence de minimiser le coût de maintenance et de réparation et d'augmenter la disponibilité du système.

Les travaux de recherche sur le diagnostic de défaillances, dans les systèmes dynamiques sont très nombreux [Saut et al, 2002], [Kin, 2003], [Tou, 2005], [Maq et al, 2007] et [Oud, 2008]. Les approches étudiées sont très diverses et chacune est révélatrice de son époque. Ces approches dépendent essentiellement des technologies et des ressources informatiques disponibles au moment de leur développement, [Vil, 1988], [Vil et al, 1992], [Cha, 1993], [Coc, 1993], [Com, 2000] et [Coc, 2004].

Néanmoins, comme le diagnostic est une méthode de solution de problèmes qui repose sur la classification des types de connaissances, car la connaissance et le raisonnement sont deux éléments clés de cette solution.

Les méthodes de diagnostic sont classifiées selon la connaissance et le raisonnement en deux catégories, [Zwi, 1995] et [Ise, 1997b]: Les premières méthodes exploitent la connaissance du modèle. En effet, les méthodes externes utilisent la connaissance issue de l'expertise humaine, par contre les méthodes internes dépendent de la connaissance obtenue à partir du modèle mathématique. Dans ces dernières, c'est le type de raisonnement qui est utilisé pour résoudre le problème constituant la caractéristique principale des méthodes inductive et déductive (avant, arrière ou mixte).

Selon la prise de décision, il convient donc de choisir une méthode de diagnostic (si la prise de décision déclare que le processus est défaillant.) suivant des critères à savoir:

- la dynamique du système: discrète, continue ou hybride,
- la structure d'implémentation: comparateur, filtre, référence,
- la nature de l'information: quantitative et/ou qualitative,

- la complexité du système: large ou simple,
- la profondeur de l'information disponible sur le système: structurelle, analytique, etc.

### **8.1. Méthodes internes (diagnostic à approches internes)**

Ces méthodes requièrent une connaissance approfondie du fonctionnement sous la forme de modèles mathématiques. Ces derniers doivent être, obligatoirement, validés expérimentalement avant toute tentative d'utilisation industrielle [Zwi, 1995]. Elles utilisent un modèle pour reproduire le comportement du système. Les écarts sont obtenus par comparaison des sorties et des prédictions. Cependant, il est possible de calculer des quantités qui doivent être, toujours, nulles, en fonctionnement nominal, et non nulles en cas de défaillance. Ces quantités sont appelées résidus. En se basant sur les techniques de la décision, sur les techniques de la détection de changement et sur des tests statistiques simples, il serait donc possible de détecter les défauts survenus. Cette catégorie de méthodes se distingue par le biais du modèle exploité, citons comme exemple:

- le modèle de simulation: c'est une description de la structure physique et du comportement du système. Ce modèle est issu du domaine de l'intelligence artificielle et utilise les concepts de base de la commande et de l'identification (modèle de référence, etc.) [Ise, 1993] et [Ise, 1997b].
- les équations de parité: dans ce cas, le modèle repose sur la génération de résidus à partir d'une équation ou d'une relation appelée relation ou équation de parité [Cho et al, 1984], [Ger, 1997] et [Ger, 1998].
- l'estimation paramétrique: c'est la détermination des valeurs de paramètres qui gouvernent le comportement dynamique du système [Ise, 1984].
- les observateurs: le modèle est décrit sous une représentation de variables d'état [Fra, 1990] et [Pat et al, 1997a].

L'analyse du comportement dynamique des estimations des états qui ont un sens physique permet la réalisation du diagnostic.

Ce n'est pas évident de distinguer une méthode interne d'une autre, car toutes les informations exploitées reposent sur la connaissance des entrées, des sorties, des structures et du comportement temporel. Aussi, il existe une équivalence entre l'espace de parité, les observateurs et les estimations de paramètres [Ger, 1995].

En résumé, on peut regrouper les méthodes internes du diagnostic en trois grandes familles, à savoir:

### **1) Méthode à base de modèle**

Les méthodes de diagnostic, à base de modèle, sont développées pour diverses applications et revêtent différentes formes suivant la nature des applications envisagées. Elles consistent à comparer les grandeurs déduites, d'un modèle représentatif du fonctionnement des différentes entités du processus, avec les mesures directement observées sur le processus industriel. En amont du module modélisé, la présence d'un écart fournit l'indication qu'une anomalie est en cours de formation. La profondeur du diagnostic dépend du degré de finesse de la modélisation retenue. Cette dernière (modélisation) est faite, généralement, à l'aide des équations mathématiques de complexité très variée, allant d'un système d'équations aux dérivées partielles aux systèmes d'équations linéaires, dont les coefficients sont déterminés par des techniques d'identification paramétrique à partir d'une série d'expériences menées sur le processus.

### **2) Méthode d'estimation du vecteur d'état**

Cette méthode consiste à représenter les systèmes multi entrées multi sorties (MIMO), par un modèle mathématique, constitué de  $n$  équations différentielles du premier ordre; les  $n$  composantes du vecteur d'état forment un espace à  $n$  dimensions appelé espace d'état. En se basant sur cette représentation d'état, il serait possible alors, de connaître tous les états internes du processus. L'espace d'état a un aspect général, car il peut être utilisé aussi bien pour la représentation des systèmes mono variables que pour la représentation des systèmes multi variables.

### **3) Méthodes d'identification paramétriques**

Ces méthodes ont pour principe général, l'estimation des paramètres internes physiques représentés par un vecteur de paramètres du modèle, à partir de la connaissance des signaux d'entrées et de sorties mesurés sur le processus industriel par des méthodes appropriées. Cependant, pour diagnostiquer, il suffit de suivre l'évolution au cours de temps du paramètre physique concerné et de le comparer à un seuil prédéterminé.

## **8.2. Méthodes externes (diagnostic à approches externes)**

Ces méthodes de diagnostic supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations cause-effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine confrontée au retour d'expérience (acquise par apprentissage), utilisant un module de reconnaissance [Ise, 1997b]. Ce dernier, utilise les observations issues du système, des entrées et des sorties pour enfin trouver la relation cause à effet.

Dans ce cas, toutes les méthodes sont basées sur l'intelligence artificielle et/ou sur les approches probabilistes [Dag et al, 2000] et [Gen et al, 2004]. Les liens de cause à effet doivent être définis par un ensemble d'observations du système en fonctionnement normal et anormal. Le paramètre déterminant, comme présenté dans [Ise, 1998], est l'algorithme de classification utilisé. Généralement, les algorithmes les plus utilisés sont ceux basés sur la classification floue. Parmi eux, on peut citer les méthodes de Reconnaissance de Formes (RdF) [Dub, 1990]. Elle consiste à choisir un espace de représentation du système puis réaliser l'acquisition d'un grand nombre de données de divers modes de fonctionnement. Appelons ces données ou observations l'ensemble d'apprentissage. Si les modes de fonctionnement (ou classes) sont connus, alors l'appartenance de chaque observation est connue. Le problème qui se pose est de définir à partir de ces connaissances un procédé de discrimination qui permet de déterminer la classe d'une observation non contenue dans la base d'apprentissage. Ce problème est équivalent à la recherche des frontières entre les classes qui minimisent l'erreur de classification [Dub, 1989].

## **8.3. Méthodes inductive et déductive (méthodes cause- effet)**

Pour remonter à la cause de la défaillance, deux types de méthodes sont adoptés:

- les méthodes inductives correspondant à une approche montante où l'on identifie toutes les combinaisons d'événements élémentaires possibles qui entraînent la réalisation d'un événement unique indésirable.
- les méthodes déductives où la démarche est inversée car de l'événement indésirable par approche descendante où on recherche toutes les causes possibles.

## **9. Dilemme commande-diagnostic**

Les systèmes de contrôle ont pour but de permettre d'assurer la stabilité des procédés, de minimiser l'influence de perturbations ou des défauts et d'optimiser les performances

globales. Le but de la commande est de maintenir certaines variables au voisinage de leur valeur désirée appelée consigne ou référence qui peut être fixe ou variable. Cependant, le diagnostic est de signaler et de localiser la présence de défauts, agissant sur le système dès leur apparition afin d'entreprendre des actions appropriées (à savoir la maintenance) pour éviter une perte totale du système qui peut survenir suite à un défaut critique par exemple.

### Constations

*Ce dilemme entre (commande – diagnostic) peut être expliqué par:*

*La commande est souvent calculée de façon à avoir un comportement entrée-sortie satisfaisant*

*la contrainte suivante:  $\lim_{t \rightarrow \infty} (v(t) - y(t)) = 0 \quad \forall f(t), d(t)$*

*où  $v(t)$  est l'entrée de référence,  $y(t)$  les sorties contrôlées,  $d(t)$  des perturbations et  $f(t)$  les défauts. La génération de résidus s'appuie sur l'écart entre la référence et la sortie contrôlée, écart qui affirme qu'un défaut est survenu lorsqu'il est non nul. L'objectif de la commande est alors, de réduire voire même d'annuler cet écart, et là le diagnostic devient difficile à établir. En effet, un faible écart de la sortie contrôlée par rapport à la référence ne peut se traduire par l'absence de défauts, mais par une commande efficace.*

## **10. Caractérisation de la démarche de diagnostic**

Le diagnostic de défaillance ou d'une dégradation fait appel, le plus souvent, à l'utilisation de signatures élaborées à partir des signaux préalablement validés. Ces signatures contiennent les informations jugées pertinentes par les spécialistes du système pour la détection d'une défaillance ou d'une dégradation. La complexité des signatures dépend de la nature des systèmes et de matériels à diagnostiquer et varie en fonction de l'anomalie recherchée.

### **10.1. Détection des défauts**

La détection de défaut est définie par la génération de symptômes, à partir des observations et des modèles de comportements disponibles; leurs déterminations apportent plus d'informations que celle de défaillances, pour remonter aux éléments défaillants d'un système physique.

Un défaut est, généralement, perçu comme une déviation dans les caractéristiques attendues du processus lui-même. Si ces déviations influent sur les variables mesurées, elles doivent pouvoir être détectées à l'aide de procédures adéquates d'évaluation de signal, où les

variables mesurées sont simplement comparées à certains seuils limites et les alarmes sont déclenchées, si les limites sont dépassées.

Suite à ces alarmes, l'opérateur met en œuvre les actions nécessaires pour ramener les variables, mises en cause, dans leurs plages de fonctionnement normales. Dans le cas où les violations de ces limites entraînent le système dans un état présentant un danger (pour lui-même ou pour son environnement), une action appropriée peut être effectuée automatiquement pour garantir la sécurité.

Elle se fait alors, par le suivi du changement de l'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs de références (valeurs nominales). Ces changements sont traduits en termes de symptômes ou d'événements.

#### **10.1.1. Objectifs de la détection de défauts**

La détection de défauts appliquée aux processus vise à assurer un fonctionnement acceptable en assurant la qualité du produit, en évitant la détérioration de l'équipement, en augmentant la disponibilité des processus et en contournant les instabilités et les arrêts non planifiés.

#### **10.1.2. Méthode de détection de défaut**

La stratégie de diagnostic et la forme sous laquelle la connaissance est disponible conditionnent les méthodes utilisées pour concevoir les algorithmes de surveillance. Le critère principal de classification des méthodes de surveillance est basé sur le type de la connaissance. On distingue deux types d'approches: les méthodes utilisant des modèles opératoires et celles utilisant des modèles de diagnostic, connues souvent sous le nom de méthodes sans ou avec modèle.

##### **10.1.2.1. Méthode de détection de défaut sans modèle**

Décrites par un certain nombre de réalisations, les méthodes sans modèle comme l'indique leur nom, ne disposent pas de modèle opératoire. Autrement dit, on ne dispose pas de modèle décrivant le comportement normal et les comportements défailants du système. Les méthodes utilisées font alors appel à des procédures d'apprentissage et de reconnaissance de formes [Dub, 1990], [Den, 1997] et [Bou et al, 2000] ou à l'intelligence artificielle [Gen, 1995]. Elles sont utilisées dans le cas de systèmes complexes traitant des données très variées

(analogique, numérique..) ou imprécises (bruit de mesure), dont l'objectif consiste à classer automatiquement des formes dans des modes (classes) connues a priori. Par conséquent, ces méthodes doivent connaître a priori tous les états de fonctionnement (normal et en faute).

La conception d'un système de diagnostic sans modèle se déroule en trois phases:

***i. Phase d'analyse.***

Cette phase consiste à rassembler toutes les informations existantes sur le processus: les données des différents capteurs, les modèles des dispositifs, l'historique et l'expérience accumulée. A partir de cette phase, on doit obtenir une définition précise des paramètres à observer ou qui représentent les modes de fonctionnement. Une suite d'observations du même mode ne se trouve pas en un seul point, mais occupe une zone de l'espace des observations due au bruit inhérent au niveau des différentes mesures.

Il s'agit donc d'associer à chaque forme observée un mode ou une classe. Après avoir représenté les modes par des paramètres significatifs, on essaye d'avoir le maximum de données sur chacun des modes observables; c'est la phase d'apprentissage.

***ii. Phase de choix d'un système de détection.***

Les frontières entre les classes sont définies dans cette phase. Un système de décision capable de décider de l'appartenance ou non d'une nouvelle observation à une des classes existantes est créé. De nombreuses solutions servant à définir le système de décision peuvent être retenues [Dub, 1990]. D'une manière non exhaustive, il existe les méthodes de discrimination paramétrique avec rejet (supposant la connaissance totale des lois de probabilité régissant les observations et appliquées sous l'hypothèse gaussienne avec estimation des paramètres), les méthodes de discrimination non paramétrique (les lois de probabilité dans chaque classe sont inconnues mais peuvent être estimées par la méthode des plus proches voisins ou autre), les méthodes qui utilisent le concept de distance (paramétrique ou non) et les méthodes recherchant les équations de frontières (délicate et largement heuristique).

***iii. Phase d'exploitation.***

C'est la phase d'implémentation du système de diagnostic afin de proposer une décision pour toute nouvelle observation effectuée. Le système doit adapter sa règle de décision en fonction des nouvelles classes détectées.

#### **10.1.2.2. Méthodes avec modèles**

Cette deuxième famille se base sur l'existence de redondance matérielle ou analytique pour caractériser le mode de fonctionnement ou l'état du système. Le principe de redondance

consiste à déterminer la valeur des variables par différentes manières et à analyser si les résultats coïncident.

**L**a redondance physique consiste à utiliser plusieurs capteurs afin de mesurer la même variable [Cho, 1980] et [Pat et al, 1993]. Ces capteurs indiquent en fonctionnement normal la même valeur aux bruits et imprécisions de mesure près. Une duplication des capteurs est nécessaire pour la détection de pannes simples. Cependant, la localisation de la défaillance exige un minimum de capteurs.

**E**lle est plus simple et consiste à doubler ou même tripler les composants critiques d'une installation. Un traitement des signaux, issus des composants redondants, effectue des comparaisons pour détecter voire localiser l'élément défectueux; si ces composants identiques placés dans le même environnement émettent des signaux identiques, on considère qu'ils sont à l'état sain, et dans le cas contraire on considère qu'une panne s'est produite dans, au moins, une des composants [Zha et al, 1999a] et [Zha et al, 1999b].

**C**ette méthode a l'avantage d'être fiable et conceptuellement simple, mais en contrepartie, elle est pénalisante en termes de poids, de puissance consommée, de volume et de coût (d'achat et de maintenance). De plus, les composants identiques fabriqués dans la même série peuvent se dégrader de la même façon et tomber en panne en même temps. Pour pallier à ce dernier inconvénient, on peut utiliser des différents composants qui remplissent la même fonction [Zha, 1999a].

**C**ontrairement à la redondance matérielle, la redondance analytique consiste à utiliser les relations analytiques existantes entre les mesures de grandeurs dépendantes, qu'elles soient ou non de même nature. Cette méthode ne peut être mise en œuvre que si l'on dispose d'un modèle du système à surveiller ou à superviser, statique ou dynamique, linéaire ou non linéaire, déterministe ou stochastique ou du sous-système reliant les entrées et les sorties mesurées. Ce modèle comprend un certain nombre de paramètres dont les valeurs sont supposées connues lors du fonctionnement nominal.

**L**a technique de cette méthode permet une exploitation optimale de toutes les informations acquises dans le cadre d'une configuration d'instrumentation donnée. Dans la mesure où la surveillance est établie à partir des mesures échantillonnées des grandeurs observables du système, la modélisation de ce dernier sous forme discrète semble être raisonnable. De plus, dans le cas où le système présente un caractère non linéaire, il est possible, afin de disposer d'un modèle plus simple, d'opérer par une linéarisation autour d'un point de fonctionnement.

La redondance analytique, dont l'utilisation permet la détection et la reconnaissance de défauts de fonctionnement de façon à effectuer des actions correctives appropriées, repose sur des relations de cause à effet, statiques ou dynamiques, qui existent entre les entrées et les sorties observées d'un système.

Enfin, ces deux types de redondance sont complémentaires et plusieurs travaux leurs sont consacrés. [Ise, 1984], [Fra, 1990], [Rag et al, 1994], [Maq et al, 2000] et [Coc, 2004] etc.

## **10.2. Localisation de défaut**

C'est le deuxième niveau du diagnostic, déclenché par une procédure de détection, consistant à déterminer, de manière plus approfondie, les composants défaillants. Lorsqu'un défaut est détecté, il est nécessaire d'identifier la ou les variables qui sont en cause: c'est la localisation de défauts. Pour réaliser cette tâche, plusieurs méthodes ont été développées, parmi celles-ci, on retrouve trois approches concernant la localisation de défauts par l'analyse en composantes principales [Har, 2003].

## **10.3. Identification de défaut**

L'identification est le troisième niveau de diagnostic consistant à caractériser précisément les anomalies qui se sont produites. Il s'agit de déterminer son ampleur c'est-à-dire sa taille (amplitude), son évolution (forme,...).

## **10.4. Prise de décision**

La prise de décision est en fonction des défaillances conséquentes et des dégradations. Elle peut conduire ; soit à l'arrêt de l'installation, suivi d'une maintenance si les conséquences de la défaillance sont importantes pour la sécurité des personnes et des biens, soit à la reconfiguration du fonctionnement du procédé, pour éviter une perte de production en attendant le prochain arrêt de production le plus propice aux opérations de maintenance corrective.

D'un point de vue pratique, la logique de décision par seuil joue un rôle important car la plupart des méthodes citées se ramènent, à terme, à un seuillage. Si le seuil choisi est constant, les entrées inconnues qui excitent le système perturbent la décision. Si le seuil est choisi trop petit, on observe beaucoup de fausses alarmes et s'il est trop grand, les défauts de faible

amplitude ne sont pas détectés. Il est donc intéressant d'utiliser des seuils adaptatifs qui évoluent en fonction du point de fonctionnement du processus surveillé.

### **10.5. Validation des résultats**

L'une des principales difficultés de la validation des résultats obtenus par une algorithmique de surveillance réside dans le fait que, pour beaucoup de systèmes réels, on dispose de très peu, voire pas du tout, de données correspondant à des défaillances effectives. On doit donc, souvent, se contenter d'une validation par simulations effectuées à l'aide d'un simulateur plus ou moins réaliste de l'application envisagée, à moins que l'on ait la chance de disposer d'une maquette, plate-forme ou site expérimental; encore faut-il que ce dernier puisse supporter lui aussi des défaillances non triviales à détecter. [Bas et al, 1996]

## **11. Conclusion**

Afin de mettre en exergue l'intérêt de nos travaux, nous avons exposé les différents travaux de recherche effectués dans le domaine de diagnostic des systèmes industriels. Dans un premier temps, nous avons présenté quelques notions et définitions qui seront abordées dans ce travail, puis une synthèse bibliographique des approches traitant le diagnostic des systèmes non linéaires a été abordée.

En vue de présenter les méthodes développées dans le cadre de cette thèse qui feront l'objet du chapitre 3, nous allons présenter dans le chapitre 2 les notions de bases de la logique floue avec ses deux types ainsi que la commande par modes glissants.

# Chapitre 2. Généralités sur la logique floue et les modes glissants

## 1. Introduction

Devant la complexité croissante des systèmes industriels, les méthodes de commande classiques deviennent de plus en plus difficiles à utiliser surtout si les paramètres du système sont totalement ou partiellement inconnus. Pour remédier à ce problème, on peut réduire le domaine d'application de la commande de telle sorte qu'on puisse avoir certaines propriétés simplificatrices et ainsi pouvoir utiliser les méthodes classiques. Néanmoins, on est confronté, dans ce cas, à une réduction de l'intervalle de fonctionnement, alors que la flexibilité est un élément important dans l'industrie moderne.

Présentées comme une interprétation de l'expertise humaine, l'intelligence artificielle a été introduite dans les années 70 et plus particulièrement la logique floue. L'objectif est d'exploiter le savoir-faire de l'opérateur humain sans pour autant disposer d'une modélisation mathématique exacte du processus à commander. Ainsi, plusieurs applications industrielles utilisant la logique floue ont vu le jour malgré la réticence des automaticiens qui reprochent à la logique floue la rigueur analytique (stabilité, observation).

C'est dans les années 90 où J. Mendel et L.-X Wang ont présenté leur théorème sur l'approximation universelle, ils ont prouvé que toute fonction non linéaire continue sur un intervalle compact peut être approximée à un degré donné par un système flou [Wan, 1992]. Utilisant un système flou de type Tagagi- Sugeno à conclusion constante, ce théorème a permis de développer plusieurs lois de commande exploitant les techniques de l'automatique classique comme la commande adaptative, les modes glissants, techniques  $H^\infty$ , etc.

Dans ce chapitre, nous présenterons un bref aperçu sur la logique floue suivi de la logique floue de type-2 qui représente une généralisation d'ordre 2. En effet, dans la logique floue dite classique ou de type-1, les entrées sont considérées comme des valeurs réelles certaines. Or, en réalité, ces valeurs sont entachées d'erreurs de mesures et d'incertitudes. De plus, la base de règles utilisées est basée sur l'expertise humaine qu'on suppose fiable alors qu'en réalité elle diffère d'un opérateur à un autre. Pour prendre en compte toutes ces informations, la logique floue de type-2 a été introduite où les entrées sont des variables floues. Nous allons également présenter la commande adaptative floue qui nous permet d'adapter en

temps réel les conclusions des règles flous afin d'améliorer les performances de notre commande en présence de variations paramétriques. Néanmoins, en présence de perturbations externes cette commande ne peut assurer la stabilité du système en boucle fermée et les performances de poursuite. Pour cela, nous allons introduire la commande par modes glissants classiques pour un système non linéaire affine en commande soumis à des variations paramétriques et des perturbations externes. Pour chaque technique, nous présenterons des résultats de simulations pour montrer ses avantages et ses inconvénients pour justifier nos choix en terme de commande.

## **2. Généralités sur la logique floue**

Les bases théoriques de la logique floue ont été établies dans les années 60 par le professeur Lotfi A. Zadeh [Zad, 1965]. Cette logique permet d'exploiter les informations linguistiques de l'expert humain et décrivant le comportement dynamique d'un processus ou la stratégie de sa commande. Son intérêt réside dans sa capacité à traiter et à manipuler l'imprécis et l'incertain. Cette capacité est issue de l'aptitude de l'être humain à décider d'une façon pertinente malgré la nature floue des connaissances disponibles. En effet, l'opérateur humain peut définir des stratégies de commande de façon linguistique avec un minimum de connaissance sur le processus. La logique floue traduit cette stratégie en un ensemble de règles de la forme:

Si « Observation », Alors « Décision » ou Si « Prémisse », Alors « Conclusion », qui peuvent être utilisées pour l'identification des systèmes comme pour leurs commandes.

Enfin, la logique floue simplifie la description du comportement global du système et utilise sa description sous forme linguistique. Elle est bien connue pour ses applications dans le contrôle- commande des procédés par sa mise en œuvre à moindre frais de calcul.

## **3. Concepts de base de la logique floue**

La plupart des systèmes non linéaires sont modélisables sous des hypothèses, parfois très restrictives, qui rendent difficiles la mise en œuvre des schémas de commande résultants et leur application. Il est donc nécessaire de prendre en compte toutes les informations imprécises et incertaines relatives au système. La théorie des sous-ensembles flous, a permis de traiter les imprécisions et les incertitudes. De nombreuses applications sont alors développées dans divers domaines, surtout pour les processus dont la modélisation est complexe ou impossible.

### 3.1. Variables linguistiques et ensembles flous

La description imprécise d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'une grandeur physique ne peut se faire que par des expressions relatives ou floues. Ces différentes classes d'expressions floues dites ensembles flous forment ce qu'on appelle des variables linguistiques. Afin de pouvoir traiter numériquement ces variables linguistiques qui sont normalisées généralement sur un intervalle bien déterminé appelé univers de discours, il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables linguistiques relativement aux différents sous-ensembles flous de la même classe.

Une variable linguistique permet donc, d'une part, de synthétiser l'information manipulée grâce à ces derniers et, d'autre part, de représenter des concepts imprécis tels que l'homme en manipule quotidiennement. La détermination de la forme et de la position de ces sous-ensembles flous sont définis a priori par des experts du domaine afin qu'ils représentent exactement leurs connaissances. Cependant, il n'est pas toujours possible d'obtenir une telle expertise, que ce soit à cause de la complexité du problème ou bien parce que les experts sont trop rares voire inexistants. Dans ces conditions, des algorithmes peuvent être mis en œuvre pour les extraire automatiquement. Une expertise du résultat peut éventuellement être faite par la suite afin de déterminer la signification des sous-ensembles flous obtenus. [Meu, 1995], [Men, 2000], [Men, 2001] et [Ber et al, 2003].

Alors, chaque ensemble flou peut être représenté par sa fonction d'appartenance. Les fonctions d'appartenance peuvent être symétriques, régulièrement distribuées ou avoir une distribution non uniforme. En général, la forme des fonctions d'appartenance dépend de l'application et de la grandeur à traiter et peuvent avoir différentes formes:

Fonction triangulaire, fonction gaussienne, trapézoïdale ou sigmoïdale. Figure 2.1

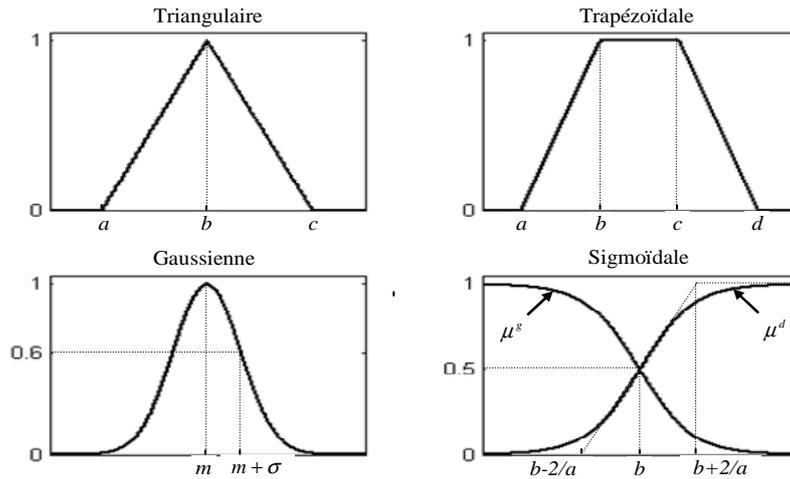


Figure 2. 1: Représentation des différentes fonctions d'appartenance.

### 3.2. Généralités sur la logique floue type-1

Les systèmes flous permettent d'exploiter et de manipuler efficacement les informations linguistiques émanant de l'expert humain grâce à un fondement théorique important [Ibr, 2004] et [Jan, 2007]. En plus, le système mis en œuvre peut être intégré facilement dans une boucle de commande ou d'identification. La structure de base d'un système flou se divise en trois parties principales à savoir: la fuzzification, l'inférence et la défuzzification. Figure 2.2.

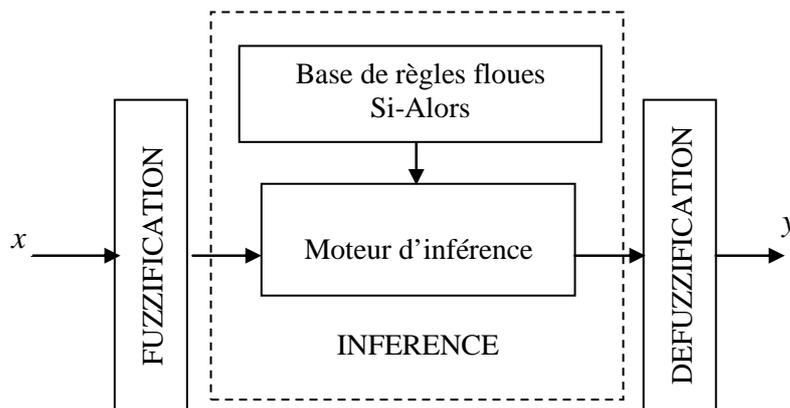


Figure 2. 2: Système flou.

#### 3.2.1. Fuzzification

L'entrée  $x$  varie dans un domaine appelé univers de discours  $X$ , divisé en un nombre fini d'ensembles flous, de telle sorte que, dans chaque zone il y a une situation dominante. Afin

de faciliter le traitement numérique et l'utilisation de ces ensembles, on les décrit par des fonctions d'appartenance. Ces dernières admettent comme argument la position de  $x$  dans l'univers de discours, et comme sortie le degré d'appartenance de  $x$  à la situation décrite par la fonction.

Il est à noter qu'il existe une autre forme de fonctions d'appartenance appelée singleton qui est largement utilisée dans les systèmes flous de type Takagi-Sugeno (TS). Cette fonction est définie par:  $\mu(x) = 1$  si  $x = x_0$  et  $\mu(x) = 0, \forall x \neq x_0$  où l'ensemble se limite à un seul élément  $E = \{x_0\}$ . La Figure 2.3 donne un exemple de représentation d'une fonction d'appartenance singleton.

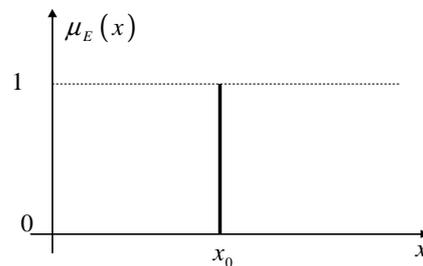


Figure 2. 3: Représentation d'un singleton.

La fuzzification consiste alors à définir des fonctions d'appartenance pour les différentes variables linguistiques. Son but est la conversion d'une grandeur physique en une linguistique. Il s'agit d'une projection de la variable physique sur les 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.

### 3.2.2. Inférence

Les connaissances de l'opérateur humain sur un processus donné sont transformées en un ensemble de règles floues de la forme suivante:

**Si** prémisse **Alors** conclusion (2-1)

où la prémisse est un ensemble de conditions liées entre elles par des opérateurs flous.

La partie conclusion peut être une description d'évolution dans le cas d'identification ou une action dans le cas de commande. Les opérateurs flous utilisés dans la partie prémisse sont les conjonctions: "ET" et "OU".

L'interprétation de ces conjonctions dépend directement du type de moteur d'inférence adopté [Buh, 1994] et [Yin, 2000]. La relation entre la prémisse et la conclusion "Alors" peut être traduite par le produit ou le minimum.

Dans ce travail, on s'intéressera aux systèmes flous de type Takagi-Sugeno à conclusion constante dont la  $j^{\text{ème}}$  règle floue est donnée par:

$$\text{SI } x_1 \text{ est } E_1^j \text{ ET } x_2 \text{ est } E_2^j \text{ ET... ET } x_n \text{ est } E_n^j \text{ ALORS } u_j = c^j \quad (2-2)$$

où  $x_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) sont les entrées du système flou,  $E_i^j$  est l'ensemble flou correspondant à l'entrée  $x_i$ ,  $c^j$  est un singleton et  $u_j$  est la sortie de la  $j^{\text{ème}}$  règle. L'opérateur "ET" est interprété par le produit algébrique et "Alors" par le produit.

La sortie du système flou fait intervenir, généralement, plusieurs règles floues. La liaison entre ces dernières se fait par l'opérateur "OU". Ainsi, la conclusion finale  $u$  sera donnée par:

$$u \text{ est : } u_1 \text{ OU } u_2 \text{ OU... OU } u_m \quad (2-3)$$

L'agrégation des règles définie par "OU" est obtenue par la somme algébrique.

### 3.2.3. Défuzzification

La commande nécessite un signal numérique, il faudra donc transformer la fonction d'appartenance résultante obtenue à la sortie du moteur d'inférence en une valeur précise. Cette opération est appelée défuzzification. Parmi les méthodes utilisées dans la littérature [Buh, 1994], [Pas, 1998] et [Yin, 2000] on trouve:

- i) le centre de gravité,
- ii) la méthode de la moyenne des centres.

Dans ce travail, on utilisera le centre de gravité qui permet d'exprimer analytiquement la sortie du système flou, de simplifier sa mise en œuvre et de réduire le temps de calcul [Pas, 1998]. Dans ce cas, la sortie du système flou de type Takagi-Sugeno est donnée par:

$$u = \frac{\sum_{j=1}^m c^j \prod_{i=1}^n \mu_i^j}{\sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_i^j} \quad (2-4)$$

où  $n$  et  $m$  sont respectivement le nombre d'entrées et celui de règles floues utilisées.

### 3.3. Généralités sur la logique floue type-2

Le concept des ensembles flous type-2 a été introduit aussi par Zadeh [Zad, 1975] et [Joh, 2007] comme extension du concept de l'ensemble flou ordinaire appelé ensemble flou type-1. Un ensemble flou type-2 est caractérisé par une fonction d'appartenance floue, c'est à dire, la valeur d'appartenance (degré d'appartenance) de chaque élément de l'ensemble est un ensemble flou dans  $[0, 1]$ . De tels ensembles peuvent être utilisés dans les situations où nous avons de l'incertitude sur les valeurs d'appartenance elles-mêmes. L'incertitude peut être soit dans la forme de la fonction d'appartenance ou dans l'un de ses paramètres.

Considérons la transition des ensembles ordinaires vers les ensembles flous. Lorsque nous ne pouvons pas déterminer le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble par 0 ou 1, on procède par les ensembles flous type-1. De même, lorsque nous ne pouvons pas déterminer les fonctions d'appartenance floues par des nombres réels dans  $[0, 1]$ , on a recours alors aux ensembles flous type-2. De ce fait, les ensembles flous type-1 peuvent être considérés comme une approximation du premier ordre de l'incertitude, alors que les ensembles flous type-2 seront considérés comme une approximation du deuxième ordre.

#### 3.3.1 Structure d'un système flou type-2

La structure d'un système flou type-2 est représentée par la Figure 2.4, [Hag, 2007]. Nous supposons que les fonctions d'appartenance des prémisses et des conséquences sont de type-2.

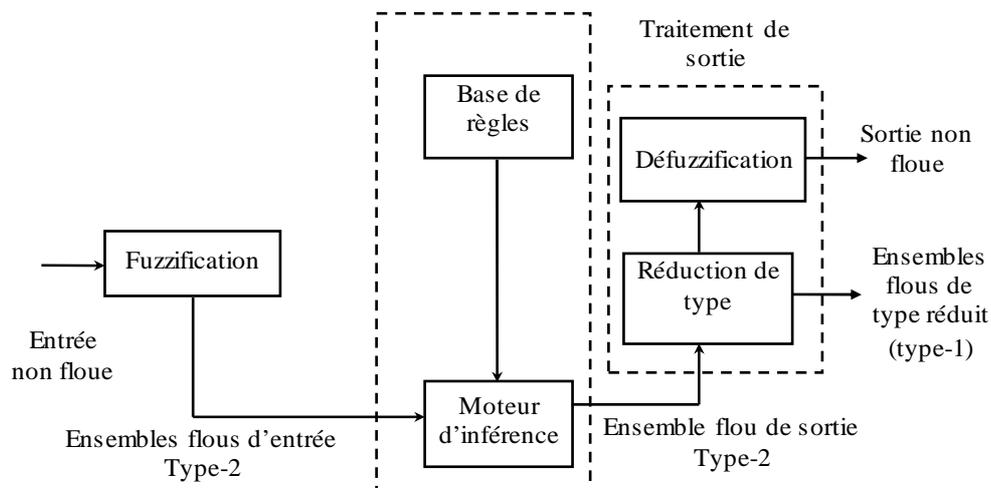


Figure 2. 4: Structure d'un système flou type-2, avec ses deux sorties.

### 3.3.2. Fuzzification

Dans ce cas, la fonction d'appartenance type-2 donne plusieurs degrés d'appartenance pour chaque entrée. Par conséquent, l'incertitude sera mieux représentée. Pour mieux expliquer cet aspect, considérons une fonction gaussienne avec:

- i) une incertitude au niveau de la variance (Figure 2.5),
- ii) une incertitude au niveau du centre (moyenne) (Figure 2.6).

Prenons comme exemple uniquement deux degrés; le plus grand et le plus petit. Mathématiquement, pour une entrée  $x$  nous aurons  $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$  et  $\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$  tels que,  $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$  et  $\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$  sont respectivement les valeurs minimale et maximale de l'intervalle d'activation correspondant à l'entrée  $x$ .

Si  $x = 4$  choisie comme entrée, donc nous aurons  $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) = 0.05$  et  $\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x) = 0.45$  (selon la Figure 2.5) ou  $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) = 0.29$  et  $\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x) = 0.69$  (selon la figure (Figure 2.6)).

Les figures (Figure 2.5 et Figure 2.6) montrent aussi la construction d'un ensemble flou type-2 à partir d'un ensemble flou type-1.

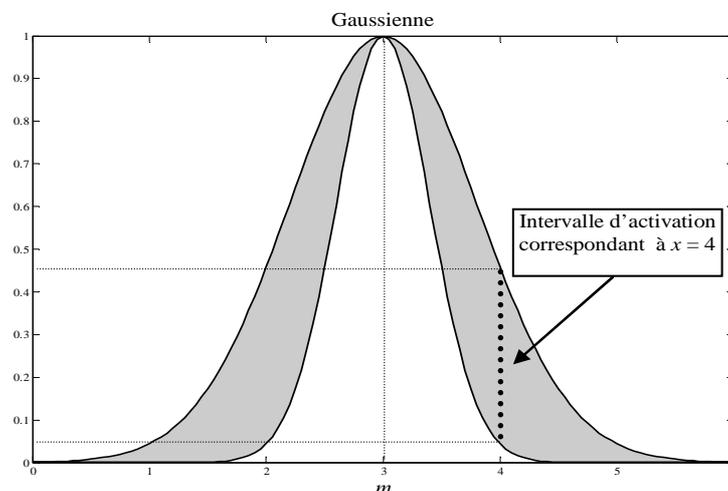


Figure 2. 5: Ensemble flou type-2 représentant un ensemble flou type-1 avec une incertitude de variance appartenant à l'intervalle  $[0.05; 0.45]$  pour  $x=4$ .

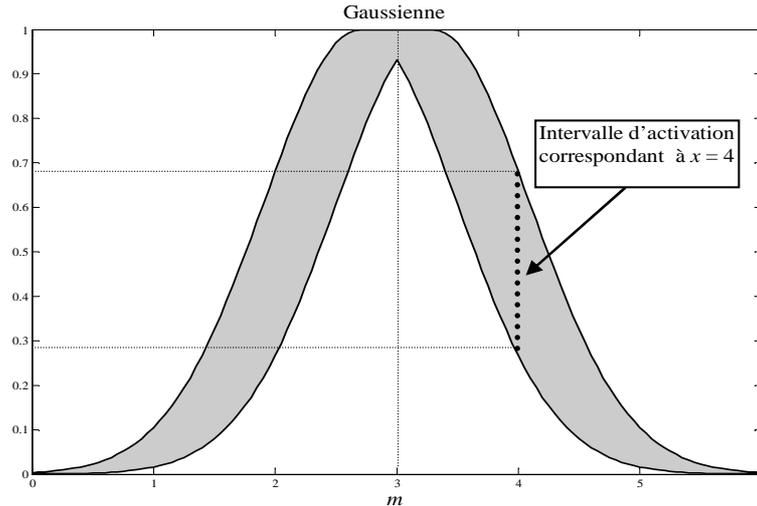


Figure 2. 6: Ensemble flou type-2 représentant un ensemble flou type-1 avec une incertitude de valeur moyenne appartenant à l'intervalle [0.29; 0.69] pour  $x=4$ .

### 3.3.3. Inférence

La nature des fonctions d'appartenance montre la différence entre le type-1 et le type-2. Ainsi, la structure des règles dans le cas du type-2 reste la même que celle du type-1. La seule différence est que toutes ou quelques fonctions d'appartenance seront de type-2, alors, la  $j^{\text{ème}}$  règle d'un système flou type-2 prendra la forme suivante: [Men, 2002], [Cha, 2006] et [Cas et al, 2008]

$$\text{SI } x_1 \text{ est } \tilde{E}_1^j \text{ ET } x_2 \text{ est } \tilde{E}_2^j \text{ ET... ET } x_n \text{ est } \tilde{E}_n^j \text{ ALORS } u_j = \tilde{c}^j \quad (2-5)$$

où  $x_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) sont les entrées du système flou,  $\tilde{E}_i^j$  est l'ensemble flou de type-2 correspondant à l'entrée  $x_i$ ,  $\tilde{c}^j$  est un singleton de type-2 et  $u_j$  est la sortie de la  $j^{\text{ème}}$  règle. L'opérateur "ET" est interprété par le produit algébrique et "Alors" par le produit.

Condition nécessaire et suffisante; pour qu'un système soit de type-2, il faut et il suffit d'avoir au moins une seule fonction d'appartenance dont une prémisse ou une conséquence soit de type -2.

Dans cette étape d'inférence le degré d'activation correspondant à la  $j^{\text{ème}}$  règle sera donné alors par :

$$E^j(x^o) = \left[ \underline{e}^j(x^o), \bar{e}^j(x^o) \right] \equiv \left[ \underline{e}^j, \bar{e}^j \right] \quad (2-6)$$

où  $\underline{e}^j(x^o)$  et  $\bar{e}^j(x^o)$  peuvent être écrits sous la forme:

$$\underline{e}^j(x^\circ) = \underline{\mu}_{\tilde{A}_1^j}(x_1^\circ) * \dots * \underline{\mu}_{\tilde{A}_n^j}(x_n^\circ) = \prod_{i=1}^n \underline{\mu}_{\tilde{A}_i^j}(x_i^\circ) \quad (2-7)$$

$\underline{\mu}_{\tilde{A}_i^j}(x_i^\circ)$  est la valeur minimale de l'intervalle d'activation correspondant à  $x = x_i^\circ$ .

$$\bar{e}^j(x^\circ) = \bar{\mu}_{\tilde{A}_1^j}(x_1^\circ) * \dots * \bar{\mu}_{\tilde{A}_n^j}(x_n^\circ) = \prod_{i=1}^n \bar{\mu}_{\tilde{A}_i^j}(x_i^\circ) \quad (2-8)$$

$\bar{\mu}_{\tilde{A}_i^j}(x_i^\circ)$  est la valeur maximale de l'intervalle d'activation correspondant à  $x = x_i^\circ$  et \* représente l'opérateur de multiplication.

Enfin, l'équation (2-6) sera réécrite comme suit:

$$\left[ \underline{e}^j(x^\circ), \bar{e}^j(x^\circ) \right] \equiv \left[ \underline{e}^j, \bar{e}^j \right] = \left[ \prod_{i=1}^n \underline{\mu}_{\tilde{A}_i^j}(x_i^\circ), \prod_{i=1}^n \bar{\mu}_{\tilde{A}_i^j}(x_i^\circ) \right] \quad (2-9)$$

### 3.3.4. Réduction de type

Pour obtenir la sortie non floue ou bien la sortie ordinaire Y, l'ensemble flou type-2 est transformé en un ensemble flou type-1 utilisant la méthode des centres d'ensembles, [Men, 2007]. Mendel et Karnik ont proposé l'équation (2-10) pour faire cette réduction [Kar, 1999]:

$$Y(C^1, \dots, C^M, E^1, \dots, E^M) = \int_{C^1} \dots \int_{C^M} \int_{E^1} \dots \int_{E^M} 1 / \frac{\sum_{j=1}^M \tilde{c}^j e^j}{\sum_{j=1}^M e^j} = [c_L, c_R] \quad (2-10)$$

où Y est l'ensemble de type réduit caractérisé par ses deux points: à gauche  $y_l$  et à droite  $y_r$ ,

$\tilde{c}^j$  est un élément de l'intervalle type-2  $C^j = [c_L^j, c_R^j]$ .

$e^j$  est un élément de l'intervalle d'activation  $E^j = [\underline{e}^j, \bar{e}^j]$ .

### 3.3.5. Défuzzification

Le type réduit par (2-10) sera déterminé par les points le plus à droite et le plus à gauche, respectivement,  $y_l$  et  $y_r$ . En utilisant le centre de gravité, la sortie non floue sera donnée par [Cha, 2006]:

$$Y = \frac{y_l + y_r}{2} \quad (2-11)$$

$y_l$  peut-être écrit comme un vecteur de Fonctions à Base Floue (FBF):

$$y_l = \frac{\sum_{j=1}^M c_l^j e_l^j}{\sum_{j=1}^M e_l^j} = \sum_{j=1}^M c_l^j \xi_l^j = \underline{c}_l^T \underline{\xi}_l(x) \quad (2-12)$$

où

$e_l^j$  est le degré d'activation (soit  $e_l^j$  ou  $e_l^{-j}$ ),

$\underline{\xi}_l(x) = [\xi_l^1, \dots, \xi_l^M]$ , et

$\underline{c}_l^T = [c_l^1, \dots, c_l^M]$  est la conclusion de système floue type-2.

$$\xi_l^j = \frac{e_l^j}{\sum_{j=1}^M e_l^j} \quad (2-13)$$

De même pour,

$$y_r = \frac{\sum_{j=1}^M c_r^j e_r^j}{\sum_{j=1}^M e_r^j} = \sum_{j=1}^M c_r^j \xi_r^j = \underline{c}_r^T \underline{\xi}_r(x) \quad (2-14)$$

avec,

$$\xi_r^j = \frac{e_r^j}{\sum_{j=1}^M e_r^j} \quad (2-15)$$

Enfin, la sortie non floue donnée par (2-11) peut être réécrite comme suit:

$$Y = \frac{\underline{c}_l^T \underline{\xi}_l + \underline{c}_r^T \underline{\xi}_r}{2} \quad (2-16)$$

## 4. Commande adaptative floue type-1

### 4.1. Généralités

La commande adaptative permet de maintenir les performances quand la dynamique du système à commander varie dans le temps, [Dum, 2006]. Les paramètres sont adaptés de manière à poursuivre le système dans son évolution [Bab et al, 1997] et [Kim et al, 1997].

Il est à noter que les propriétés de stabilité, de convergence et de robustesse des algorithmes d'adaptation doivent être convenablement choisies en fonction des circonstances

et de l'environnement dans lequel s'effectue l'expérience [Lan et al, 1997] et [Lag et al, 2007a]. Cette approche comprend plusieurs 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 ou variants dans le temps. Deux approches de commande adaptatives principales sont distinguées:

***i) Commande adaptative indirecte***

Les paramètres du procédé sont estimés par la procédure d'identification, c'est le cas des régulateurs auto ajustables. Cette approche s'effectue en deux étapes: estimation des paramètres du modèle, puis calcul des paramètres du contrôleur à partir des paramètres estimés.

***ii) Commande adaptative directe***

Les paramètres du régulateur sont ajustés directement, en temps réel, à partir des comparaisons entre les performances du système et les performances désirées.

Elle conduit directement à l'estimation des paramètres de la loi de commande. Ce type de schémas est obtenu en réécrivant le modèle du processus en fonction des paramètres de la loi de commande.

***Remarque:*** Le principe d'une commande adaptative, c'est d'ajuster en ligne les paramètres du contrôleur afin d'assurer les performances du système désirées. Comme c'est difficile de décrire un système complexe par des fonctions connues qui découlent d'une analyse physique. Alors, il faut faire recours aux systèmes flous dans le schéma de commande adaptative, qui fera l'objet de la partie suivante [Gue et al, 2001].

Dans ce qui suit, nous étudierons la commande adaptative floue d'un système non linéaire mono entrée- mono sortie (SISO) dont la dynamique est donnée par le système d'équations différentielles suivantes:

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} = \underline{f}_s(\underline{x}) + \underline{g}_s(\underline{x})u \\ y = h(\underline{x}) \end{cases} \quad (2-17)$$

où  $\underline{f}_s(\underline{x}) \in \mathfrak{R}^n$ ,  $\underline{g}_s(\underline{x}) \in \mathfrak{R}^n$  et  $h(\underline{x}) \in \mathfrak{R}$  sont des fonctions non linéaires continues,  $u \in \mathfrak{R}$  et  $y \in \mathfrak{R}$  représentent respectivement l'entrée et la sortie du système. Le vecteur d'état étant:  $\underline{x} = [x_1, \dots, x_n]^T \in \mathfrak{R}^n$ .

La structure du système (2-17) ne permet pas d'avoir une relation directe entre l'entrée  $u$ , et la sortie du système, ce qui rend la mise en œuvre d'une commande en poursuite d'une trajectoire de référence difficile. Pour remédier à ce problème plusieurs solutions ont été

présentées dans la littérature [Isi, 1989] et [Kha, 1996]. Une des approches, consiste à transformer le système (2-17) sous forme normale en utilisant la représentation entrée sortie. D'après les travaux d'Isodori [Isi, 1989], le système est de degré relatif  $r$  si l'hypothèse suivante est vérifiée.

$$\begin{cases} L_{\underline{g}_s} L_{\underline{f}_s}^{(k)} h(\underline{x}) = 0 ; k < r-1 \\ L_{\underline{g}_s} L_{\underline{f}_s}^{(r-1)} h(\underline{x}) \neq 0 \end{cases} \quad (2-18)$$

Pour exprimer la relation liant l'entrée à la sortie du système (2-17), on dérive successivement jusqu'à l'apparition de l'entrée  $u$  [Slo, 1991]

Ainsi, la structure du système (2-17) peut être réécrite comme suit:

$$\begin{cases} \dot{x}^{(n)} = f(\underline{x}) + g(\underline{x})u \\ y = x \end{cases} \quad (2-19)$$

où  $\underline{x} = [x_1, \dots, x_n]^T = [x, \dots, x^{(n-1)}]^T$  représente le vecteur d'état du système constitué des dérivées successives de la sortie.

Le problème qui se pose, comment concevoir une commande capable de forcer la sortie à poursuivre une trajectoire de référence  $y_{ref}(t)$  tout en assurant que les variables d'état restent bornées le long de celle-ci?

Si l'on définit l'erreur de poursuite par  $e = y_{ref} - y$ , le fait d'assurer sa convergence asymptotique revient à satisfaire l'équation suivante:

$$e^{(n)} + k_n e^{(n-1)} + \dots + k_1 e = 0 \quad (2-20)$$

où les coefficients  $k_i$  sont calculés de telle sorte que le polynôme  $H(s) = s^n + k_n s^{n-1} + \dots + k_1$  ait des racines à partie réelle négative [Isi, 1989].

La  $n^{\text{ème}}$  dérivée de l'erreur de poursuite est donnée par:

$$\begin{aligned} e^{(n)} &= y_r^{(n)} - y^{(n)} = y_r^{(n)} - x^{(n)} \\ &= y_r^{(n)} - f(\underline{x}) - g(\underline{x})u \end{aligned} \quad (2-21)$$

En substituant (2-21) dans (2-20), on obtient:

$$y_r^{(n)} - f(\underline{x}) - g(\underline{x})u + k_n e^{(n-1)} + \dots + k_1 e = 0 \quad (2-22)$$

D'où l'on peut déduire la loi de commande:

$$u = g^{-1}(\underline{x}) \left[ -f(\underline{x}) + y_r^{(n)} + k_n e^{(n-1)} + \dots + k_1 e \right] \quad (2-23)$$

Cette loi peut être donnée par la forme contractée suivante:

$$u = g^{-1}(\underline{x}) \left[ -f(\underline{x}) + y_r^{(n)} + \underline{k}^T \underline{e} \right] \quad (2-24)$$

Avec  $\underline{k} = [k_1, \dots, k_n]^T$  et  $\underline{e} = [e, \dots, e^{(n-1)}]^T$ .

La loi de commande (2-24) ne peut être mise en œuvre que dans le cas, où le système est complètement connu.

Dans le cas contraire, deux solutions peuvent être envisagées. La première est une commande par modèle de référence. Dans ce cas, il faut disposer du modèle nominal. La deuxième solution, qui présente plus d'avantages, est l'utilisation de la commande adaptative floue avec ses deux schémas direct et indirect.

Ce choix est motivé par le fait qu'une telle approche, nous permet de garder la même structure de commande et, d'autre part, d'exploiter la souplesse et l'efficacité de la logique floue. Pour utiliser cette approche, nous utilisons un système flou de type Takagi-Sugeno à conclusion constante dont la sortie peut être écrite sous la forme matricielle suivante: [Wan, 1992]

$$f(\underline{x}) = \underline{\xi}^T(\underline{x})\underline{\theta} = \underline{\theta}^T \underline{\xi}(\underline{x}) \quad (2.25)$$

Où  $\underline{\theta} = [a_0^1, \dots, a_0^M]^T$  est le vecteur des paramètres ajustables, et  $\underline{\xi}(\underline{x}) = [\xi_1(\underline{x}), \dots, \xi_M(\underline{x})]^T$  le vecteur

de régression dont la  $i^{\text{ème}}$  composante est donnée par:  $\xi_i(\underline{x}) = \frac{\prod_{j=1}^n \mu_{A_j}(x_j)}{\sum_{i=1}^M \left( \prod_{j=1}^n \mu_{A_j}(x_j) \right)}$ .

L'écriture de la sortie du système flou sous la forme (2-25) permet d'une part d'exploiter les différents algorithmes adaptatifs linéaires et, d'autre part, d'introduire directement des informations linguistiques déduites de l'expertise humaine.

Le vecteur  $\underline{\theta}^*$  sera noté comme étant la valeur optimale de  $\underline{\theta}$  permettant d'obtenir la meilleure approximation.

Il est à noter que les résultats qui seront présentés peuvent être également étendus aux systèmes flous de type-2. Les démonstrations et les exemples de simulations peuvent être trouvés dans les travaux de Chafaa [Cha, 2006].

#### 4.2. Commande adaptative floue directe

La synthèse de la commande adaptative floue directe peut être élaborée selon deux différentes approches. La première approche, développée par Boukezzoula [Bou et al, 1998], consiste à

mettre d'abord la loi de commande (2-24) sous la forme  $u = \alpha(\underline{x}) + \beta(\underline{x})v$ , avec  $\alpha(\underline{x}) = -g^{-1}(\underline{x})f(\underline{x})$ ,  $\beta(\underline{x}) = g^{-1}(\underline{x})$  et  $v = y_r^{(n)} + \underline{k}^T \underline{e}$ , ensuite d'utiliser deux systèmes flous pour approximer ces deux fonctions. Cette méthode permet de s'affranchir de la contrainte de disponibilité de la fonction  $g(\underline{x})$ . Néanmoins, pour assurer la stabilité au sens de Lyapunov, un signal de commande supplémentaire, proportionnel à la borne supérieure de la dérivée de  $\beta(\underline{x})$ , est nécessaire. La seconde, présentée par Wang [Wan, 1994], consiste à approximer directement la loi de commande (2-24) par un système flou. La loi d'adaptation des paramètres ajustables est déduite directement de l'étude de stabilité au sens de Lyapunov. Le schéma bloc de cette dernière est donné par la Figure 2.7.

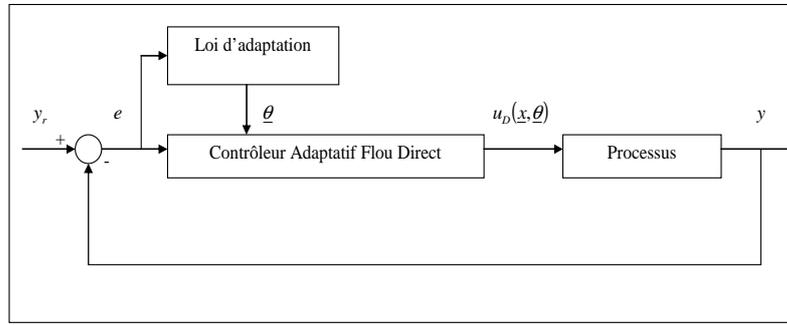


Figure 2. 7: Schéma de commande d'un contrôleur adaptatif flou direct [Wan, 1994].

Si l'on applique la commande directe  $u_D(\underline{x}, \underline{\theta}) = \underline{\theta}^T \underline{\xi}(\underline{x})$  au système (2-19), on obtient:

$$y^{(n)} = f(\underline{x}) + g(\underline{x})u_D(\underline{x}, \underline{\theta}) \quad (2-26)$$

de l'équation (2-24) on peut déduire l'expression de la  $n^{\text{ème}}$  dérivée de la trajectoire de référence:

$$y_r^{(n)} = -\underline{k}^T \underline{e} + f(\underline{x}) + g(\underline{x})u \quad (2-27)$$

en soustrayant (2-26) de (2-27), on aura:

$$\begin{aligned} e^{(n)} &= y_r^{(n)} - y^{(n)} = -\underline{k}^T \underline{e} + f(\underline{x}) + g(\underline{x})u - f(\underline{x}) - g(\underline{x})u_D(\underline{x}, \underline{\theta}) \\ &= -\underline{k}^T \underline{e} + g(\underline{x})[u - u_D(\underline{x}, \underline{\theta})] \end{aligned} \quad (2-28)$$

qu'on peut écrire sous la forme matricielle suivante:

$$\dot{\underline{e}} = A\underline{e} + \underline{b}[g(\underline{x})(u - u_D(\underline{x}, \underline{\theta}))] \quad (2-29)$$

où

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \cdots & 0 \\ & \ddots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -k_1 & -k_2 & \cdots & -k_n \end{bmatrix} \text{ et } \underline{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-30)$$

La matrice  $A$  étant stable (valeurs propres à partie réelle négative), pour une matrice  $Q$  symétrique définie positive. On lui associe une équation de Lyapunov, ayant pour solution unique une matrice symétrique définie positive  $P$ , donnée par :

$$A^T P + PA = -Q \quad (2-31)$$

Pour minimiser l'erreur de poursuite ainsi que l'erreur d'approximation, considérons la fonction de Lyapunov suivante: [Wan, 1994] et [Bou, 2000]

$$V = \frac{1}{2} \underline{e}^T P \underline{e} + \frac{1}{2\gamma} \underline{\varphi}^T \underline{\varphi} \quad (2-32)$$

où  $\underline{\varphi} = \underline{\theta}^* - \underline{\theta}$  et  $\gamma$  une constante positive.

en substituant (2-29) dans la dérivée de (2-32), on obtient:

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \underline{e}^T (A^T P + PA) \underline{e} + \underline{e}^T P \underline{b} [g(\underline{x})(u - u_D(\underline{x}, \underline{\theta}))] - \frac{1}{\gamma} \underline{\varphi}^T \dot{\underline{\theta}} \quad (2-33)$$

qu'on peut réécrire sous la forme:

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} \underline{e}^T Q \underline{e} + \underline{e}^T P \underline{b} [g(\underline{x})(u + u_D(\underline{x}, \underline{\theta}^*) - u_D(\underline{x}, \underline{\theta}) - u_D(\underline{x}, \underline{\theta}^*))] - \frac{1}{\gamma} \underline{\varphi}^T \dot{\underline{\theta}} \quad (2-34)$$

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} \underline{e}^T Q \underline{e} + \underline{e}^T P \underline{b} [g(\underline{x})(u - u_D(\underline{x}, \underline{\theta}^*)) + g(\underline{x}) \underline{\varphi}^T \underline{\xi}(\underline{x})] - \frac{1}{\gamma} \underline{\varphi}^T \dot{\underline{\theta}} \quad (2-35)$$

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} \underline{e}^T Q \underline{e} + \underline{e}^T P \underline{b} [g(\underline{x})(u - u_D(\underline{x}, \underline{\theta}^*))] - \frac{1}{\gamma} \underline{\varphi}^T (\dot{\underline{\theta}} - \gamma g(\underline{x}) \underline{e}^T P \underline{b} \underline{\xi}(\underline{x})) \quad (2-36)$$

Si l'on choisit la loi d'adaptation suivante:

$$\dot{\underline{\theta}} = \gamma g(\underline{x}) \underline{e}^T P \underline{b} \underline{\xi}(\underline{x}) \quad (2-37)$$

l'équation (2-36) devient:

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} \underline{e}^T Q \underline{e} + \underline{e}^T P \underline{b} [g(\underline{x})(u - u_D(\underline{x}, \underline{\theta}^*))] \quad (2-38)$$

Comme le système flou utilisé est un approximateur universel, on a  $|u - u_D(\underline{x}, \underline{\theta}^*)| \leq \varepsilon$ . Si l'on impose  $\varepsilon \rightarrow 0$ , la fonction  $g(\underline{x})$  étant bornée implique que la stabilité globale du système bouclé est vérifiée.

### 4.3. Commande adaptative floue indirecte

La commande adaptative floue indirecte consiste à approximer les fonctions  $f(\underline{x})$  et  $g(\underline{x})$  par deux systèmes flous, pour en déduire la loi de commande par rétroaction. En effet, On considère que le modèle du processus à commander est inconnu. Pour garder la même structure de commande, deux systèmes flous de la forme (2-25) sont utilisés. [Wan, 1994] et [Bou et al, 1998]. Les approximateurs ainsi construits sont injectés directement dans la loi de commande

pour atteindre les performances de poursuite désirées. Le schéma synoptique de la commande floue indirecte présentée est donné par la Figure 2.8.

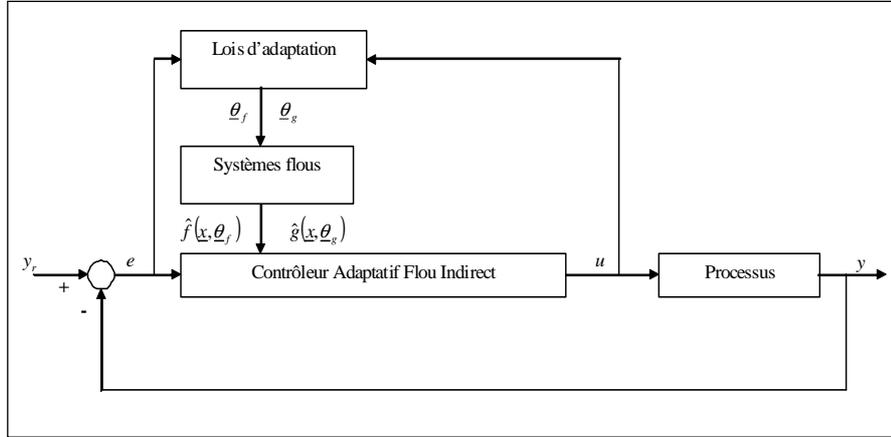


Figure 2. 8: Schéma synoptique de la commande floue indirecte [Wan, 1994].

A partir du principe des "certitudes équivalentes" permettant d'utiliser les paramètres estimés du système pour générer le signal de commande [Isi, 1989], la loi suivante peut être utilisée:

$$u = \hat{g}^{-1}(\underline{x}, \underline{\theta}_g) \left[ -\hat{f}(\underline{x}, \underline{\theta}_f) + y_r^{(n)} + \underline{k}^T \underline{e} \right] \quad (2-39)$$

où  $\hat{f}(\underline{x}, \underline{\theta}_f) = \underline{\theta}_f^T \underline{\xi}(\underline{x})$  et  $\hat{g}(\underline{x}, \underline{\theta}_g) = \underline{\theta}_g^T \underline{\xi}(\underline{x})$  sont deux systèmes flous approximant respectivement  $f(\underline{x})$  et  $g(\underline{x})$ .

L'erreur de poursuite peut être écrite sous la forme suivante:

$$\begin{aligned} e^{(n)} &= y_r^{(n)} - y^{(n)} = -\underline{k}^T \underline{e} + \hat{f}(\underline{x}, \underline{\theta}_f) + \hat{g}(\underline{x}, \underline{\theta}_g) u - f(\underline{x}) - g(\underline{x}) u \\ &= -\underline{k}^T \underline{e} + \left( \hat{f}(\underline{x}, \underline{\theta}_f) - f(\underline{x}) \right) + \left( \hat{g}(\underline{x}, \underline{\theta}_g) - g(\underline{x}) \right) u \end{aligned} \quad (2-40)$$

et sous la forme matricielle:

$$\dot{\underline{e}} = A \underline{e} + \underline{b} \left[ \hat{f}(\underline{x}, \underline{\theta}_f) - f(\underline{x}) + \left( \hat{g}(\underline{x}, \underline{\theta}_g) - g(\underline{x}) \right) u \right] \quad (2-41)$$

Comme dans le cas de la commande directe, on associe à la matrice stable  $A$  une équation de Lyapunov de la forme:

$$A^T P + P A = -Q \quad (2-42)$$

Pour étudier la stabilité globale du système bouclé et obtenir les lois d'adaptation des paramètres ajustables  $\underline{\theta}_f$  et  $\underline{\theta}_g$ , on considère la fonction de Lyapunov suivante:

$$V = \frac{1}{2} \underline{e}^T P \underline{e} + \frac{1}{2\gamma_f} \underline{\varphi}_f^T \underline{\varphi}_f + \frac{1}{2\gamma_g} \underline{\varphi}_g^T \underline{\varphi}_g \quad (2-43)$$

avec  $\gamma_f$  et  $\gamma_g$  deux constantes positives,  $\underline{\varphi}_f = \underline{\theta}_f - \underline{\theta}_f^*$ ,  $\underline{\varphi}_g = \underline{\theta}_g - \underline{\theta}_g^*$ ,

la dérivée de la fonction de Lyapunov est donnée par:

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \underline{\dot{e}}^T P \underline{e} + \frac{1}{2} \underline{e}^T P \underline{\dot{e}} + \frac{1}{\gamma_f} \underline{\varphi}_f^T \underline{\dot{\varphi}}_f + \frac{1}{\gamma_g} \underline{\varphi}_g^T \underline{\dot{\varphi}}_g \quad (2-44)$$

utilisant l'équation (2-37), et le fait que,  $\underline{\dot{\varphi}}_f = \underline{\dot{\theta}}_f$ ,  $\underline{\dot{\varphi}}_g = \underline{\dot{\theta}}_g$ , l'équation (2-44) devient:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \frac{1}{2} \underline{e}^T (A^T P + P A) \underline{e} + \underline{e}^T P \underline{b} \underbrace{\left[ \hat{f}(\underline{x}, \underline{\theta}_f) - f(\underline{x}) + (\hat{g}(\underline{x}, \underline{\theta}_g) - g(\underline{x})) u \right]}_{\Sigma} \\ & + \frac{1}{\gamma_f} \underline{\varphi}_f^T \underline{\dot{\theta}}_f + \frac{1}{\gamma_g} \underline{\varphi}_g^T \underline{\dot{\theta}}_g \end{aligned} \quad (2-45)$$

**D'**autre part, en exploitant les valeurs optimales des systèmes flous ainsi que leurs expressions, on trouve:

$$\begin{aligned} \Sigma = & \hat{f}(\underline{x}, \underline{\theta}_f) - f(\underline{x}) + (\hat{g}(\underline{x}, \underline{\theta}_g) - g(\underline{x})) u \\ = & \hat{f}(\underline{x}, \underline{\theta}_f) - \hat{f}(\underline{x}, \underline{\theta}_f^*) + \hat{f}(\underline{x}, \underline{\theta}_f^*) - f(\underline{x}) + (\hat{g}(\underline{x}, \underline{\theta}_g) - \hat{g}(\underline{x}, \underline{\theta}_g^*)) u + (\hat{g}(\underline{x}, \underline{\theta}_g^*) - g(\underline{x})) u \\ = & \underline{\varphi}_f^T \underline{\xi}(\underline{x}) + \underline{\varphi}_g^T \underline{\xi}(\underline{x}) u + w \end{aligned} \quad (2-46)$$

avec  $w = [\hat{f}(\underline{x}, \underline{\theta}_f^*) - f(\underline{x})] + [\hat{g}(\underline{x}, \underline{\theta}_g^*) - g(\underline{x})] u$  l'erreur minimale d'approximation.

en substituant (2-38) et (2-42) dans (2-41), on obtient:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\frac{1}{2} \underline{e}^T Q \underline{e} + \underline{e}^T P \underline{b} w + \frac{1}{\gamma_f} \underline{\varphi}_f^T [\underline{\dot{\theta}}_f + \gamma_f \underline{e}^T P \underline{b} \underline{\xi}(\underline{x})] \\ & + \frac{1}{\gamma_g} \underline{\varphi}_g^T [\underline{\dot{\theta}}_g + \gamma_g \underline{e}^T P \underline{b} \underline{\xi}(\underline{x}) u] \end{aligned} \quad (2-47)$$

Si l'on choisit les lois d'adaptation suivantes:

$$\begin{aligned} \underline{\dot{\theta}}_f = & -\gamma_f \underline{e}^T P \underline{b} \underline{\xi}(\underline{x}) \\ \underline{\dot{\theta}}_g = & -\gamma_g \underline{e}^T P \underline{b} \underline{\xi}(\underline{x}) u \end{aligned} \quad (2-48)$$

l'équation (2-47) devient:

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} \underline{e}^T Q \underline{e} + \underline{e}^T P \underline{b} w \quad (2-49)$$

**A**insi, la commande (2-39), dans laquelle les approximateurs sont des systèmes flous adaptatifs avec la mise à jour donnée par (2-48), est stabilisante dans le cas où  $|w| \rightarrow 0$  (ce qui donne donc, une bonne approximation).

#### 4.4. Exemple de simulation

Pour analyser les performances des deux approches, on considère un pendule inversé Figure 2.9, de masse  $m$  et de longueur  $2l$ , placé sur un chariot, de masse  $M$ . Ce système est décrit par les équations suivantes:

$$\begin{cases} \ddot{\alpha} = f(\alpha, \dot{\alpha}) + g(\alpha, \dot{\alpha})u \\ y = \alpha \\ f(\alpha, \dot{\alpha}) = \frac{ml\dot{\alpha}^2 \sin(\alpha) \cos(\alpha) - (m+M)g_r \sin(\alpha)}{ml \cos^2(\alpha) - (4/3)l(m+M)} \\ g(\alpha, \dot{\alpha}) = \frac{-\cos(\alpha)}{ml \cos^2(\alpha) - (4/3)l(m+M)} \end{cases} \quad (2-50)$$

où  $\alpha$  est l'angle du pendule par rapport à la verticale,  $g_r$  la constante de gravitation,  $u$  l'effort appliqué au chariot. Les paramètres utilisés dans les simulations sont donnés comme suit:  $M = 1\text{Kg}$ ,  $m=0.1\text{kg}$ ,  $l=0.5\text{m}$ ,  $g_r = 9.8\text{m/s}^2$ . Le pendule est supposé initialement à l'arrêt dans la position  $0.5 \text{ rad}$  ou  $-0.5 \text{ rad}$ ; La trajectoire à atteindre est sinusoïdale d'équation  $y_{ref} = \frac{\pi}{6} \sin(t)$ .

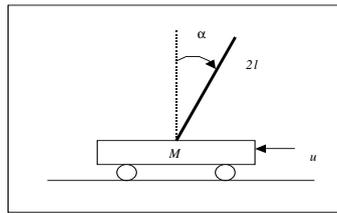


Figure 2. 9: Système de pendule.

Il est à noter que le théorème de Wang [Wan, 1994] démontre l'existence d'un approximateur flou optimal, mais ne donne pas une méthode précise pour l'obtenir. En vue de minimiser l'erreur d'approximation, et par conséquent assurer la stabilité, on doit soit effectuer plusieurs essais, soit tenir compte du comportement dynamique du système autour de certains points de fonctionnement sous forme de règles linguistiques. Cette approche est évoquée dans les travaux de Essounbouli [Ess, 2004].

##### 4.4.1. Commande adaptative floue indirecte

Au départ, les résultats de simulation sont présentés avec un choix judicieux (1<sup>er</sup> cas) des valeurs initiales, puis de façon arbitraire (2<sup>ème</sup> cas) et enfin, l'approximation des fonctions

$f(\alpha, \dot{\alpha})$  et  $g(\alpha, \dot{\alpha})$  du modèle de pendule inversé, utilisant des valeurs initiales à partir des connaissances a priori de ces deux fonctions.

### 1<sup>er</sup> cas

Les figures (Figure 2.10 et Figure 2.11), représentent respectivement l'évolution de la position angulaire du pendule et l'erreur quadratique de poursuite, ainsi que l'effort appliqué en utilisant la loi de commande adaptative floue indirecte (2-39). On remarque le système rejoint la trajectoire de référence dans un temps court vu la nature mécanique de celui-ci. Les variations de l'effort appliqué au pendule restent raisonnables et ne comportent pas de valeurs excessives.

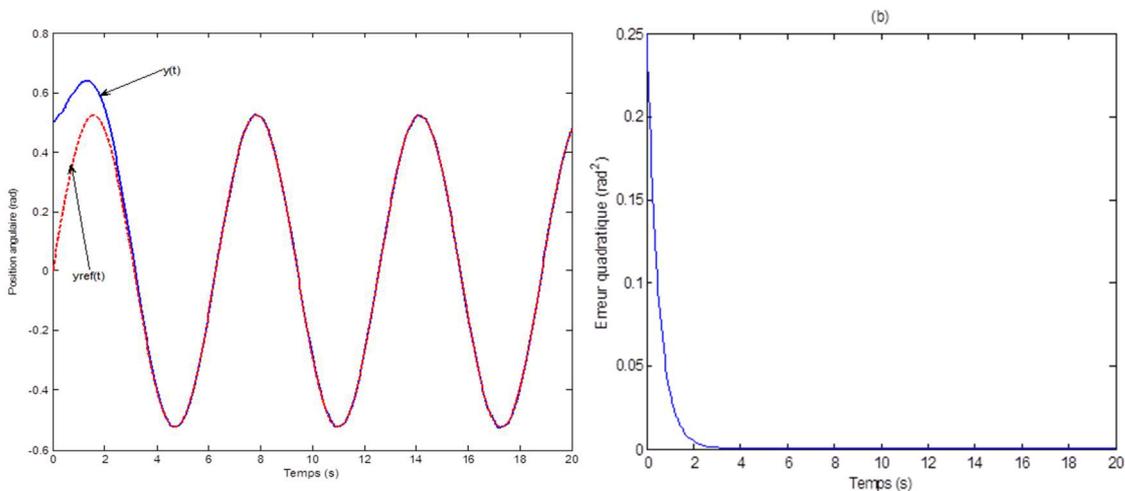


Figure 2. 10: Réponse du système avec une commande adaptative floue indirecte  
(a) position angulaire, (b) erreur quadratique.

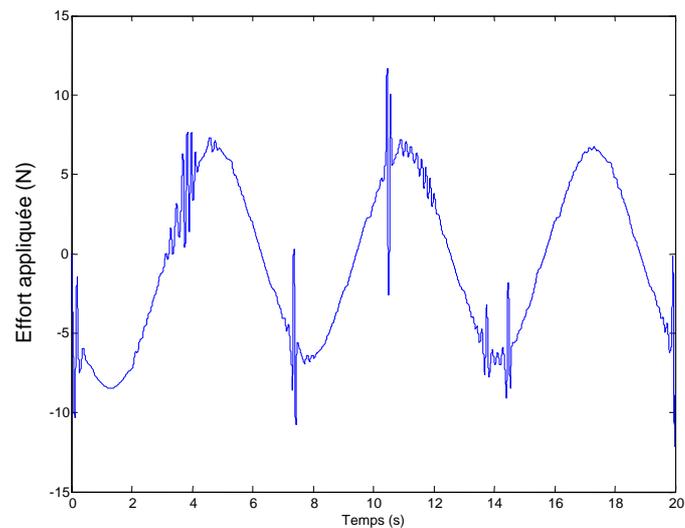


Figure 2. 11: Effort appliqué au chariot.

## 2<sup>ème</sup> cas

Dans ce cas, on procède à un choix arbitraire des valeurs initiales des paramètres ajustables, on ne peut avoir une idée préalable sur la convergence de l'algorithme adaptatif. La figure (Figure 2.12) présente une collection de résultats de simulations pour plusieurs valeurs initiales choisies arbitrairement où l'on remarque la détérioration aussi bien des performances de poursuite que du signal de commande. Certaines valeurs initiales provoquent même la divergence de la loi d'adaptation et par conséquent l'instabilité du processus montrées par la figure (Figure 2.13).

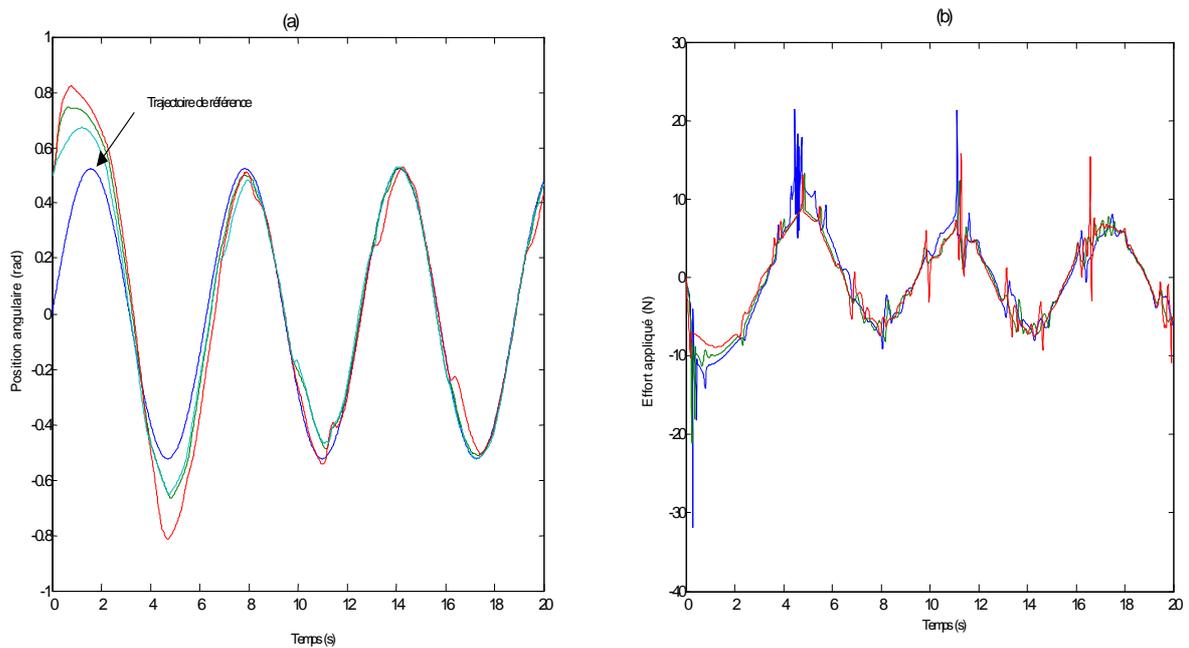


Figure 2. 12 Réponse du pendule avec une commande floue indirecte pour différentes valeurs initiales des paramètres ajustables : (a) position angulaire, (b) effort appliqué.

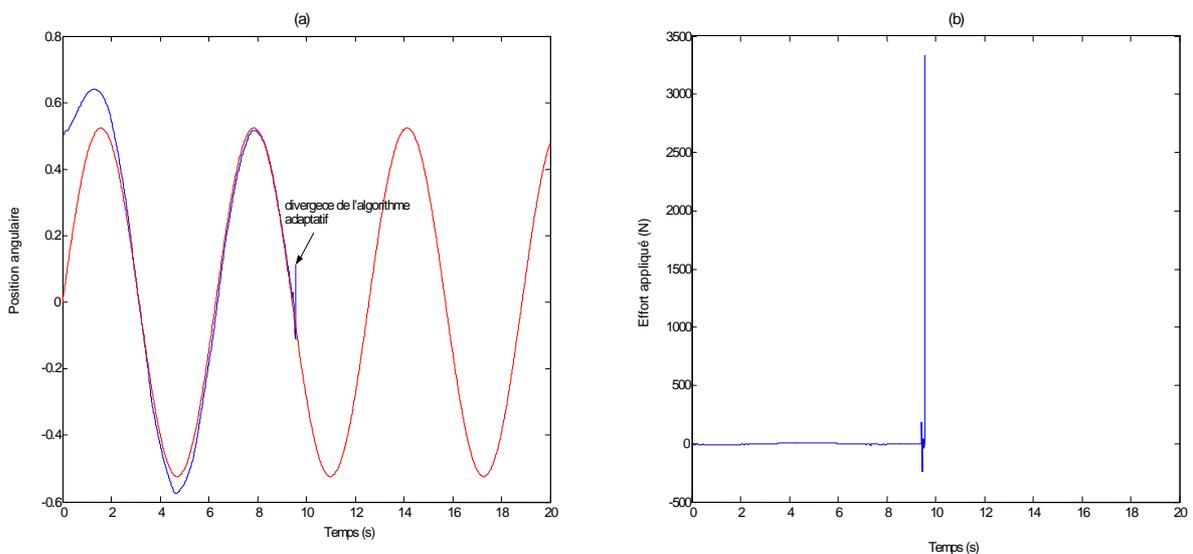


Figure 2. 13: Perte de poursuite dans le cas de la commande indirecte.

Présentation des résultats de simulation de l'approximation des fonctions  $f(\alpha, \dot{\alpha})$  et  $g(\alpha, \dot{\alpha})$  du modèle de pendule inversé (Figure 2.14). Dans le cas où l'on posséderait des informations linguistiques décrivant le comportement dynamique du pendule autour de cinq points de fonctionnement.

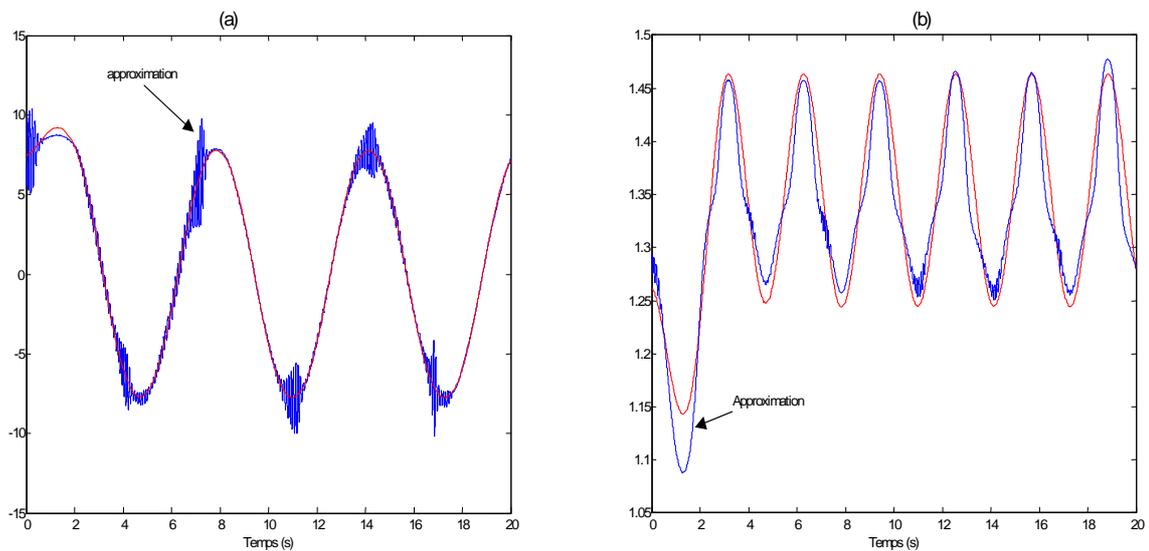


Figure 2. 14: Les fonctions non linéaires et leurs approximations en utilisant des valeurs initiales à partir des connaissances a priori: (a): la fonction  $f(\alpha, \dot{\alpha})$ , (b): la fonction  $g(\alpha, \dot{\alpha})$ .

Plusieurs simulations ont été effectuées ce qui nous permet de conclure l'aboutissement à une meilleure approximation du modèle du processus et par conséquent à de meilleures performances de poursuite (Figure 2.15(a)).

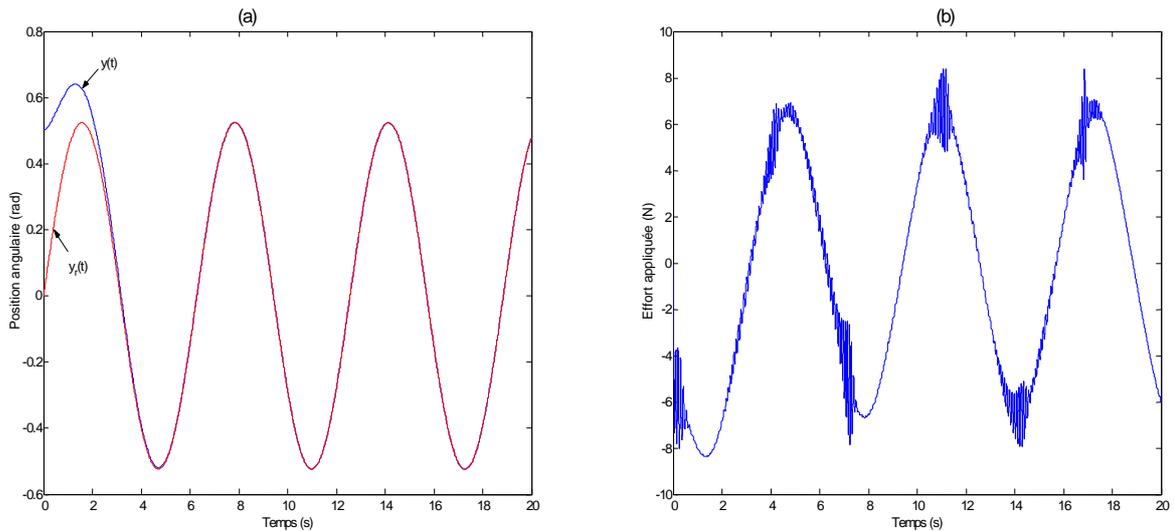


Figure 2.15: La réponse du système avec une commande adaptative floue indirecte: (a) position angulaire, (b) effort appliqué au chariot.

## Conclusion

Les résultats de simulations présentées montrent qu'un choix judicieux des valeurs initiales des paramètres ajustables permet en plus de garantir la stabilité globale du système bouclé, d'obtenir de meilleures performances de poursuite. Ce choix pourrait se faire soit par essais successifs soit à partir d'informations, sur le processus à commander, déduites de l'expertise humaine. En effet, ces informations peuvent être exprimées sous formes de règles linguistiques, décrivant le comportement dynamique du système autour de certains points de fonctionnement et permettre ainsi de synthétiser un système flou qu'on ajustera en ligne suivant les lois d'adaptation (2-48).

### 4.4.2. Commande adaptative floue directe

La même démarche est effectuée. En premier lieu, le choix est établi avec la recherche de la meilleure valeur des paramètres ajustables et dans le deuxième cas, c'est arbitrairement que les valeurs ont été choisies.

1<sup>er</sup> cas (choix judicieux): Selon le meilleur choix du vecteur des paramètres ajustables

Dans ce cas, plusieurs essais de simulations ont été effectués pour le choix de la meilleure valeur initiale du vecteur des paramètres ajustables. Les figures (Figure 2.16 et 2.17) présentent les résultats correspondants à ce choix. Une bonne performance de poursuite est

montrée sur la première figure (Figure 2.16), la seconde figure (Figure 2.17) donne l'effort appliqué au chariot.

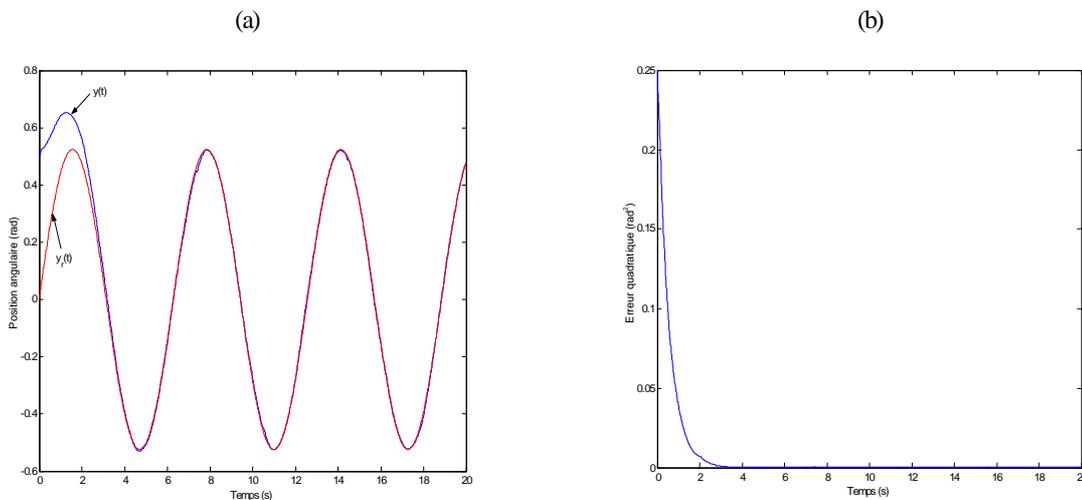


Figure 2. 16: Réponse du système avec la commande adaptative floue directe: (a) position angulaire, (b) erreur quadratique.

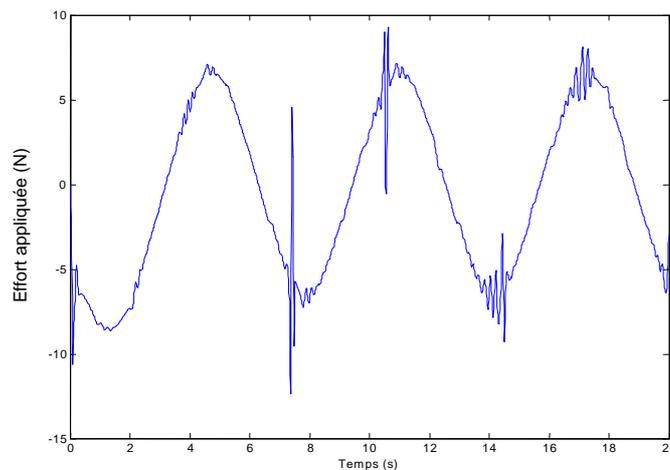


Figure 2. 17: Effort appliqué au chariot

2<sup>ème</sup> cas: Choix arbitraire des valeurs initiales

**D'**après les résultats obtenus par simulation, dans ce cas, le choix arbitraire des valeurs initiales, ne peut assurer ni les bonnes performances de poursuite, ni la stabilité du système comme mentionnées sur les figures (Figure 2.18 et 2.19). Nous constatons, la détérioration des performances de poursuite ainsi que l'augmentation des variations du signal de commande qui sont bien montrées respectivement sur la première et la seconde figures, un cas de perte de stabilité est présenté.

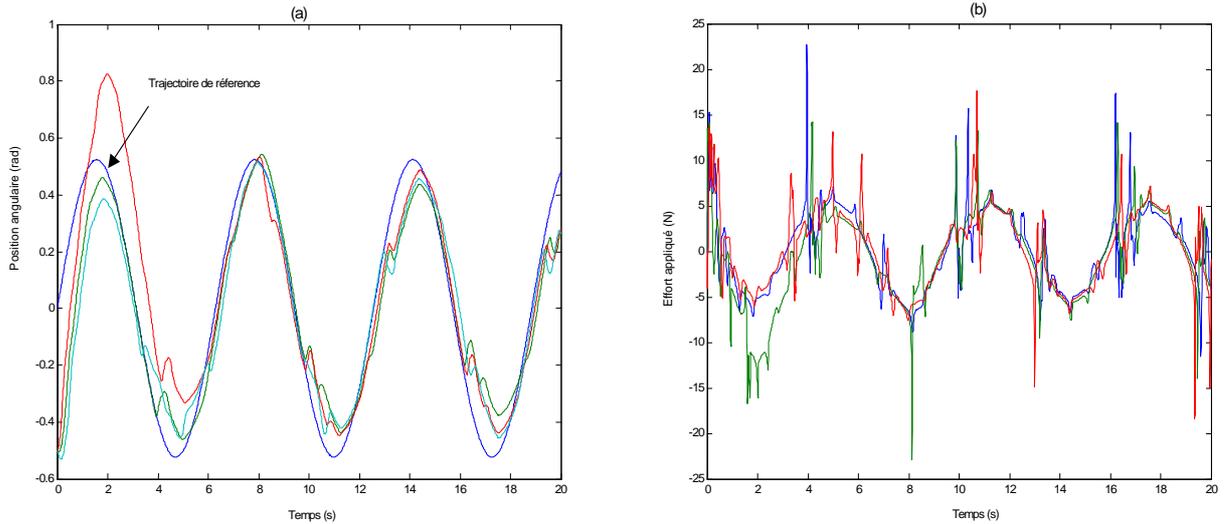


Figure 2. 18: Réponse du pendule avec la commande floue directe pour différentes valeurs initiales des paramètres ajustables : (a) position angulaire, (b) effort appliqué.

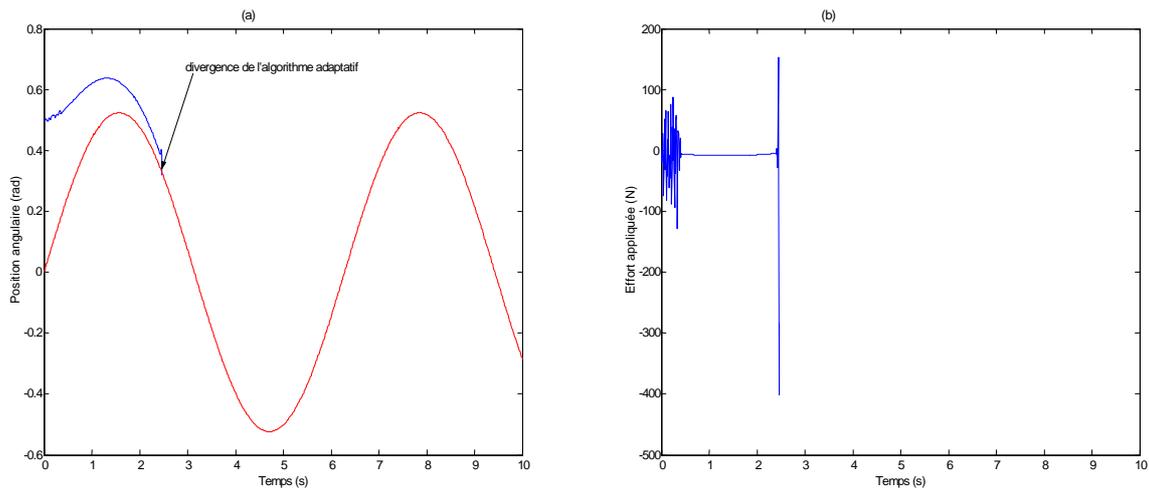


Figure 2. 19: Perte de poursuite dans le cas de la commande.

**A** travers ces résultats de simulations, on a montré que la mise en œuvre de la commande adaptative floue indirecte ou directe dépend directement du choix des paramètres initiaux et par conséquent, de l'erreur d'approximation. La nature de ce choix n'influe pas seulement sur les performances de poursuite mais aussi sur la stabilité du système bouclé. En effet, on a montré qu'un choix judicieux ou l'utilisation des informations linguistiques permet d'obtenir de bonnes performances de poursuite, alors que dans le cas contraire, le système bouclé peut aller jusqu'à l'instabilité. Par ailleurs, les performances peuvent être détériorées en présence de perturbations externes d'où la nécessité d'utiliser une technique de robustification. [Ham et al, 2000], [Ess, 2004], [Gue et al, 2005] et [Ess et al, 2006].

## 5. Commande par modes glissants

Connue par sa simplicité et sa robustesse, les modes glissants ont été largement utilisés dans la littérature [Slo, 1984], [Slo, 1991], [Utk, 1992], [Chu et al, 1996] et [Per, 2002]. En effet, quand la phase de glissement est établie, le système devient insensible aux perturbations externes et aux variations paramétriques. Néanmoins, elle présente un inconvénient majeur: la commutation autour de la surface de glissement provoque le phénomène de broutement qui peut détériorer les actionneurs.

Pour remédier à ce problème, une des solutions consiste à remplacer la fonction de discontinuité (commutation) dans la commande par une fonction de saturation qui permet de réduire l'effet de broutement et assurant ainsi le lissage de la commande tout en maintenant l'état du système dans cette surface [Slo, 1991]. D'autres solutions ont été présentées dans la littérature pour résoudre ce problème.

### 5.1. Mise en œuvre d'une commande par modes glissants

Synthétiser une loi de commande par modes glissants revient, en premier lieu, à choisir une surface de glissement qui permet la convergence de la trajectoire d'état du système vers le point d'équilibre désiré, en second lieu, à établir la condition d'existence du mode de glissement qui est reliée à la convergence de la trajectoire d'état vers le point d'équilibre et en troisième lieu, à déterminer la loi de commande qui aura pour rôle de maintenir les conditions de glissement (attractivité). En d'autres termes, la conception de la loi de commande par modes glissants est réalisée en trois étapes:

1<sup>ère</sup> étape: choix de la surface de glissement

2<sup>ème</sup> étape: élaboration de la condition de convergence

3<sup>ème</sup> étape: détermination de la loi de commande.

La surface de glissement est un hyperplan dans l'espace d'état global, et représente le comportement dynamique désiré. La trajectoire d'état du système doit atteindre cette surface. Ils n'existent pas de critères dédiés au choix d'une surface de glissement appropriée.

### 5.2. Formulation du problème d'une commande par modes glissants

Dans cette section on considère le système SISO donné par (2-19) sujet à des perturbations externes:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u + d(t) \quad (2-51)$$

où  $x \in \mathfrak{X}$ ; vecteur d'état,  $u \in \mathfrak{U}$ ; vecteur de commande et  $d(t) \in \mathfrak{X}$  représente le vecteur de perturbations.  $f(x)$  et  $g(x)$  appartiennent respectivement à  $\mathfrak{X}$ .

Considérons la surface de glissement suivante [Slo, 1991]:

$$S(x) = \left( \frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right)^{(n-1)} e \quad (2-52)$$

où  $\lambda$  une constante positive et  $e = y_{ref} - y$ , représente l'erreur de poursuite.

Pour assurer la transition entre la phase d'approche et celle de glissement, il suffit de satisfaire la condition suivante:[Slo, 1991]:

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} S^2(x) = S(x) \dot{S}(x) \leq -\eta |S(x)|; \eta > 0 \quad (2-53)$$

où  $\eta$  est une constante positive appelée facteur de glissement.

**Ainsi**, l'erreur de poursuite  $e$  converge asymptotiquement vers zéro quand la variable de glissement  $S$  est forcée à zéro.

**Le** problème de la poursuite nécessite donc, la conception d'une loi de commande qui assure:  $S(x) = 0$  pour  $t \geq 0$ .

**Pour** étudier la stabilité de la commande, nous avons choisi d'utiliser la théorie de Lyapunov. Ainsi, considérons la fonction  $V(x)$ , la fonction de Lyapunov, dont la dérivée temporelle est  $\dot{V}(x) = \frac{dV(x)}{dt}$ . Le signe de  $\dot{V}(x)$  informe sur la stabilité du système. Alors, le système est asymptotiquement stable, si et seulement si les deux conditions sont vérifiées:

Si  $V(x) > 0, \forall x \neq 0$  et  $\dot{V}(x) < 0$ .

Soit la loi de commande donnée par:

$$u = g^{-1}(x) \left[ -f(x) + y_r^{(n)} + \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i e^{(i)} - K \text{sign}(S(x)) \right] \quad (2-54)$$

où  $K$  est le gain de commande choisi pour compenser l'écart dynamique entre le système réel et celui donné par la surface de glissement vérifiant  $K \geq |d| + \eta$ .

**Cette** commande garantit la stabilité et la robustesse du système bouclé ainsi que la transition de la phase d'approche à celle du glissement.

**La** commande par modes glissants est composée d'une commande continue (discontinue) en fonction du signe de la surface de glissement et une commande dite équivalente caractérisant la dynamique du système sur la surface de glissement présentée comme suit:

$$u = u_{eq} + u_{disc}$$

où  $u_{eq}$  correspond à la commande du système, et  $u_{disc}$  garantit la phase d'approche (responsable du glissement).

Par conséquent, la partie discontinue définie par:  $u_{disc} = -K \text{sign}(s(x))$  permet d'assurer une convergence à chaque instant et la robustesse en présence de perturbations et la partie équivalente de la commande  $u_{eq}$  décrit le mouvement de glissement, sans prendre en compte les incertitudes et les perturbations, est considérée comme une valeur moyenne de la commande réelle obtenue suite aux conditions d'invariance de la surface de glissement:  $s(x) = \dot{s}(x) = 0$ .

Pour analyser les performances de cette approche, on reprend l'exemple du pendule inversé présenté précédemment. Ainsi, le système à étudier est soumis à des perturbations de structures et externes, définies respectivement comme suit:

$$dm = 0.05.m.(\sin(2t) + \sin(3t)); \quad dM = 0.05.M.(\sin(2t) + \sin(3t)) \quad (2-55)$$

$$\text{et } d = 0.05 \cdot \frac{\pi}{6} \cdot (\sin(2t) + \sin(3t)).$$

Le système est initialement au point  $\left[ \frac{\pi}{8}, 0 \right]^T$ . L'objectif est de forcer le système à suivre la trajectoire de référence  $y_r(t) = \frac{\pi}{6} \cdot \sin(t)$ .

Les résultats de simulations sont donnés par les figures (Figure 2.20, Figure 2.21, Figure 2.22 et Figure 2.23). On remarque la convergence des variables d'état vers leurs trajectoires de références. On remarque également, la présence du phénomène de broutement qui représente un des inconvénients majeurs de la commande par modes glissants.

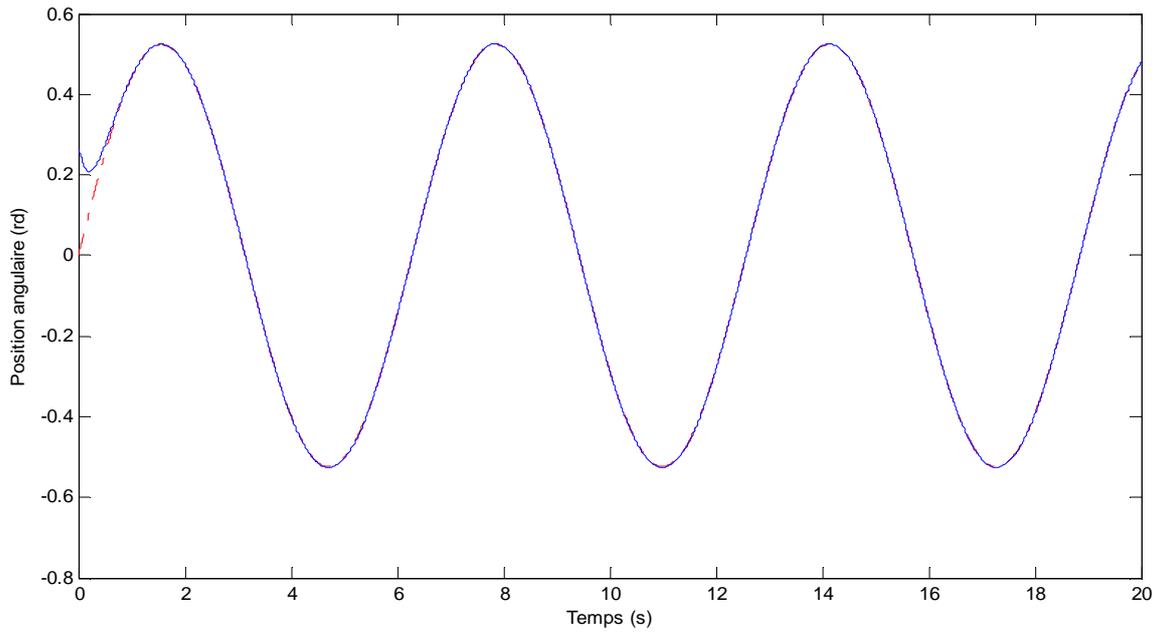


Figure 2. 20: Position angulaire (trait plein) et sa trajectoire de référence (trait discontinu).

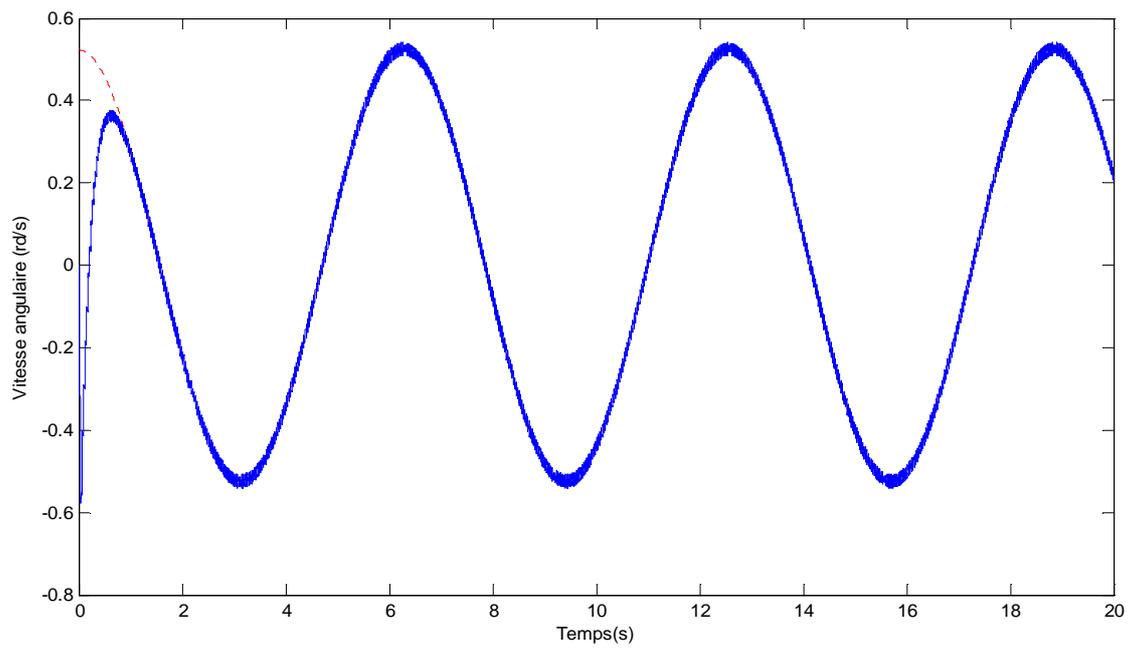


Figure 2. 21: Vitesse angulaire (trait plein) et sa trajectoire de référence (trait discontinu).

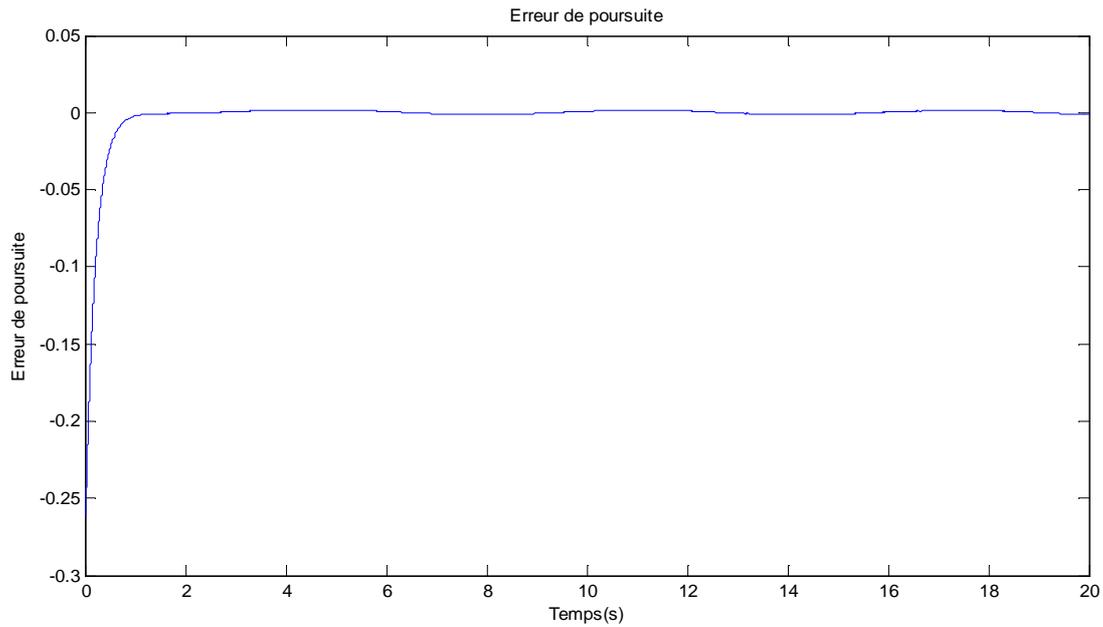


Figure 2. 22: Erreur de poursuite.

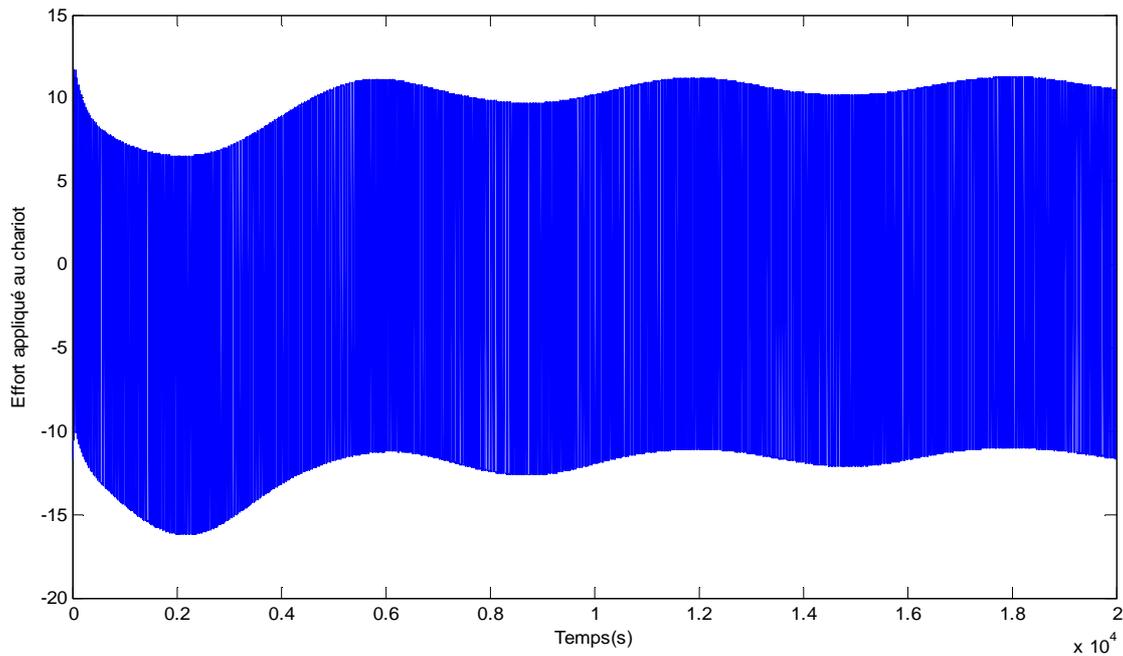


Figure 2. 23: Effort appliqué

## 6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un ensemble de notions élémentaires qui sont le point de départ de notre travail. Un accent est mis, particulièrement, sur les différentes étapes de traitements de règles d'un contrôleur flou et sur les fondements de la logique floue de type-1 et 2 qui sont d'un intérêt majeur dans sa capacité à traduire la stratégie de contrôle d'un

opérateur qualifié en un ensemble de règles linguistiques facilement interprétables. Nous avons présenté brièvement la commande adaptative floue et par modes glissants pour un système non linéaire monovariante. Nous avons également présenté à travers des exemples de simulations leurs avantages et leurs inconvénients.

**D**ans le chapitre suivant, nous nous intéresserons à la mise en œuvre d'une commande tolérante aux fautes en utilisant par la suite (chapitre 4) la commande adaptative floue et les modes glissants afin de maintenir de bonnes performances de poursuite malgré la présence de perturbations externes et des défauts actionneurs.

# Chapitre 3. Approches dédiées au diagnostic des systèmes industriels

## 1. Introduction

Suite à la progression rapide des technologies, les systèmes industriels sont, de plus en plus, complexes et l'opération de diagnostic est devenue indispensable pour assurer la sûreté de leur fonctionnement ainsi que leur disponibilité. La recherche dans le domaine du diagnostic a connu une évolution très importante, qui lui a permis de développer plusieurs méthodes donnant une solution à un certains nombres de problèmes de détection et d'isolation de défauts.

Les systèmes industriels modernes s'appuient, de plus en plus, sur des techniques de commandes avancées afin d'atteindre des niveaux de performances élevés et de répondre aux exigences de sécurité. Néanmoins, si un dysfonctionnement dans les actionneurs, les capteurs ou autres composants apparait, une action de commande conventionnelle peut engendrer un niveau de performance non satisfaisant ou la perte de stabilité. Dans ce cas, les conséquences d'un défaut mineur dans un composant du système peuvent être catastrophiques. Pour remédier à ces problèmes, plusieurs approches pour la conception de système de commande ont été développées afin de tolérer les dysfonctionnements de certains éléments tout en maintenant un niveau de performances acceptable [Tan et al, 2007], [Wu et al, 2006], [Xue et al, 2006], [Tan et al, 2005] et [Tao et al, 2004]. En effet, ce type de situations est délicat dans le cas des systèmes à sécurité critique, tels que les avions ou les centrales nucléaires. La phase de localisation de défauts est certes nécessaire, mais reste insuffisante pour garantir la sûreté de fonctionnement, car il est indispensable de modifier la loi de commande, en temps réel, afin de maintenir la stabilité du système et de garantir ainsi un fonctionnement acceptable en mode dégradé. Par conséquent, il est nécessaire d'associer au diagnostic une loi de commande tolérante aux défauts. Cette classe de systèmes de commande, appelée en anglais **Fault Tolerant Control Systems (FTCS)**, permet de maintenir la stabilité globale du système et assurer un niveau de performance acceptable en présence de défauts [Zha et al, 2003a].

Néanmoins, la mise en œuvre d'une commande tolérante aux défauts passe par un inventaire exhaustif préalable de tous les défauts pouvant affecter le processus industriel étudié ainsi que leurs effets sur son comportement dynamique. Ceci est motivé par le fait que la réaction du processus dépend directement de la nature du défaut. Alors, il est nécessaire d'associer à chaque défaut une dynamique du processus afin de mettre en œuvre une commande

tolérante aux défauts correspondante capable de garantir la stabilité du système et maintenir les performances à niveau désiré ou tolérable. Il est à noter que certains défauts peuvent être compensés ce qui permet à la commande de maintenir les performances nominales. Dans le cas contraire, la loi de commande est reconfigurée pour minimiser au maximum l'influence du défaut pour garder un niveau minimal de performance.

Dans les FTCS, on s'intéresse généralement aux défauts actionneurs ou capteur ou les deux. Dans cette thèse, nous avons étudié le cas de la commande tolérante aux défauts affectant les actionneurs.

## **2. Tolérance aux défauts des systèmes évolutifs**

La complexité des systèmes est toujours accompagnée d'une demande plus forte de disponibilité et de sécurité. Pour atteindre ces objectifs, il existe quatre fonctions destinées à garantir le bon fonctionnement d'un système: la détection, l'identification, le diagnostic de dysfonctionnements (anomalies) et la prise de décision qui permet de gérer le dysfonctionnement. Alors, pour éviter les catastrophes inhérentes à l'apparition de dysfonctionnements, le diagnostic et la tolérance aux défauts sont devenus une préoccupation majeure dans le développement et l'exploitation des systèmes. De ce fait, la tolérance aux défauts permet alors de réduire, voire d'annuler l'effet de défauts inacceptables sur la mission, la sécurité, l'environnement et la rentabilité.

La tolérance aux défauts reste indispensable pour que le système continue à fonctionner malgré la présence de défauts qu'on ne peut pas éliminer ou prévoir. Comme montré dans [Jia, 2005], [Zha et al, 2006] et [Zha et al, 2008], la défaillance au niveau d'actionneurs représente la partie importante des travaux sur la commande tolérante aux défauts, d'où le choix pour l'étude de ces défauts.

## **3. Classification de défauts et leurs modélisations**

### **3.1. Définition d'un défaut**

Un défaut est défini comme un écart non permis d'au moins d'une propriété ou d'un paramètre caractéristique du système par rapport au comportement nominal. Ainsi, le défaut peut conduire à un mauvais fonctionnement ou dans certains cas à une panne du système.

En plus, un défaut est perceptible au travers un signe qui caractérise un comportement anormal. Ce signe est un ensemble d'observations en provenance d'un système physique et est révélateur de la présence de défaut. Ce dernier peut être lent (cas d'une usure) ou subite (cas de rupture).

### 3.2. Modélisation de défauts

La modélisation de défauts est une représentation formelle de la connaissance que l'on a sur les défauts possibles et de leur influence sur le système. Ainsi, on a les défauts additifs, décrit par  $f_y(t)$ , influencent une variable  $y(t)$  par l'ajout de la fonction  $f_y(t)$ , alors que les défauts multiplicatifs, décrits par  $f_u(t)$ , le font par l'intermédiaire du produit d'une autre variable  $u(t)$  par la fonction  $f_u(t)$  (chapitre1, § 5.4). Les défauts sont donc modélisés comme des termes additifs dans le modèle du système, ou comme des changements de paramètres (cas multiplicatif). La première modélisation est habituellement appropriée aux défauts de capteurs et d'actionneurs, alors que la seconde est destinée aux défauts au niveau de la dynamique du procédé.

### 3.3. Exemple de modélisation de défauts

La littérature traitant le diagnostic est riche de travaux abordant les défauts additifs par rapports à ceux des défauts multiplicatifs. Ceci peut être expliqué par le fait, que dans la conception des systèmes de défauts, il est plus simple d'utiliser les défauts additifs car leur représentation se fait par des signaux externes contrairement aux défauts multiplicatifs qui engendrent des termes complexes dans la modélisation.

Pour la modélisation d'un défaut multiplicatif, l'exemple le plus utilisé dans la littérature est présenté dans [Nou et al, 2000] et [Rod, 2005].

En général, la sortie de l'organe de commande, composé de  $n$  actionneurs, en présence de défaillances est donnée comme suit:

$$u_f(t) = u(t) + (I - \Sigma)(\bar{u}(t) - u(t)) \quad (3-1)$$

où  $u_f(t) \in \mathfrak{R}^n$  représente le signal de sortie de l'organe de commande.

$\bar{u}(t) \in \mathfrak{R}^n$  une fonction inconnue qui représente une défaillance comme la perte d'efficacité d'un actionneur ou son blocage.

$$\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n), \quad \sigma_i \in [0 \ 1], \quad i = 1, \dots, n \quad (3-2)$$

si  $\sigma_i = 0$  on a un défaut total sur l'actionneur  $i$

et si  $\sigma_i = 1$ , l'actionneur est en fonctionnement normal

et si  $\sigma_i \in ]0,1[$ , le défaut est partiel

**O**n considère la classe de systèmes en fonctionnement normal décrits par l'équation d'état suivante:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3-3)$$

en présence de défaut l'équation (3-3) s'écrira comme suit:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu_f(t) \quad (3-4)$$

en remplaçant  $u_f(t)$  par son expression, l'équation (3-4) devient:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B[u(t) + (I - \Sigma)\bar{u}(t) - u(t)] \\ \dot{x}(t) &= Ax(t) + B[u(t) + (I - \Sigma)\bar{u}(t) - u(t)] \\ \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + B(I - \Sigma)(\bar{u}(t) - u(t)) \end{aligned} \quad (3-5)$$

on pose l'expression  $B(I - \Sigma)(\bar{u}(t) - u(t)) = Ff(t)$

**C**ette écriture permet alors d'avoir le défaut multiplicatif sous forme additive et de là on aura:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ff(t) \quad (3-6)$$

**À** partir de cette équation d'état, nous constatons que le défaut  $f(t)$  dépend de  $u(t)$ .

**L'**objectif du diagnostic est de constater l'apparition de défaut, d'en trouver la cause puis d'en déduire la démarche à suivre pour l'écarter, soit l'éliminer ou réduire son effet sur les performances du système.

**C**omme il a été présenté dans le chapitre 1, l'apparition d'un ou de plusieurs défauts entraînent un fonctionnement dégradé du système et peuvent même entraîner son instabilité. De plus, avoir plusieurs actionneurs ou capteurs (redondance physique) n'est pas une solution suffisante ni satisfaisante, car elle engendre des surcoûts importants aussi bien au niveau de l'investissement que du traitement de l'information. Par conséquent, pour contourner ce problème, on fait appel à la commande tolérante aux défauts basée sur la redondance analytique.

### 3.4. Evaluation des performances d'un système

La modélisation a pour objectif d'évaluer le comportement du système par rapport à l'occurrence ou à l'activation de défauts. Cette évaluation peut être qualitative, dans ce cas, destinée à identifier, classifier ou ordonner les modes de défaillances susceptibles d'entraîner les défaillances du système. Dans l'autre cas, elle est quantitative (probabiliste) destinée à évaluer les conséquences de l'occurrence ou de l'activation de défauts sur les attributs de la sûreté qui sont pris comme mesures. Ainsi, la modélisation des systèmes tolérants aux défauts peut être conduite selon les diverses classes de défauts et de leur interaction.

#### 3.4.1 Etude d'une commande d'un cas standard

La commande est définie par les paramètres suivants:  $\langle \gamma_g, S, \theta, U \rangle$

où  $\gamma_g$  : objectifs globaux du système

$S$  : structure du système

$\theta$  : secteur des paramètres du système

$U$  : ensemble des lois de commande.

Dans ce cas, il faut trouver une loi de commande  $u(t) \in U$  afin d'assurer les objectifs globaux  $\gamma_g$  du système sous les contraintes de la structure  $S$  et les paramètres du système  $\theta$ , tels que:  $\gamma_g$  définissent aussi les performances attendues du système,  $U$  définit les algorithmes utilisés pour commander le système,  $S$  définit l'ensemble des composants utilisés par le système et leur interconnexion [You et al, 2009]. La loi de commande regroupe l'ensemble des équations algébriques et différentielles qui représente le comportement des composants du système,  $\theta$  représente les différents paramètres du système [Gue et al, 2006].

**Remarque:** En l'absence de défauts, les objectifs globaux nominaux, notés  $\gamma_g^n$  sont atteignables à l'aide d'une loi de commande nominale  $u(t) \in U$  établie selon une structure nominale  $S_n$  et des paramètres  $\theta_n$  résolvant ainsi le problème de commande  $\langle \gamma_g^n, S_n, \theta_n, U \rangle$

### 3.4.2. Etude d'une commande en présence de défauts

Un système tolérant aux défauts est conçu pour améliorer les performances du système en présence de défauts. Ces derniers peuvent modifier la structure  $S_n$  et/ou les paramètres  $\theta_n$ , ce qui signifie que les objectifs globaux  $\gamma_g^n$  peuvent être non réalisés sous cette nouvelle structure et/ou sur ces nouveaux paramètres; notons que le premier type de défauts modifie la structure et/ou les paramètres, le deuxième type modifie l'ensemble de lois de commande quant au troisième est relatif au système lui-même.

- i) 1<sup>er</sup> type: un défaut peut affecter les actionneurs, les capteurs ou le système. Donc, il peut modifier la structure nominale  $S_n$  et/ou les paramètres  $\theta_n$ . La nouvelle structure et les nouveaux paramètres avec défauts sont alors notés respectivement  $S_f$  et  $\theta_f$ . Dans ce cas, une nouvelle formulation du problème de commande  $\langle \gamma_g^n, S_f, \theta_f, U \rangle$  est proposée dont la solution permet d'assurer les objectifs  $\gamma_g^n$ .
- ii) 2<sup>ème</sup> type: un défaut peut affecter la loi de commande (régulateur, algorithme de calcul...). Donc, il modifie l'ensemble des lois de commande admissibles  $U$  en un ensemble restreint  $U_f$ .
- iii) 3<sup>ème</sup> type: un défaut système peut lui aussi modifier l'ensemble  $U$ .

Enfin, la solution au problème en présence de défauts consiste à mettre en place des systèmes tolérants aux défauts.

La classification de défauts est exprimée en fonction de leur occurrence et accordée à de différents niveaux du système, comme il est déjà mentionné au chapitre 1. Les défauts peuvent se présenter comme montrés sur la Figure 3.1:

- des défauts actionneurs,
- des défauts capteurs,
- ou bien, des défauts sur le système lui-même.

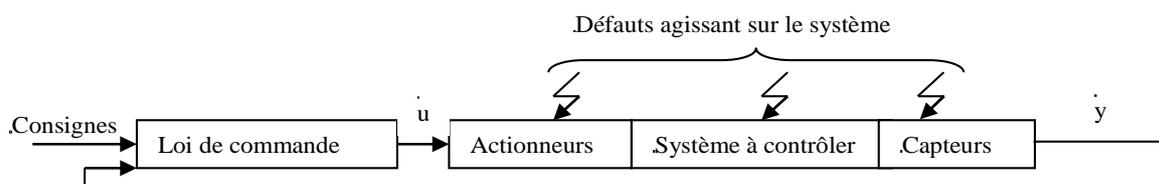


Figure 3. 1: Localisation de défauts.

- i) les défauts capteurs: se caractérisent par l'écart entre la vraie valeur de la grandeur et sa mesure,
- ii) les défauts actionneurs: se traduisent par l'incohérence entre la commande d'un actionneur et sa sortie.
- iii) les défauts à effets additifs qui correspondent à des entrées inconnues agissant sur le système, engendrent des variations des sorties du système dont l'amplitude dépend de la valeur des entrées connues et ils influencent aussi l'état du système ou les relations entrées- sorties au travers des sommations. Par contre, les défauts multiplicatifs représentent un changement de paramètres (abrupts ou gradués), ce qui cause l'évolution des sorties et dont l'amplitude dépend aussi de l'amplitude des entrées connues.

Concernant les fautes intermittentes, ne nécessitent ni passivation ni reconfiguration, leur identification peut être effectuée par un traitement d'erreur (récurrence d'une erreur) ou par diagnostic de défauts dans le cas de poursuite. Ainsi, l'application systématique de la compensation peut entraîner une diminution non perçue des redondances disponibles.

#### **4. Etat de l'art sur la commande tolérante aux défauts**

La plupart des formalismes développés pour la commande en automatique peuvent être utilisés pour la mise en œuvre des lois de commande tolérante aux défauts. Les objectifs visant à atteindre ces lois pour les systèmes défaillants sont minimes: régulation, poursuite de modèle et poursuite de trajectoire. En cas de dysfonctionnement, le système est décrit par les matrices d'état et de commande. [Bas, 1999], [Ait et al, 2002] et [Zha et al, 2006]

Lorsqu'un défaut est, plus ou moins, détecté, localisé et précisément diagnostiqué, des décisions doivent être prises et des actions automatiques ou humaines doivent être entreprises. Ceci implique que ces actions et ces décisions concernent alors, le système physique lui-même (en incluant, les capteurs, les actionneurs, etc.), sans omettre les sous-systèmes (ou appelé aussi fonction) du système automatisé telles que la commande, la surveillance et l'estimation.

D'après les travaux de [bla et al, 2003] et [Coc, 2004], les objectifs d'un sous-système sont toujours atteints même en présence de défaut. Dans ce cas, on dira que le sous-système est tolérant aux défauts et par conséquent la commande est tolérante aux défauts, estimation tolérante aux défaillances, etc. Concernant les travaux de Puig [Pui, 2008], l'approche passive

est utilisée dans le but d'étudier la robustesse dans la phase de détection de défauts, malgré la présence d'un nombre important de paramètres incertains dans le modèle. Les travaux de Youqing [You, 2007] montrent que la commande tolérante aux défauts par approche passive est inefficace pour la tolérance de défauts des capteurs, d'où la nécessité de l'approche active (AFTC). Dans [Zhu et al, 2009], les auteurs décomposent le système en deux sous-systèmes: le premier décrit le comportement normal et le second comprend l'expression des défauts et un observateur non linéaire pour estimer les défauts. Dans les travaux de Noura et al [Nou et al, 2009], la FTC est basée sur la loi de commande nominale associée à la détection de défauts, à l'estimation et à la modification de la commande courante, dans le but de compenser le défaut. Dans [Gue et al, 2009], les auteurs considèrent un système complexe découpé en sous-systèmes interconnectés dont les objectifs locaux sont assurés en termes de fiabilité et de performances statique et dynamique.

**D**ans ce cas, l'objectif local doit être redéfini pour accomplir l'objectif global, s'il n'est pas atteint, et là l'objectif global peut être admis avec un certain degré de tolérance.

**T**ous ces travaux, ainsi que d'autres, cherchent à conserver le fonctionnement du système avec des performances nominales, même après l'occurrence d'un défaut et cette optique correspond au cas idéal de tolérance aux défauts. Ainsi, il faut envisager ou bien il est possible d'envisager des dégradations de la commande. Alors, l'idée est de trouver, suite à un défaut ou une panne, des performances qui seront moins bonnes que les performances nominales mais qui seront suffisantes pour assurer le fonctionnement de façon sécuritaire jusqu'à la fin du service.

**A**près avoir présenté un tour d'horizon sur les travaux qui ont traités avec la tolérance aux défauts, il faut chercher l'idée d'avoir la tolérance aux défauts dans une vision qui présente des contraintes spécifiques.

**L**es défauts sont généralement compensés sans modification de la loi de commande et par conséquent, l'information en ligne sur ces défauts n'est pas nécessaire. De ce fait, le défaut est pris comme des incertitudes de modélisation auxquelles la commande doit être robuste et stabilisante. Dans les travaux de Patton [Pat, 1997], cette approche néglige la structure des incertitudes pour aboutir à une optimisation convexe. De plus, dans [Mah, 2004], la classe de défauts considérés est limitée, donc très risquée puisque certains défauts négligés peuvent endommager le système sous certaines conditions.

**C**ependant, de nombreux cas pratiques abordent la loi de commande pour un système quelconque sans prendre en considération la présence d'un défaut à un instant donné. Ceci est

dû essentiellement à des raisons techniques et aux coûts élevés. Ainsi, la commande tolérante aux défauts par approche active a été développée afin d'améliorer les performances des systèmes et de traiter un ensemble large de défauts. Les travaux ayant traités avec cette approche montrent qu'en présence de défauts, un bloc de détection/ localisation et estimation assure la détection du défaut, sa localisation et son estimation. Cette approche repose sur le calcul d'une nouvelle loi de commande par le biais d'une commande nominale sans défauts, en ajoutant un terme relatif au défaut afin de le compenser. Par le mécanisme de commutation du module de FDI, nous obtenons le passage d'un gain à un autre [Oud, 2008]. Une telle commande nécessite un module FDI très robuste, d'où l'inconvénient majeur de cette approche.

**D'**autres alternatives ont fait l'objet de travaux de recherche de l'approche basée sur un modèle de référence correspondant à un modèle de bon fonctionnement du système. La commande est, en général, composée de deux termes: un qui représente le retour d'état classique et l'autre relatif à l'erreur de poursuite entre la trajectoire de référence et celle du système. Le but est de minimiser cette erreur de poursuite de la trajectoire, ce qui revient à forcer le système en présence de défauts de se comporter comme un système de référence sans défaut.

#### **4.1. Principe de la tolérance aux défauts**

**P**our qu'un système soit tolérant aux défauts, nous allons définir et mettre en exergue la disponibilité de l'équipement et sa fiabilité selon que le système soit disponible et capable d'assurer son service même s'il tombe en panne.

**N**éanmoins, si une partie du système ne fonctionne plus et même si celui-ci est capable de fonctionner malgré le défaut, il sera malgré tout considéré en panne et il lui faut une maintenance corrective. Par conséquent, la tolérance aux défauts a pour objectif de rendre le système plus disponible et de là capable d'assurer son service le plus longtemps que possible.

**L**es études faites par les auteurs [Khe, 2011] et [Tus, 2012], cherchent à conserver le fonctionnement avec des performances nominales même après les défauts et cette optique correspond au cas idéal de la tolérance aux défauts.

#### **4.2. Paramètres de performances d'un système tolérant aux défauts**

**L**a tolérance aux défauts est l'aptitude d'un système à accomplir sa fonction malgré la présence de défauts, qu'ils s'agissent de dégradations physiques, de perturbations, etc. C'est un moyen pour garantir une sûreté de fonctionnement; cette sûreté peut être représentée par:

- i) des attributs qui présentent les concepts généraux de la sûreté de fonctionnement comme: la disponibilité, la fiabilité et la sécurité.
- ii) des entraves abordons les différentes méthodes de tolérance aux défauts et ceci d'une manière générale.
- iii) et en dernier lieu, ça peut être des moyens donnant lieu à des modèles d'application et présentant les techniques de tolérances de défauts spécifiques.

Néanmoins, pour qu'un système soit tolérant aux défauts, il faut avoir une vision globale de deux termes qui sont intimement reliés à savoir; la disponibilité et la fiabilité du système.

i) Disponibilité

Selon la norme NEEN13306<sup>2</sup>, la disponibilité est définie comme l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant une période de temps donné.

Pour un système donné,  $D(t)$  est défini comme la probabilité que le système soit capable de fournir le service, et donc disponible à l'instant  $(t)$ .

ii) Fiabilité

Selon la norme NF X06-501<sup>3</sup>, la fiabilité se définit comme l'aptitude d'un produit à accomplir une fonction requise dans des conditions d'utilisation données pendant une période déterminée.

Pour un système donné,  $F(t)$  est définie comme la probabilité que ce système soit non défaillant sur l'intervalle  $[0, T]$ .

Constations

*Un système plus fiable dure longtemps statistiquement et plus disponible aussi statistiquement, mais aussi la moindre faute engendre l'arrêt total du fonctionnement. Cependant, avoir un système peu fiable mais très disponible, par conséquent, tolérant aux défauts. Par contre, il est plus intéressant d'avoir un système moins fiable tolérant aux défauts (disponible) que d'avoir un système plus fiable et non tolérant aux défauts.*

## 5. Commande tolérante aux défauts des systèmes industriels

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. De ce fait,

<sup>2</sup>NEEN13306: Maintenance terminology. Rapport technique, European standard, June 2001

<sup>3</sup>NF X06-501: Applications de la statistique - Introduction à la fiabilité, Septembre 1984

il permet de garantir la stabilité du système et/ou des performances dégradées, acceptables en présence de défauts.

Les défauts apparaissent dans les équipements technologiques, les instruments de mesures (capteurs), les moyens de commandes (actionneurs) etc. Ces défauts sont classifiés selon une échelle de gravité allant de la détérioration au dysfonctionnement partiel et parfois jusqu'à la panne totale. Ainsi, les principaux objectifs de la commande tolérante aux défauts se résument en deux points:

- i) conserver la maîtrise du comportement dynamique du système commandé en dépit de la présence d'un dysfonctionnement,
- ii) le niveau de performance atteignable en situation de défaillance est soumis soit à la reconfigurabilité du système défaillant, soit à la compensation de l'effet du défaut.

La commande tolérante aux défauts (FTC) a pour but de s'accommoder automatiquement de l'effet de défaut tout en étant capable de maintenir la stabilité et au mieux les performances nominales du système. La conséquence est d'éviter l'arrêt immédiat du système et de permettre son fonctionnement en mode dégradé. Le problème majeur rencontré pour la conception de telles lois de commandes est que la plupart des techniques de diagnostic sont développées comme un outil de surveillance et non pas comme une partie intégrante de la commande. Par ailleurs, le problème général qui se pose est donc, de savoir comment intégrer les techniques de diagnostic existantes au profit de la commande tolérante aux défauts.

## **6. Classification de la commande tolérante aux défauts**

Les lois de commande tolérante aux défauts visent à garantir pour un système défaillant certaines performances ou bien à atteindre certains objectifs à savoir la stabilité, la poursuite d'une trajectoire, points évoqués dans le chapitre 2. Ces lois sont classifiées en deux catégories: les méthodes à commande passive et celles à commande active. Le choix de l'une ou de l'autre dépend du niveau de performance souhaité et de la gravité des défauts considérés [Bat et al, 2008].

La première catégorie repose sur la notion de robustesse et suppose que les différents modèles du système pour les différents défauts pouvant surgir sont connus et disposer d'information sur l'état du système en ligne n'est pas nécessaire. C'est-à-dire que le correcteur doit contrôler le système en mode de fonctionnement normal comme en présence de défauts.

Enfin, la robustesse aux défauts est obtenue en fonction d'un niveau de performances limité.

Concernant la deuxième catégorie, les lois de commande sont modifiées, en temps réel, afin de maintenir les performances du système. Les défauts les plus sévères sont tolérés et les performances obtenues sont meilleures que celles des lois de commande basées sur l'approche passive. Ces méthodes actives ainsi étudiées se divisent elles aussi en deux approches celle qui utilise la reconfiguration et celle qui repose sur l'accommodation.

### 6.1. Approche passive

Dans cette approche, les contrôleurs sont synthétisés de façon à être robustes à certains défauts. Elle est basée sur la simple idée que les défauts représentent des perturbations que la loi de commande doit prendre en compte dès sa conception initiale engendrant une structure de contrôle fixe dont les paramètres sont également fixes. Elle utilise les techniques de commande robuste par rapport aux incertitudes structurées que sont les défauts (technique  $H_\infty$ , commande à rejet de perturbation, modes glissants...). 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 structure et/ ou des paramètres du système de contrôle.

Cette stratégie de commande est basée sur l'idée de synthétiser une commande permettant de rendre le système insensible aux incertitudes de modélisation et à certains défauts connus a priori. De ce fait, le système en défaut continue d'opérer avec le même contrôleur, en gardant les mêmes objectifs et les mêmes performances que ceux du système nominal. Dans ce cas, le problème de commande est donné sous la forme  $\langle \gamma_g^n, S_f, \theta_f, U_f \rangle$  avec un défaut noté  $f \in F$ , où  $F$  représente l'ensemble de défauts considérés. Ainsi, le problème de commande  $\langle \gamma_g^n, S_f, \theta_f, U_f \rangle$  avec défaut et le problème de commande  $\langle \gamma_g^n, S_n, \theta_n, U_n \rangle$  ont une solution commune [Gue et al, 2006]. La Figure 3.2 représente l'architecture d'une commande tolérante aux défauts basée sur l'approche passive.

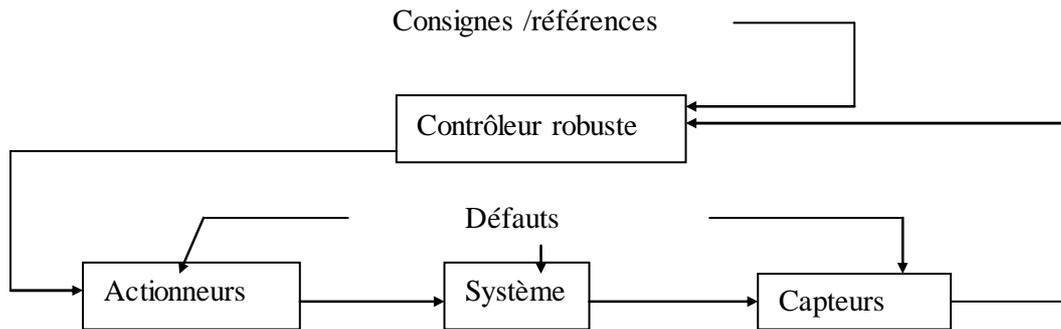


Figure 3. 2: Présentation d'un système PFTC.

Les consignes sont reçues par le contrôleur chargé de commander, en temps réel, l'activité en question. Une fois les signaux de commande sont élaborés, le contrôleur fonctionne en permanence pour assurer la poursuite de la référence, et l'atténuation des effets des perturbations et de quelques défauts qui sont définis au préalable (défauts prédéfinis), [Vei et al, 1992], [veil, 1995] et [Zha et al, 1998].

## 6.2. Approche active avec reconfiguration

À l'opposé des méthodes passives, les méthodes actives réagissent à l'apparition d'un ou de plusieurs défauts par la restructuration du système de contrôle. Leur objectif principal est de compenser au mieux l'effet des défauts sur le système afin que la stabilité et les performances du système soient maintenues en jouant sur la robustesse de la commande qui doit être améliorée à chaque détection d'un défaut. Elles sont composées essentiellement de trois éléments fondamentaux: une commande reconfigurable, un module de diagnostic permettant la détection, l'isolation et l'estimation de l'amplitude des défauts et un mécanisme de reconfiguration (Figure 3.3).

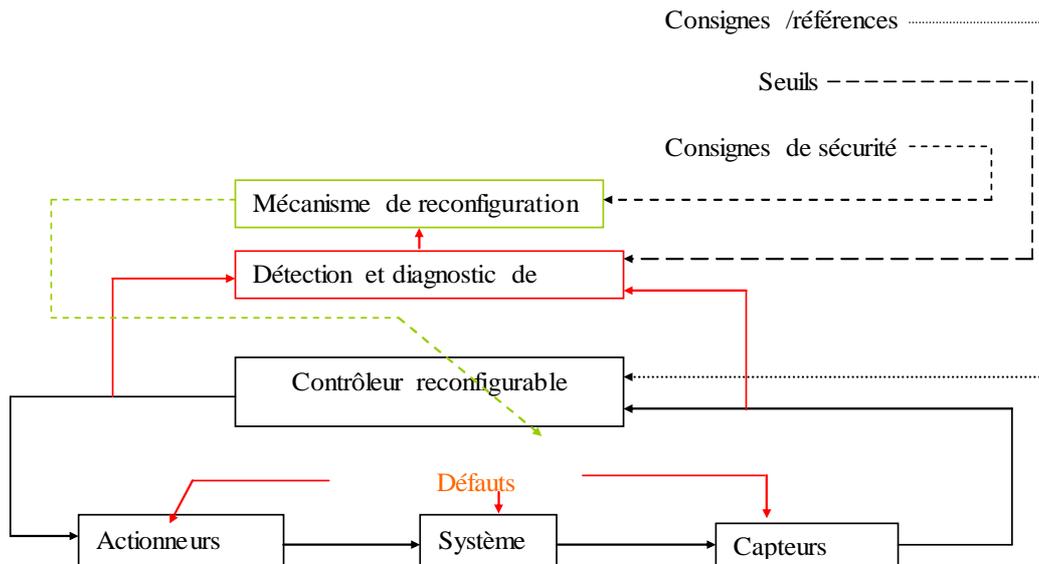


Figure 3. 3: Structure générale d'un système tolérant aux défauts

Ainsi, les systèmes tolérants "actifs" réagissent d'une manière "active" lorsque le défaut apparaît selon la sélection d'une loi de commande pré-calculée ou selon la synthèse d'une nouvelle loi de commande en ligne. Les deux approches nécessitent la présence d'un bloc diagnostic pour fournir des informations concernant l'état du système. [Gue et al, 2006]

### 6.2.1. Cas de lois pré- calculées

Ce type d'approches est basé sur l'idée qu'il existe un banc de régulateurs pré-calculés pour chaque mode de fonctionnement. Un régulateur pour le mode de fonctionnement nominal et un régulateur pour chaque mode défaillant. La sélection du régulateur associé au mode de fonctionnement actif (présent) est effectuée par le coordinateur, qui est constitué d'un ensemble d'estimateurs permettant la reconstruction des sorties du système pour chaque mode de fonctionnement. Après avoir évalué les performances de chaque mode, le régulateur concerné est sélectionné. La Figure 3. 4 donne le schéma de principe de cette approche.

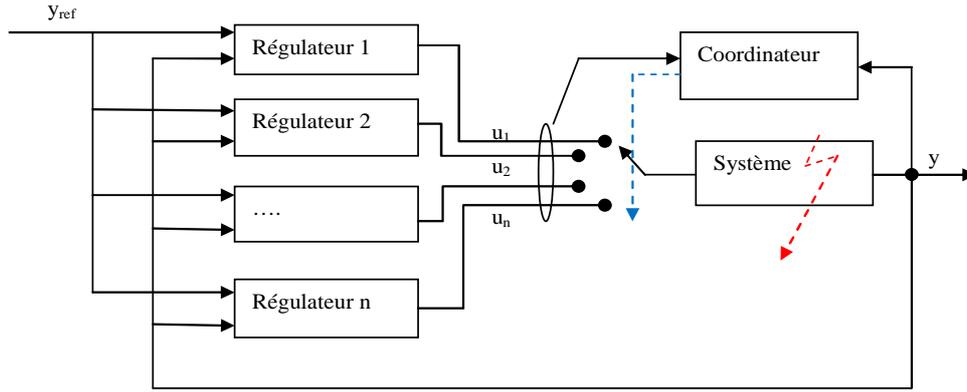


Figure 3.4: Principe du système tolérant aux défauts actif à base de banc de régulateur.

Dans le cas où il existe un nombre important de défauts, cette approche ne semble pas prometteuse car elle nécessite un nombre important de régulateurs à synthétiser.

### 6.2.2. Lois de commande synthétisées en ligne

Selon le défaut, en fonction de sa sévérité et les informations fournies par le bloc diagnostic, trois cas peuvent être considérés : l'accommodation, la reconfiguration ou la restructuration du système [Gue et al, 2006].

#### 6.2.2.1 Accommodation

Par estimation de la structure  $\hat{S}_f$  et des paramètres  $\hat{\theta}_f$  du système avec défauts, l'accommodation permet de résoudre le problème de commande  $\langle \gamma_g^n, \hat{S}_f, \hat{\theta}_f, U \rangle$ .

#### 6.2.2.2 Reconfiguration

La reconfiguration de la loi de commande est utilisée dans le cas où les parties défaillantes (actionneurs, capteurs ou régulateurs) ne peuvent pas être accommodées.

Notons par  $s_f = s'_n \cup s'_f$  la structure du système en présence de défauts incluant  $s'_f$  la structure associée aux parties défaillantes et  $s'_n$  la structure associée aux parties du système qui n'ont pas été affectées par le défaut.

Après l'occurrence du défaut, le bloc diagnostic détecte le défaut et le localise dans un sous-système (actionneurs et/ou capteurs) de  $s'_f$  et il déconnecte la partie  $s'_f$ , donc la nouvelle structure est  $s'_n$ . Dans la même logique, les paramètres sont donnés par  $\theta_f = \theta'_n \cup \theta'_f$  et l'ensemble de lois de commande admissibles est donné par  $U_f = U'_n \cup U'_f$ .

Une nouvelle formulation du problème de commande est alors proposée sous la forme  $\langle \gamma_g^n, S_f', \theta_f', U_f' \rangle$ .

### 6.2.2.3 Restructuration

Quand il n'existe pas de solution au problème de commande en utilisant l'accommodation et la reconfiguration, ceci signifie que les objectifs ne sont plus atteignables en présence de défauts. La seule possibilité est alors, de dégrader les objectifs en  $\gamma_g^d$  et d'essayer de trouver une solution au nouveau problème de commande. Cette stratégie est appelée reconfiguration des objectifs.

La restructuration consiste à trouver une solution au problème  $\langle \Gamma_g, \mathbb{S}, \Theta, U \rangle$

où:  $\Gamma_g$  : Ensemble des objectifs possibles.

$\mathbb{S}$ : Ensemble des structures possibles.

$\Theta$  : Ensemble des paramètres associés à  $\mathbb{S}$ .

U: Ensemble des lois de commande admissibles.

D'une autre manière, c'est d'essayer de trouver  $u \in U$  permettant d'assurer des objectifs dégradés  $\gamma_g^d \in \Gamma_g$  sous une structure  $S \in \mathbb{S}$  pour des paramètres  $\theta \in \Theta$ . [4]

Le problème critique dans cette approche active est la limitation du temps disponible pour recalculer la loi de commande à chaque instant de détection d'un défaut. Dans le cas stochastique, ce type d'approches engendre aussi un autre problème très étudié dans le cas déterministe. Lors d'une fausse alarme ou d'une non détection que se passe-t-il au niveau de la robustesse et des performances du système?

Certains travaux s'appuient sur les étapes spécifiques au traitement des défauts des systèmes de détection et d'identification voire diagnostic [Pol et al, 1995], [The et al, 2002] et [Yen, 2003].

Pour réaliser une reconfiguration performante du système de commande, les algorithmes de détection et de diagnostic de défauts (FDD) doivent fournir, en temps réel, l'information exacte sur l'état du système. [Bla, 2006]. Le schéma de principe de cette approche est donné par la Figure 3.5.

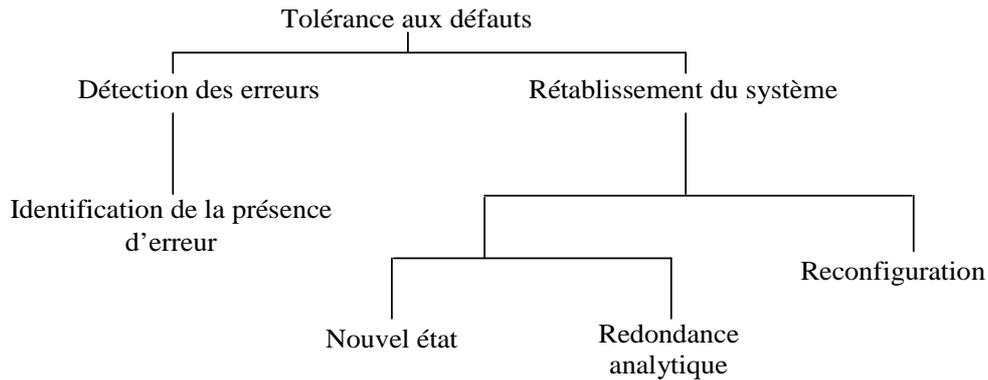


Figure 3. 5: Principe de détection de défauts.

### 6.3. Approche active avec accommodation

La commande tolérante aux défauts de type adaptative est une approche à accommodation active mais, où seuls les paramètres du contrôleur sont modifiés suite à l'occurrence d'un défaut. Elle possède donc une structure fixe. Dans le cas des systèmes linéaires à défauts additifs externes, elle consiste à générer un signal résidu reflétant le défaut à compenser. Ce résidu est alors utilisé pour générer la correction à apporter à la commande nominale du système (Nou et al 2000). Dans le cas où la correction n'est effectuée que lorsque le défaut est déclaré significatif par un test statistique, la commande adaptative résultante peut être classée dans la catégorie des méthodes actives car, elle est dépendante d'une prise de décision. (Figure 3.6)

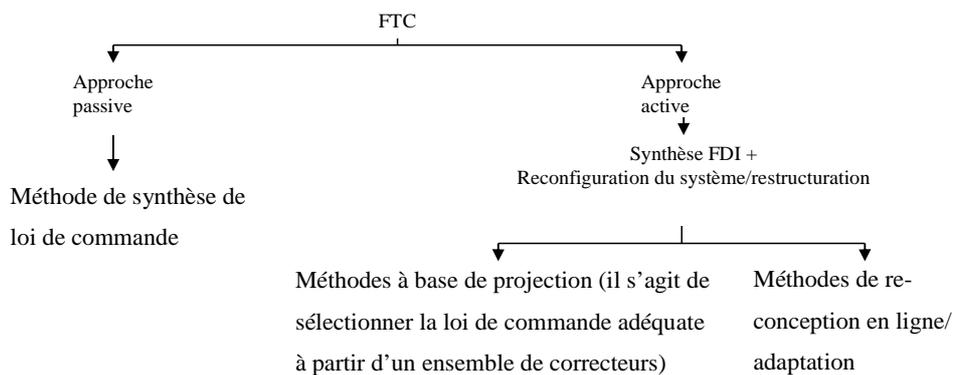


Figure 3. 6: Architecture de la commande tolérante aux défauts.

## 7. Commande adaptative floue tolérante aux défauts

La commande à caractère adaptatif ne doit être, en général, appliquée qu'à la suite d'une nécessité technique et du besoin d'une rentabilité économique difficile à obtenir par la mise en

œuvre d'une commande classique. Ces deux indicateurs (rentabilité et nécessité) s'expriment par, une minimisation du coût énergétique, une augmentation de la production, une amélioration de la qualité de produit, une minimisation de la variance d'une grandeur physique ou une réduction de temps d'une opération. L'environnement impose au processus d'être adaptatif et prédictif, afin d'élargir sa base de connaissance évolutive de manière continue, de contourner des modes de fonctionnement qui apparaissent graduellement et, en temps réel, qu'ils soient capables de remédier par anticipation à l'occurrence des modes dégradés. Donc, ceci peut se résumer en deux points:

- être adaptatif: c'est inclure de nouveaux modes de fonctionnement en temps réel,
- être prédictif: c'est d'anticiper les modes dégradés de fonctionnement.

**L**a commande adaptative est un ensemble de techniques permettant de fournir une approche systématique pour l'ajustement automatique d'un régulateur, en temps réel, dans le but d'achever ou de maintenir des performances désirées pour le système de commande quand la dynamique du procédé est inconnue et /ou changeable en cours du temps. Cependant, l'emploi de cette commande nécessite la modélisation du processus à commander. Or, cette dernière (la modélisation) n'est pas toujours évidente surtout quand il s'agit d'un système complexe et non linéaire. Les problèmes liés à la qualité des informations acquises limitent les performances du système commandé.

**P**ar ailleurs, les contrôleurs basés sur l'expertise humaine ont été largement utilisés dans la littérature. Leur principal avantage, réside dans le fait qu'ils ne nécessitent pas une modélisation mathématique du processus à commander. Cependant, les performances obtenues dépendent directement de la qualité de l'information fournie par l'opérateur humain. De plus, les premières générations de ces contrôleurs souffraient d'une mise en œuvre heuristique, ce qui rendait les automaticiens réticents à utiliser ces approches.

**L**es travaux de Mendel et Wang [Wan et al, 1992] ont permis de faire le lien entre la rigueur de l'automatique classique et la souplesse de la logique floue à travers le développement de la commande adaptative floue. Celle-ci combine les avantages de la commande adaptative classique et la capacité d'approximation des systèmes flous, ce qui permet de remédier au problème de modélisation tout en établissant une étude de stabilité rigoureuse en utilisant la théorie de Lyapunov. Vu les nombreux avantages de cette méthode, plusieurs approches basées

sur la commande adaptative floue ont été présentées dans la littérature [Wan, 1992] et [Wan, 1994]. Une telle architecture présente un grand intérêt dans le cas de la commande tolérante aux défauts, ce qui motive notre choix pour cette approche dans le chapitre suivant.

## **8. Conclusion**

**L**es systèmes tolérants aux défauts composés de leurs blocs de diagnostic, de reconfiguration, de régulation et gestion des références visent à garantir certaines performances ou à atteindre certains objectifs prédéterminés. Ces systèmes sont classés en approches passives et actives. Le choix de l'une ou de l'autre dépend du niveau de performance du système souhaité et de la gravité des défauts considérés.

**L**a commande passive n'est pas une solution optimale car elle tient compte des défauts dès la conception initiale en engendrant une structure de commande fixe à paramètres fixes.

**P**ar ailleurs, faire recours à l'approche active permet d'une part, de réagir à l'apparition du moindre défaut par la reconfiguration du système de contrôle (commande), d'autre part, de compenser au mieux l'effet des défauts sur le système afin que la stabilité et les performances soient maintenues en jouant sur la robustesse de la commande qui doit être améliorée à chaque détection de défaut. Par conséquent, le recours aux approches à accommodation adaptative, pour une meilleure fiabilité du système est nécessaire. Ainsi, l'utilisation d'une approche basée sur la commande adaptative floue serait une solution car elle permet à la fois, d'exploiter efficacement l'expertise humaine et d'utiliser les outils classiques de robustification.

# Chapitre 4. Commande adaptative floue tolérante aux défauts

## 1 Introduction

En raison d'une modernisation incessante des outils de production, les systèmes industriels deviennent de plus en plus complexes et sophistiqués. En parallèle, une demande accrue de fiabilité, de disponibilité, de reconfigurabilité et de sûreté de fonctionnement des systèmes sont devenus de véritables enjeux du troisième millénaire. L'automatique, qui repose sur une notion de système représentant un ensemble d'éléments formant un tout structuré, a permis à l'homme de développer des méthodes de supervision tels que le diagnostic et la commande tolérante aux défauts. L'objectif de cette dernière est de maintenir les objectifs nominaux en dépit de l'occurrence d'un défaut et à s'accommoder de manière automatique. Elle permet notamment de garantir la stabilité du système et/ou des performances dégradées acceptables en présence de défauts [Vei et al, 1992], [Vei, 1995], [Yan et al, 2001], [Wan et al, 2007], [Lia et al, 2002], [Wu et al, 2006] et [Zha et al, 2008]. Dans le cadre de l'approche passive (Passive Fault Tolerant Control, PFTC) [Vei et al, 1992] et [Zha et al, 1998], les régulateurs sont synthétisés de façon à être robuste vis-à-vis de certains défauts. Cette approche présente l'avantage qu'elle ne nécessite aucun schéma de détection de défauts ni aucune reconfiguration de loi de commande.

Récemment, plusieurs approches adaptatives ont été développées dans la littérature pour compenser les défauts des actionneurs pour une large classe de systèmes. Ainsi, dans [Bos et al, 1998] et [Tao et al, 2004], les auteurs ont développé une commande pour un système linéaire présentant des blocages au niveau de l'actionneur. Dans [Tan et al, 2007], les auteurs ont étudié une classe de systèmes non-linéaires multi-variables. Dans [Yan et al, 2006] et [Ye et al, 2006], une commande basée sur la technique LMI a été proposée pour remédier à la perte d'efficacité des actionneurs. Les approches mentionnées précédemment permettent certes d'assurer de bonnes performances en compensant les défauts sans identification, mais seuls les cas où les dynamiques du système sont parfaitement connues ou les paramètres inconnus sont linéaires ont été traités.

En se basant sur le théorème de l'approximation universelle, plusieurs commandes adaptatives floues pour des systèmes non-linéaires ont été développées dans la littérature [Wang

et al, 1992] et [Wang, 1994]. Dans le cadre de la commande tolérante aux défauts, Li et Yang ont proposé dans [Li et al, 2008], une commande adaptative floue qui prend en compte les blocages et les défaillances des actionneurs. Néanmoins, l'utilisation de deux systèmes flous pour l'approximation de la dynamique du système ainsi que les lois de projection rendent la mise en œuvre complexe et nécessitent des informations sur le système. De plus, le cas d'un système perturbé n'a pas été traité. Pour y remédier, les auteurs ont proposé dans [Li et al, 2009] une nouvelle commande par backstepping utilisant des systèmes flous adaptatifs pour un système perturbé. Cependant, la mise en œuvre de celle-ci nécessite la connaissance de la borne supérieure des perturbations et des hypothèses restrictives sur la dynamique du système. De plus les systèmes flous utilisés ne permettent pas de prendre en compte les éventuelles incertitudes dans l'information issue de l'expertise humaine.

**D**ans ce chapitre, nous présentons notre contribution à la commande adaptative floue robuste tolérante aux défauts pour remédier aux problèmes cités ci-dessus. Ainsi, trois approches sont proposées. La première, basée sur la commande adaptative floue directe, utilise les modes glissants pour assurer la robustesse du système bouclé en présence des erreurs d'approximation, des défauts d'actionneurs et des perturbations externes [Ben et al, 2010a]. Néanmoins, cette commande assure seulement la convergence de la surface de glissement vers un ensemble borné dont les extrémités ne peuvent pas être déplacées. Pour contourner ce problème, nous avons proposé une seconde approche où nous avons réussi à réduire la largeur de cet ensemble [Ben et al, 2010b].

Cependant, l'utilisation d'un système flou de type-1 ne permet de prendre en compte les incertitudes de modélisation et les erreurs d'interprétation des informations linguistiques émanant de l'expert humain. Ainsi, la troisième approche permet de résoudre ces problèmes en utilisant une commande adaptative floue robuste indirecte utilisant également les modes glissants. Pour les trois approches, on considère tous les défauts pouvant affecter les actionneurs à savoir la perte d'efficacité (partielle et totale) et le blocage à l'opposé des approches développées dans la littérature. De plus, le signal de modes glissants a été modifié de telle sorte que le chattering soit évité. Pour chaque approche, des résultats de simulation sont présentés pour illustrer ses performances. Pour la clarté du chapitre, nous avons choisi de traiter le cas SISO pour la première et la troisième approche et le cas MIMO dans la seconde approche [Ben et al, 2010a] et [Ben et al, 2013].

# 1<sup>ère</sup> Approche: Commande adaptative floue directe robuste

## 1. Formulation du problème

On considère système non-linéaire décrit par les équations différentielles suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1} & 1 \leq i \leq n-1 \\ \dot{x}_n = f(\underline{x}) + \underline{g}^T(\underline{x})\underline{u} + d(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (4-1)$$

où  $\underline{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  représente le vecteur d'états,  $\underline{u} = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T \in \mathfrak{R}^m$  les entrées du système dont des éléments pouvant présenter des défaillances durant le fonctionnement, et  $y \in \mathfrak{R}$  la sortie du système.  $\underline{g}^T(\underline{x}) = [g_1, g_2, \dots, g_m]^T \in \mathfrak{R}^m$  et  $f(\underline{x})$  deux fonctions continues mais inconnues.

$d$  représente les perturbations externes supposées inconnues mais bornées. Dans ce cas, nous supposons que les états  $x_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) sont mesurables et le signal de référence  $y_{ref}(m)$  est borné et suffisamment dérivable.

Le système considéré est multi-entrée mono-sortie où les signaux d'entrée ont un seul objectif, assurer une bonne poursuite et la stabilité globale du système en boucle fermée. Par hypothèse, nous tenons compte de deux types de défauts actionneurs :

La perte d'efficacité qui peut être modélisée comme suit :

$$\begin{cases} u_i(t) = \rho_i v_i(t) & 1 \leq i \leq m \\ \rho_i \in [0, 1] \end{cases} \quad (4-2)$$

et le blocage, défini par :

$$u_i(t) = \bar{u}_i \quad \forall t \geq t_i, i \in \{1, \dots, m\} \quad (4-3)$$

où  $\rho_i$  est le taux d'efficacité de la  $i^{ième}$  entrée. La valeur  $\rho_i = 1$  correspond à un comportement normal de l'actionneur.  $\bar{u}_i$  représente la valeur du blocage apparu au niveau de la  $i^{ième}$  entrée.

En tenant en compte des deux défauts actionneurs (4-2) et (4-3), le signal de commande peut être donné par:

$$\underline{u}(t) = \rho \underline{u}(t) + \sigma (\bar{u} - \rho \underline{u}(t)) \quad (4-4)$$

où  $\underline{v}(t) = [v_1, \dots, v_m]^T$  le signal de commande appliqué,  $\rho = \text{diag}(\rho_1, \dots, \rho_m)$ ,  $\bar{u} = [\bar{u}_1, \dots, \bar{u}_m]^T$ . Le vecteur  $\rho$  est défini par :

$$\begin{cases} \sigma = \text{diag}\{\sigma_1, \dots, \sigma_m\} \\ \sigma_i = \begin{cases} 1 & \text{si } u_i = \bar{u}_i \\ 0 & \text{sin on} \end{cases} \end{cases} \quad (4-5)$$

L'objectif est de synthétiser la commande adaptative floue robuste par modes glissants pour le système (4-1) soumis à des défauts de la forme (4-2) et (4-3) permettant d'assurer de bonnes performances de poursuite et la stabilité du système en boucle fermée. A partir de l'équation (4-4), il serait judicieux de supposer qu'en présence de défaillances, d'avoir au moins un actionneur actif et par conséquent le système reste contrôlable. Dans ce cas, nous proposons d'utiliser une structure de commande de la forme suivante [Li et al, 2008] :

$$\underline{v}(t) = \underline{b} v_0(t) \quad (4-6)$$

où  $\underline{b} = [b_1, \dots, b_m]^T$  représente la matrice de proportionnalité et  $v_0(t)$  la loi de commande adaptative floue robuste proposée. En utilisant les équations (4-4) et (4-6), le système étudié (4-1) peut être décrit par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1} \\ \dot{x}_n = f(\underline{x}) + \underline{g}^T(\underline{x}) \sigma \bar{u} + \underline{g}^T(\underline{x}) \rho \underline{b} (I - \sigma) v_0(t) + d(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (4-7)$$

ou par :

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1} \\ \dot{x}_n = f_d(\underline{x}) + \underline{g}^T(\underline{x}) \rho \underline{b} (I - \sigma) v_0(t) + d(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (4-8)$$

avec :  $f_d(\underline{x}) = f(\underline{x}) + \underline{g}^T(\underline{x}) \sigma \bar{u}$

Dans ce qui suit, nous présentons la mise en œuvre de la loi de commande proposée qui combine les systèmes flous adaptatifs et les modes glissants.

## 2. Système flou

Si l'on utilise le singleton pour la fuzzification, le produit comme moteur d'inférence et le centre de gravité pour la défuzzification, la sortie du système floue peut être alors donnée

par:

$$y(x) = \frac{\sum_{i=1}^{m_0} y_i \left( \prod_{j=1}^n \mu_i(x_j) \right)}{\sum_{i=1}^{m_0} \mu_i(x_j)} \quad (4-9)$$

où  $\mu_i(x_j)$  représente le degré d'appartenance de l'entrée  $x_j$ ,  $y_i$  la conclusion de la  $i^{ieme}$  règle et  $m_0$  le nombre de règles floues utilisées.

La sortie du système flou (4-9) peut être réécrite sous la forme vectorielle suivante [Wan, 1994]:

$$y(x) = \underline{\psi}^T \underline{\phi}(x) \quad (4-10)$$

où  $\underline{\psi} = [y_1, \dots, y_m]^T$  représente le vecteur des paramètres ajustables et

$$\underline{\phi}(x) = \left[ \frac{\prod_{j=1}^n \mu_1(x_j)}{\sum_{i=1}^{m_0} \prod_{j=1}^n \mu_i(x_j)}, \dots, \frac{\prod_{j=1}^n \mu_{m_0}(x_j)}{\sum_{i=1}^{m_0} \prod_{j=1}^n \mu_i(x_j)} \right]^T \text{ celui de régression.}$$

En se basant sur le théorème de l'approximation universelle [Wan, 1994], il existe un système flou optimal de la forme (4-10) qui approxime uniformément une fonction continue  $h(x)$  sous une forme compacte telle que :

$$h(x) = \underline{\psi}^{*T} \underline{\phi}(x) + \varepsilon \quad (4-11)$$

où  $\varepsilon$  une constante positive.

### 3. Commande par modes glissants

Pour atteindre nos objectifs, nous proposons d'utiliser une commande floue par modes glissants. Le choix de cette approche est motivé par le fait que la logique floue permet de s'affranchir de la connaissance exacte des fonctions dynamiques du système et les modes glissants assurent la robustesse et la stabilité en présence de défauts et de perturbations. Considérons la surface de glissement suivante:

$$s(t) = e^{n-1}(t) + \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_{i-1} e^{(i-1)}(t) \quad (4-12)$$

où  $e(t) = y_{ref}(t) - y(t)$  étant l'erreur de poursuite et  $e^i(t)$  sa  $i^{ieme}$  dérivée. Les constantes  $\lambda_i$  sont

choisies de telle sorte que le polynôme correspondant soit stable [Tan et al, 1999].

Dans le cas où  $f_d(\underline{x})$  et  $\underline{g}^T(\underline{x})\rho\underline{b}(I-\sigma)$  sont parfaitement connues, la loi de commande peut être donnée par:

$$\begin{aligned} v_0 = & \left[ \underline{g}^T(\underline{x})\rho\underline{b}(I-\sigma) \right]^{-1} \left[ f_d(\underline{x}) + y_r^{(n)} + \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_{i-1} e^{(i)}(t) \right] \\ & + \left[ \underline{g}^T(\underline{x})\rho\underline{b}(I-\sigma) \right]^{-1} [k_d \text{sign}(s(t))] \end{aligned} \quad (4-13)$$

où  $k_d$  est une constante positive choisie de telle sorte que la condition de glissement soit satisfaite  $s(t).\dot{s}(t) < 0$ .

Etant donné que les dynamiques du système étudié et les défauts actionneurs sont inconnus, la loi de commande (4-13) ne peut être utilisée. Pour y remédier, on peut utiliser une commande adaptative floue. Pour atteindre notre objectif sans pour autant utiliser des contraintes restrictives, nous proposons dans ce qui suit de regrouper les dynamiques inconnues dans une seule fonction, puis utiliser un système flou adaptatif comme approximateur. Son adaptation se fera selon une loi déduite de l'étude de stabilité au sens de Lyapunov.

#### 4. Synthèse de la loi de commande proposée

Cette section est dédiée à la synthèse de la commande adaptative floue robuste proposée.

En utilisant (4-8), la dérivée de la surface de glissement (4-12) est donnée par:

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) = & e^n(t) + \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_{i-1} e^{(i)}(t) \\ \dot{s}(t) = & y_{ref}^{(n)} - f_d(\underline{x}) - \left[ \underline{g}^T(\underline{x})\rho\underline{b}(I-\sigma) \right] v_0 - d + \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_{i-1} e^{(i)}(t) \end{aligned} \quad (4-14)$$

Pour simplifier la structure de la loi de commande, on compacte les dynamiques inconnues en une seule fonction:  $f_c(\underline{x}) = f_d(\underline{x}) + d - \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_{i-1} e^{(i)}(t)$

Dans ce cas, nous obtenons:

$$\dot{s}(t) = y_{ref}^{(n)} - f_c(\underline{x}) - \left[ \underline{g}^T(\underline{x})\rho\underline{b}(I-\sigma) \right] v_0 \quad (4-15)$$

Le système étant toujours commandable, alors  $\left[ \underline{g}^T(\underline{x})\rho\underline{b}(I-\sigma) \right] \neq 0$ . Ainsi, il existe une

constante positive telle que:  $\left[ \underline{g}^T(\underline{x}) \rho \underline{b} (I - \sigma) \right] > g_0 > 0$ . Il est à noter que le cas négatif peut être également traité de la même manière.

Pour approximer les fonctions inconnues, un système flou donné par:  $\underline{\psi}^T \underline{\phi}(x)$  est considéré. Une nouvelle variable  $\alpha$  peut être définie par :  $\alpha = g_0^{-1} \|\underline{\psi}\|^2$  et l'erreur d'approximation est donnée par:  $\tilde{\alpha} = \alpha - \hat{\alpha}$  avec :  $\dot{\tilde{\alpha}} = -\dot{\hat{\alpha}}$ .

### Proposition

*Supposons la loi de commande suivante:*

$$v_0 = M_{0..s}(t) + \frac{\hat{\alpha}}{2\beta^2} \underline{\phi}(\underline{x})^T \underline{\phi}(\underline{x}) s(t) \quad (4-16)$$

*munie de la loi d'adaptation exprimée par :*

$$\dot{\hat{\alpha}} = \frac{\gamma}{2\beta^2} \underline{\phi}(\underline{x})^T \underline{\phi}(\underline{x}) s(t) \quad (4-17)$$

*qui permet d'assurer la stabilité globale du système bouclé en présence de perturbations et de défauts actionneurs. Elle permet également d'assurer la bornitude des variables d'états.*

### Preuve

*En utilisant (4-15), (4-16), (4-17) et le fait que le signal de référence  $y_{ref}^{(n)}$  est borné, nous pourrons écrire:*

$$s(t)\dot{s}(t) \leq \frac{g_0\alpha}{2\beta^2} \underline{\phi}(\underline{x})^T \underline{\phi}(\underline{x}) s^2(t) + \frac{\beta^2}{2} + \frac{g_0 s^2(t)}{\eta^2} + \frac{\eta^2(\varepsilon^2 + \chi^2)}{2g_0} - \left[ \underline{g}^T(\underline{x}) \rho \underline{b} (I - \sigma) \right] v_0 \quad (4-18)$$

*où  $\eta$  et  $\chi$  sont deux constantes positives.*

*Pour étudier la stabilité et déduire la loi d'adaptation, on considère la fonction de Lyapunov suivante :*

$$V = \frac{1}{2} s^2(t) + \frac{g_0}{2\beta^2} \tilde{\alpha}^2 \quad (4-19)$$

*En utilisant (4-18) et (4-17), la dérivée de la fonction de Lyapunov devient :*

$$\dot{V} \leq \frac{1}{2} \left[ \beta^2 + \frac{\eta^2(\varepsilon^2 + \chi^2)}{g_0} - g_0 \sigma \alpha^2 \right] + \left[ -2g_0 M_0 \frac{s^2(t)}{2} - g_0 \eta \sigma \frac{\tilde{\alpha}^2}{2} \right] \quad (4-20)$$

$$\text{Soit } a_0 = \frac{1}{2} \left[ \beta^2 + \frac{\eta^2(\varepsilon^2 + \chi^2)}{g_0} - g_0 \sigma \alpha^2 \right] \text{ et } b_0 = \min(2g_0 M_0, \eta \sigma)$$

Ainsi, la dérivée de la fonction de Lyapunov  $V$  peut être réécrite sous la forme suivante:

$$\dot{V} \leq a_0 + b_0 V(0) \quad (4-21)$$

ce qui donne:

$$V(t) \leq V(0) \exp(-a_0 t) + \frac{b_0}{a_0} \quad \forall t \geq 0 \quad (4-22)$$

Ainsi, la fonction de Lyapunov converge au voisinage de zéro  $\frac{b_0}{a_0}$ . Ceci implique que toutes les variables d'état restent bornées. De plus, nous avons la surface de glissement qui est bornée:  $\lim_{t \rightarrow \infty} s(t) \leq 2 \frac{b_0}{a_0}$ , ce qui implique la convergence de l'erreur de poursuite au voisinage de zéro [Slo, 1991].

## 5. Exemple de simulation

Pour illustrer les performances de l'approche proposée, nous l'appliquons sur un système non-linéaire incertain et perturbé régi par les équations suivantes:

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{5 \sin x_1 - 0.02 x_2^2 \cos(x_1) \sin(x_1)}{3 - 0.2 \cos^2(x_1)} + \frac{\cos^2(x_1)}{3 - 0.2 \cos^2(x_1)} u_1 + \frac{\cos^2(x_1)}{3 - 0.2 \cos^2(x_1)} u_2 + d \quad (4-23)$$

où  $u_1$  et  $u_2$  sont les signaux de commande,  $x_1$  la sortie du système et  $d$  les perturbations externes supposées de la forme  $0.1 \sin(2t)$ . Nous considérons la régulation et la poursuite d'une trajectoire sinusoïdale où les gains d'efficacité des actionneurs  $\rho = \text{diag}(\rho_1, \rho_2)$  évoluent comme suit :

$$\rho_1 = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 4s \\ 0.8 & 4 \leq t < 6s \\ 0.2 & 6 \leq t < 20s \end{cases} \quad (4-24)$$

$$\rho_2 = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 4s \\ 0.7 & 4 \leq t < 6s \\ 0.4 & 6 \leq t < 20s \end{cases} \quad (4-25)$$

Au niveau du blocage, supposons que l'actionneur  $u_1$  se bloque sur la valeur 1 à partir de l'instant  $t=10s$ . Au niveau du système flou, nous avons utilisé 25 règles floues avec des valeurs initiales  $\alpha=0_{25}$  et un taux d'apprentissage  $\gamma=4.250$ .

Dans le cas de régulation présenté par les Figures 4.1 et 4.2 ou dans le cas de poursuite donné par les Figures 4.3 et 4.4 et malgré l'intensité des défauts, la commande proposée arrive à forcer le système à converger vers le signal de référence. En plus, dans les deux cas, les signaux de commande sont lisses et ne présentent aucun broutement à l'opposé des approches utilisant les modes glissants classiques.

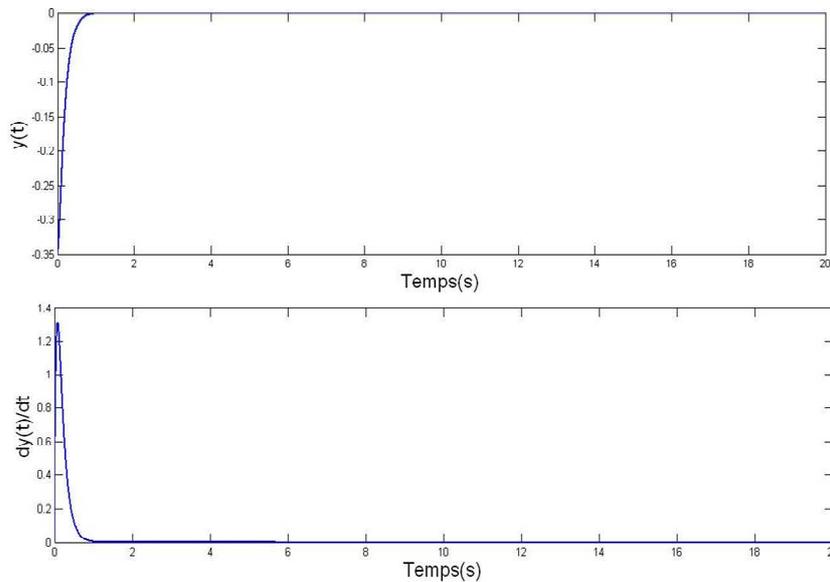


Figure 4. 1: Evolution des variables d'états.

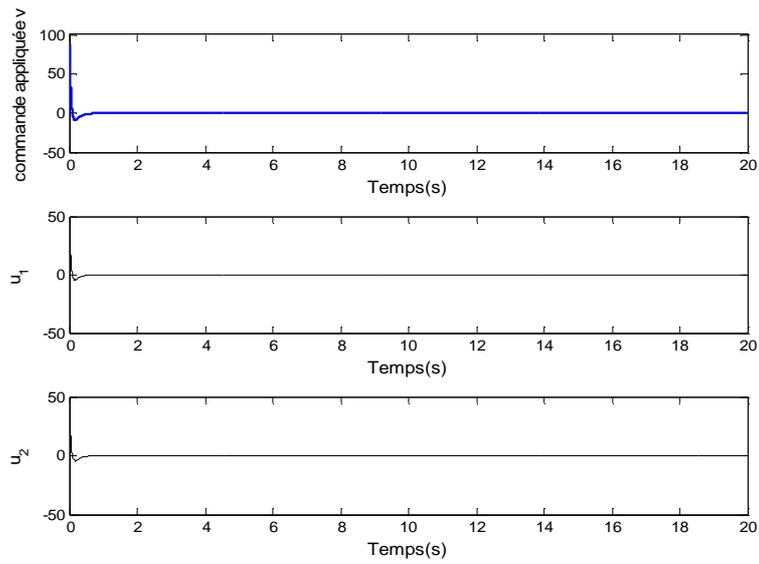


Figure 4. 2: Signaux de commande

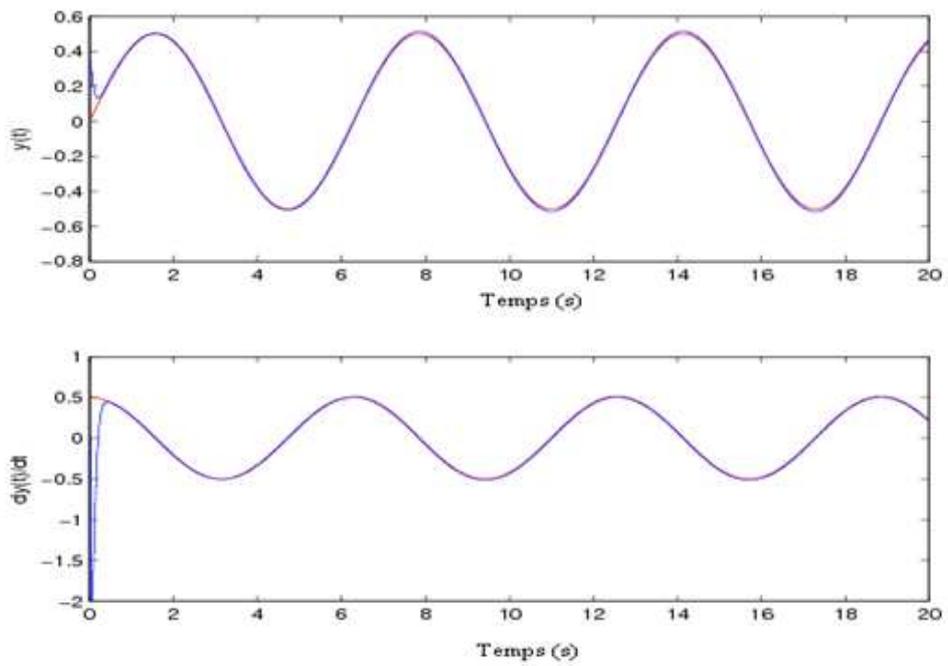


Figure 4. 3: Evolution des variables d'états.

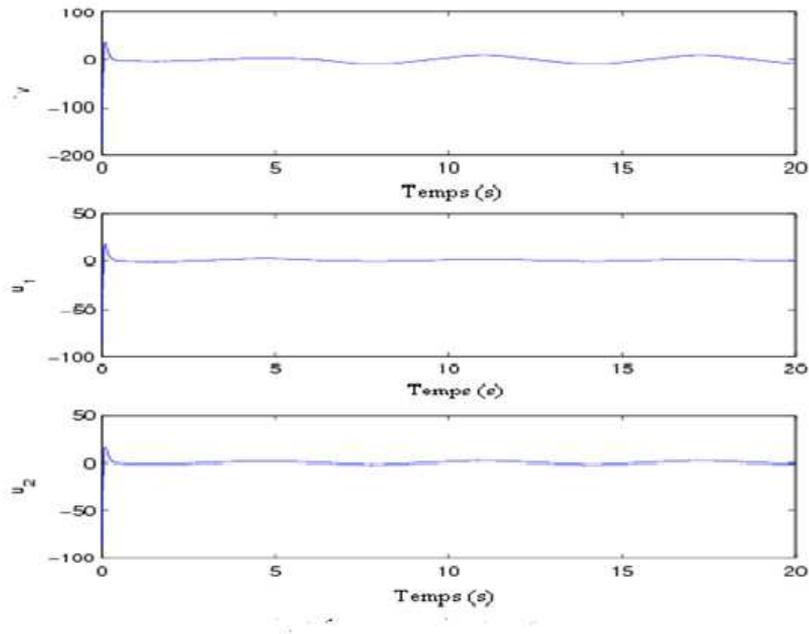


Figure 4. 4: Signaux de commande

## 6. Conclusion

Plusieurs résultats de simulation ont été présentés pour illustrer les performances de l'approche proposée. L'étude a montré que la structure de commande adoptée permet d'utiliser un seul système adaptatif flou pour approximer les fonctions inconnues. La robustesse du système bouclé vis à vis des perturbations externes et des défauts actionneurs est garantie par l'utilisation des modes glissants. Néanmoins, avec cette méthode on ne peut garantir la convergence de l'erreur qu'au voisinage de zéro dont les paramètres ne sont pas accessibles pour réduire de voisinage.

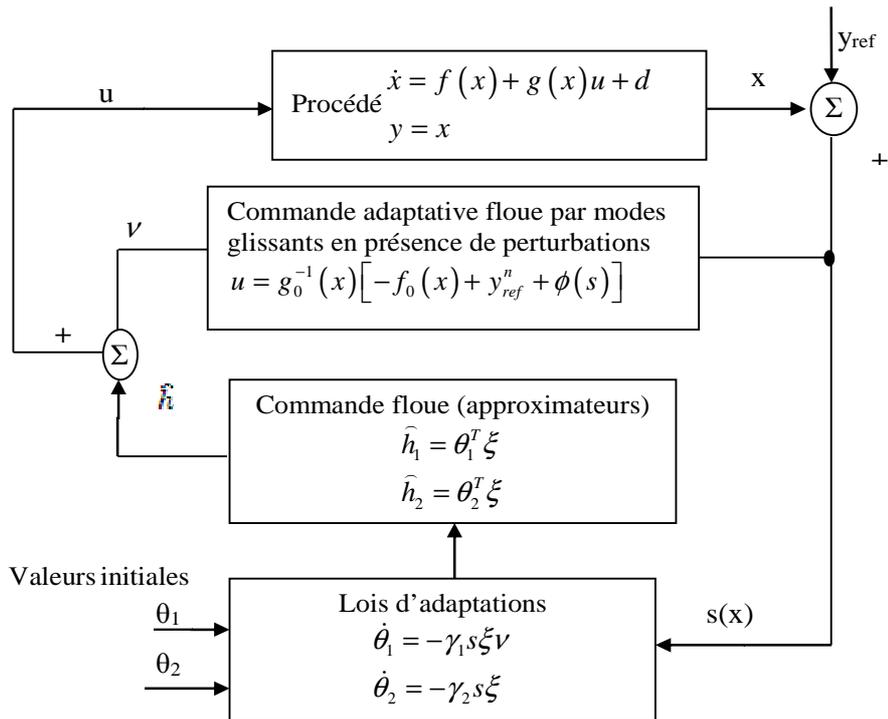


Figure 4. 5: Schéma global de la commande adaptative floue par modes glissants en présence de défauts

## 2<sup>ème</sup> Approche: Commande adaptative floue directe robuste

Dans cette deuxième partie, la commande adaptative floue tolérante aux défauts actionneurs d'un système inconnu non linéaire MIMO sujet de perturbations externes est développée. Inspiré des travaux de Essounbouli [Ess et al, 2006] et Labiod [Lab et al, 2007], un nouveau schéma de commande adaptative floue tolérante aux défauts est proposé utilisant la commande à modes glissants quand la redondance structurelle d'action est exploitée. Le blocage et la perte d'efficacité des actionneurs peuvent être tolérés.

### 1. Description du problème

Considérons le système dynamique non linéaire avec multiples entrées et multiples sorties, MIMO, décrit par l'ensemble d'équations différentielles suivant:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1^{(n)} = f_1(x) + \sum_{j=1}^p g_{1j}^T(x) u_j + d_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_i^{(n)} = f_i(x) + \sum_{j=1}^p g_{ij}^T(x) u_j + d_i \\ \cdot \\ \cdot \\ y_p^{(n)} = f_p(x) + \sum_{j=1}^p g_{pj}^T(x) u_j + d_p \end{array} \right. \quad (4-26)$$

où  $f_i \in \mathfrak{R}$  et  $g_{ij} \in \mathfrak{R}^{ni}$  ( $i, j=1, \dots, p$ ) sont deux fonctions continues, lisses, bornées et inconnues,  $u_j \in \mathfrak{R}^{ni}$  est la commande d'entrée de la sortie  $y_i$  ( $i=1, \dots, p$ ) et  $d_i$  représente les perturbations externes.

$\underline{x} = [y_1, \dot{y}_1, \dots, y_1^{(n-1)}, \dots, y_p, \dots, y_p^{(n-1)}]^T$  est le vecteur d'état. Reproduisant l'expression relative à l'interconnexion entre le sous-système et les perturbations externes en un seul terme  $d_{mi}$  à travers (4-26) on obtient:

$$\begin{cases} y_1^{(n)} = f_1(\underline{x}) + g_{11}^T \underline{u}_1 + d_{m1} \\ y_i^{(n)} = f_i(\underline{x}) + g_{ii}^T \underline{u}_i + d_{mi} \\ y_p^{(n)} = f_p(\underline{x}) + g_{pp}^T \underline{u}_p + d_{mp} \end{cases} \quad (4-27)$$

Le but de la commande, dans ce cas, est de concevoir un contrôleur adaptatif flou robuste pour le système (4-26) avec des défauts actionneurs à des instants inconnus. Ainsi, nous pouvons noter le modèle général du défaut actionneur dans le cas multivariable comme suit [Xia et al, 2009]:

$$u_{ij} = \rho_{ij} u_{ij} + \sigma_{ij} \bar{u}_{ij}, i=1, \dots, p \quad j=1, \dots, n_i \quad (4-28)$$

où  $\rho_{ij}$  est le pourcentage de la partie efficace restante de l'actionneur correspondant. L'étude est faite selon les hypothèses suivantes:

Si  $\rho_{ij} = 1$  il n'y a pas occurrence de défauts, ie, l'actionneur est normal et ne présente aucune défaillance.

Dans le cas où  $\rho_{ij} = 0$ , nous avons une perte totale d'efficacité qui n'est pas considérée, mais elle est incluse dans  $\bar{u}_{ij} = 0$ ; où  $\bar{u}_{ij}$  est la valeur constante où l'actionneur est bloqué à un endroit inconnu et  $u_{ij}$  représente le vecteur commande appliqué. Le défaut blocage est décrit par le cas où  $\sigma_{ij} = 1$  qui implique la perte totale d'efficacité  $\rho_{ij} = 0$ .

En résumé, les défauts pris en considération dans cette deuxième approche sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau 4 1: Paramètres du modèle de défaut actionneur

Défaut	$\rho_{ij}$	$\sigma_{ij}$
Normal	1	0
Bloqué	0	0
Perte d'efficacité	$\in ]0,1[$	0

Comme dans l'approche précédente, on suppose qu'au moins un actionneur reste actif. Dans ce cas, nous proposons d'utiliser également une structure d'actionneur proportionnelle présentée comme suit:

$$v_{ij} = b_{ij} v_{i0} \quad (4-29)$$

où  $b_{ij} (i=1, \dots, P \quad j=1, \dots, n)$  présente le gain de la matrice proportionnelle et  $u_0$  est le  $i$ ème élément de la commande adaptative floue robuste proposée. En utilisant les équations (4-28) et (4-29), le système (4-27) peut être décrit par:

$$\begin{cases} y_1^{(n)} = f_{m1}(\underline{x}) + g_{m1}v_{10} + d_{m1} \\ y_i^{(n)} = f_{mi}(\underline{x}) + g_{mi}v_{i0} + d_{mi} \\ y_p^{(n)} = f_{mp}(\underline{x}) + g_{mp}v_{p0} + d_{mp} \end{cases} \quad (4-30)$$

où  $f_{mi}(\underline{x}) = f_i \underline{x} + \left( \sum_{j=1}^{ni} g_{ij} \sigma_{ij} \bar{u}_{ij} \right)$  et  $g_{mi} \underline{x} = \left( \sum_{j=1}^{ni} g_{ij} \rho_{ij} b_{ij} \right)$  pour  $i=1, \dots, p$

On pose:

$$\underline{f}_m(\underline{x}) = \begin{bmatrix} f_{m1}(\underline{x}) \\ \cdot \\ \cdot \\ f_{mp}(\underline{x}) \end{bmatrix}, \quad \underline{v}_0 = \begin{bmatrix} v_{10} \\ \cdot \\ \cdot \\ v_{p0} \end{bmatrix}, \quad \underline{d}_m = \begin{bmatrix} d_{m1} \\ \cdot \\ \cdot \\ d_{mp} \end{bmatrix}$$

et

$$G_m(\underline{x}) = \begin{bmatrix} g_{m1}(\underline{x}) & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \cdot & & & 0 \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ 0 & & & & \\ 0 & & 0 & \dots & 0 & g_{mp}(\underline{x}) \end{bmatrix}$$

Ainsi, la dynamique du système (4-30) peut être réécrite selon la forme compacte suivante:

$$\underline{y}^{(n)} = \underline{f}_m(\underline{x}) + G_m(\underline{x}) \underline{v}_0 + \underline{d}_m \quad (4-31)$$

**D**ans ce qui suit, nous allons synthétiser un contrôleur adaptatif flou robuste basé sur les modes glissants. Pour cela, nous allons considérer les surfaces de glissements dans l'espace de l'erreur d'état données comme suit [Slo, 1991]:

$$\left\{ \begin{array}{l} s_1(t) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda_1 \right)^{n_1-1} e_1(t), \quad \lambda_1 > 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ s_p(t) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda_p \right)^{n_p-1} e_p(t), \quad \lambda_p > 0 \end{array} \right. \quad (4-32)$$

où les erreurs de poursuite sont définies par:

$$\left\{ \begin{array}{l} e_1(t) = y d_1(t) - y_1(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ e_p(t) = y d_p(t) - y_p(t) \end{array} \right. \quad (4-33)$$

Il est à noter que les bornes de  $s_i(t)$  peuvent être directement traduites par les bornes de l'erreur de poursuite. Si nous avons  $|s_i(t)| \leq \phi$  où  $\phi$  est une constante positive, nous concluons que  $|e_i^j(t)| \leq 2^j \lambda_i^{j-n_i+1} \phi$ ,  $j=0, \dots, n_i-1$ ,  $i=1, \dots, p$  [Slo, 1991]. Ces bornes peuvent être réduites en augmentant les paramètres  $\lambda_i$ .

Les dérivées du système d'équations différentielles (4-32) peuvent être écrites comme suit:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{s}_1(t) = \tau_1 - f_1(x) - \sum_{j=1}^p g_{1j}(x) u_j \\ \cdot \\ \cdot \\ \dot{s}_p(t) = \tau_p - f_p(x) - \sum_{j=1}^p g_{pj}(x) u_j \end{array} \right. \quad (4-34)$$

où  $\tau(1), \dots, \tau(p)$ , sont donnés par:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_1 = y^{(n_1)} d_1 + \beta_{1,n_1-1} e_1^{(n_1-1)} + \dots + \beta_{1,1} \dot{e}_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \tau_p = y^{(n_p)} d_p + \beta_{p,n_p-1} e_p^{(n_p-1)} + \dots + \beta_{p,1} \dot{e}_p \end{array} \right. \quad (4-35)$$

avec

$$\beta_{i,j} = \frac{(n_i - 1)!}{(n_i - j)!(j - 1)!} \lambda_i^{n_i - j}, \quad i = 1, \dots, p, \quad j = 1, \dots, n_i - 1.$$

Utilisant les notations suivantes:

$s = [s_1, \dots, s_p]^T$  et  $\tau = [\tau_1, \dots, \tau_p]^T$ , le système d'équations (4-34) peut être écrit sous la forme matricielle suivante:

$$\dot{s} = \tau - f(x) - G_m(x) \underline{u}_0 \quad (4-36)$$

Si les fonctions non linéaires  $f(x)$  et  $G(x)$  sont connues, pour accomplir les objectifs de la commande, nous pouvons utiliser une loi de commande idéale non linéaire donnée par [Ess et al, 2006].

$$\underline{u}_0^* = G^{-1}(x) \left( -f(x) + \tau + \frac{s}{\alpha^2} \right) \quad (4-37)$$

Quand la commande d'entrée est sélectionnée efficacement et de telle façon que  $v = v_0^*$  l'équation (4-36) sera simplifiée en:

$$\dot{s} = \frac{s}{\alpha^2} \quad (4-38)$$

à partir de laquelle nous pouvons conclure que  $s_i(t) \rightarrow 0$  quand  $t \rightarrow \infty$  et par conséquent, l'erreur  $e_i(t)$  et toutes ses dérivées jusqu'à  $n_i - 1$  convergent vers zéro [Slo, 1991].

La loi de commande idéale donnée par l'équation (4-37) est facilement obtenue si les fonctions non linéaires  $f(x)$  et  $G(x)$  sont connues.

## 2. Synthèse de l'approche proposée

Dans la section précédente, il a été démontré qu'il existe une loi de commande idéale  $\underline{u}_0^*$ , donnée par (4-37), qui peut accomplir les objectifs de la commande. Cependant, ce contrôleur idéal ne peut pas être utilisé, car il dépend de fonctions inconnues. Pour contourner ce problème, nous allons proposer d'utiliser des systèmes adaptatifs flous pour approximer ce contrôleur idéal. L'erreur entre ce contrôleur idéal et le contrôleur flou proposé va servir à actualiser les paramètres de ce dernier. D'après le théorème de l'approximation universelle [Wan, 1994], il existe un système flou optimal noté

$\underline{\omega}(\underline{x})\underline{\theta}^*$  ( $i=1,\dots,p$ ) qui peut approximer uniformément de la loi de commande idéale (4-37) telle que:

$$\underline{u}_0^* = \underline{\omega}(\underline{x})\underline{\theta}_i^* + \varepsilon_i \quad i=1,\dots,p \quad (4-39)$$

où  $\varepsilon_i$  est l'erreur d'approximation floue,  $\underline{\theta}_i^*$  est un vecteur de paramètre idéal inconnu qui minimise la fonction  $|\varepsilon_i|$  sur un ensemble compact de fonctionnement  $\Omega_x$  et  $\underline{\omega}(\underline{x})$  est le vecteur de la fonction de base floue, supposé convenablement spécifié par le concepteur.

Dans cette approche, nous supposons que le système flou utilisé ne viole pas la propriété de l'approximation universelle sur l'ensemble compact  $\Omega_x$  qui peut être supposé assez grand telles que les variables d'état restent à son intérieur sous la commande en boucle fermée.

Ainsi, il serait raisonnable de supposer que l'erreur d'approximation floue soit bornée pour tout  $\underline{x} \in \Omega_x$ .

La loi de commande optimale (4-39) peut être réécrite sous la forme compacte suivante:

$$\underline{u}_0^* = \underline{\omega}(\underline{x})\underline{\theta}^* + \varepsilon \quad (4-40)$$

où  $\underline{\omega}(\underline{x}) = \text{diag}[\omega_1(\underline{x}), \dots, \omega_p(\underline{x})]$ ,  $\underline{\theta}^* = [\theta_1^*, \dots, \theta_p^*]^T$  et  $\varepsilon = [\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_p]^T$ . Puisque le paramètre idéal du vecteur  $\theta^*$  est inconnu, alors il devrait être estimé par un vecteur adaptatif  $\theta$ .

### **Théorème**

Considérons la loi de commande suivante:

$$\underline{u}_0 = \underline{\omega}(\underline{x})\underline{\theta} \quad (4-41)$$

munie de la loi d'adaptation suivante:

$$\dot{\underline{\theta}} = \eta \underline{\omega}(\underline{x}) \left( \dot{s} + \frac{s}{\alpha^2} \right) \quad (4-42)$$

Cette commande permet de garantir la stabilité et la robustesse du système (4-26) en présence de défauts actionneurs (4-28) et des perturbations externes.

### **Démonstration**

Si nous définissons le paramètre de l'erreur d'estimation comme:

$\tilde{\theta} = \underline{\theta}^* - \underline{\theta}$  et utilisons (4-37), la surface de glissement (4-36) peut être réécrite comme suit:

$$\dot{s} = -\frac{s}{\alpha^2} + G_m(x) \underline{e}_\Delta \quad (4-43)$$

où  $\underline{e}_\Delta = \underline{\omega}(x) \tilde{\theta} + \underline{\varepsilon}$ .

Afin d'étudier la stabilité du système bouclé, nous considérons la fonction de Lyapunov exprimée par:

$$V = \frac{1}{2\gamma} \underline{s}^T \underline{s} + \frac{1}{2\gamma} \tilde{\theta}^T \tilde{\theta} \quad (4-44)$$

où  $\gamma$  est une constante positive appelée facteur de glissement.

Utilisons (4-43), nous obtenons la dérivée suivante:

$$\dot{V} = \underline{s}^T \dot{\underline{s}} - \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta}^T \dot{\tilde{\theta}} \quad (4-45)$$

à partir de (4-43) et (4-44), l'équation (4-45) redevient:

$$\dot{V} = -\frac{1}{\alpha^2} \underline{s}^T \underline{s} + \underline{e}_\Delta^T G_m \underline{s} - \tilde{\theta}^T \omega G_m \underline{e}_\Delta \quad (4-46)$$

Introduisant la définition de  $\underline{e}_\Delta$ , nous pouvons, ainsi, réécrire l'équation (4-46) comme suit:

$$\dot{V} = -\frac{1}{\alpha^2} \underline{s}^T \underline{s} + \underline{e}_\Delta^T G_m \underline{s} - \underline{e}_\Delta^T G_m \underline{e}_\Delta - \underline{\varepsilon}^T G_m \underline{e}_\Delta \quad (4-47)$$

à partir des inégalités suivantes:

$$\underline{\varepsilon}^T G_m \underline{e}_\Delta \leq \frac{1}{4} \underline{e}_\Delta^T G_m \underline{e}_\Delta + \underline{\varepsilon}^T G_m \underline{\varepsilon} \quad (4-48)$$

$$\underline{e}^T G_m \underline{s} \leq \frac{1}{4} \underline{e}_\Delta^T G_m \underline{e}_\Delta + \underline{s}^T G_m \underline{s} \quad (4-49)$$

l'équation (4-47) devient:

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{\alpha^2} \underline{s}^T \underline{s} - \frac{3}{2} \underline{e}_\Delta^T G_m \underline{e}_\Delta + \underline{\varepsilon}^T G_m \underline{\varepsilon} + \underline{s}^T G_m \underline{s} \quad (4-50)$$

Etant donné que la matrice de gain est définie positive, alors il existe une constante positive notée  $\chi$  tel que:  $G_m(x) \leq \chi I_p$ , ce qui permet d'écrire:

$$\dot{V} \leq \left( \chi - \frac{1}{\alpha^2} \right) \underline{s}^T \underline{s} - \frac{1}{2} \underline{e}_\Delta^T G_m \underline{e}_\Delta + \underline{\varepsilon}^T G_m \underline{\varepsilon} \quad (4-51)$$

Aussi, le fait que  $\underline{\omega}(x)$  est bornée par une constante positive  $\omega_0$ , nous pouvons trouver deux constantes positives  $\chi_0$  et  $\psi$  vérifions [Lab et al, 2007]:

$$\dot{V} \leq \chi_0 J + \psi \quad (4-52)$$

Ce qui implique que  $\underline{s}$  est bornée avec la trajectoire désirée  $\mathcal{Y}_{\text{ref}}$  et sa dérivée, ce qui implique aussi que le vecteur d'état  $\underline{x}$  est borné. Par ailleurs, de l'équation (4-50), nous pouvons conclure que  $V$  est asymptotiquement bornée.

### 3. Exemple de simulation

Pour montrer les performances de notre approche, considérons le système suivant:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1^2 &= \frac{5 \sin(y_1) - 0.02 y_1^2 \cos(y_1) \sin(y_2)}{3 - 0.2 \cos^2 y_1} + \frac{\cos^2 y_1}{3 - 0.2 \cos^2 y_1} u_1 \\ \dot{y}_2^2 &= \frac{5 \sin(y_2) - 0.02 y_1^2 \cos(y_2) \sin(y_1)}{3 - 0.2 \cos^2 y_2} + \frac{\cos^2 y_2}{3 - 0.2 \cos^2 y_2} u_2 \end{aligned} \quad (4-53)$$

Pour concevoir la loi de commande, nous choisissons les gains de glissements suivants:

$\lambda_1 = \lambda_2 = 5$  Pour le système flou, considérons cinq ensembles flous pour les entrées  $y_1$  et  $y_2$  ce qui donne 25 règles floues. Pour ajuster en ligne le système considéré, prenons le facteur de glissement  $\gamma = 150$ .

Supposons que le système est soumis aux défauts de perte d'efficacité entre  $t = 2s$  et  $t = 5s$  pour  $u_1$  et dès  $t = 3s$  et  $t = 8s$  pour  $u_2$ .

Les résultats de simulation sont donnés par les figures (Figure 4.6 et 4. 7). Nous constatons qu'en dépit de la présence de défauts actionneurs inconnus, le système atteint les trajectoires de référence et les performances de poursuite sont maintenues.

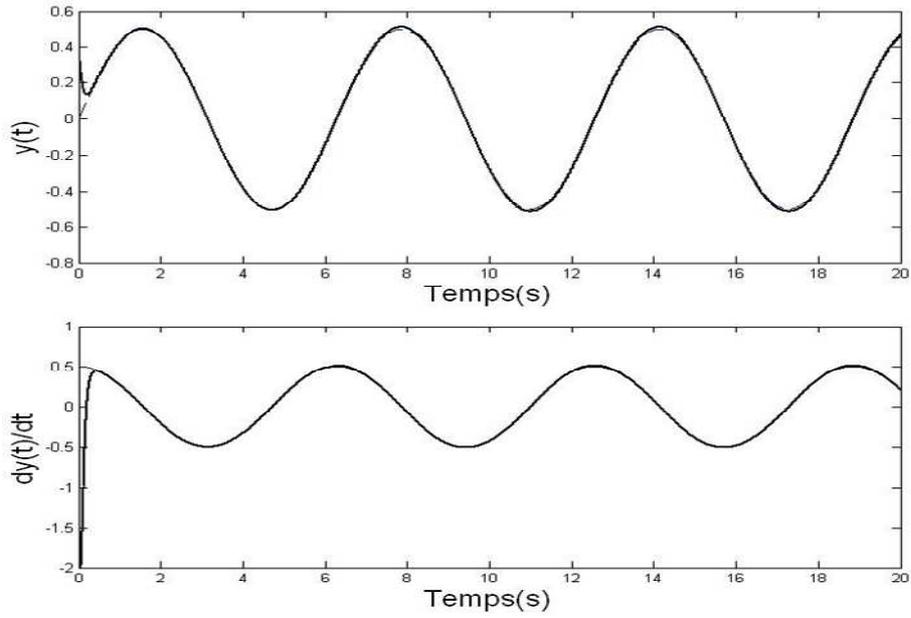


Figure 4. 6: Evolution de la sortie et trajectoire de référence

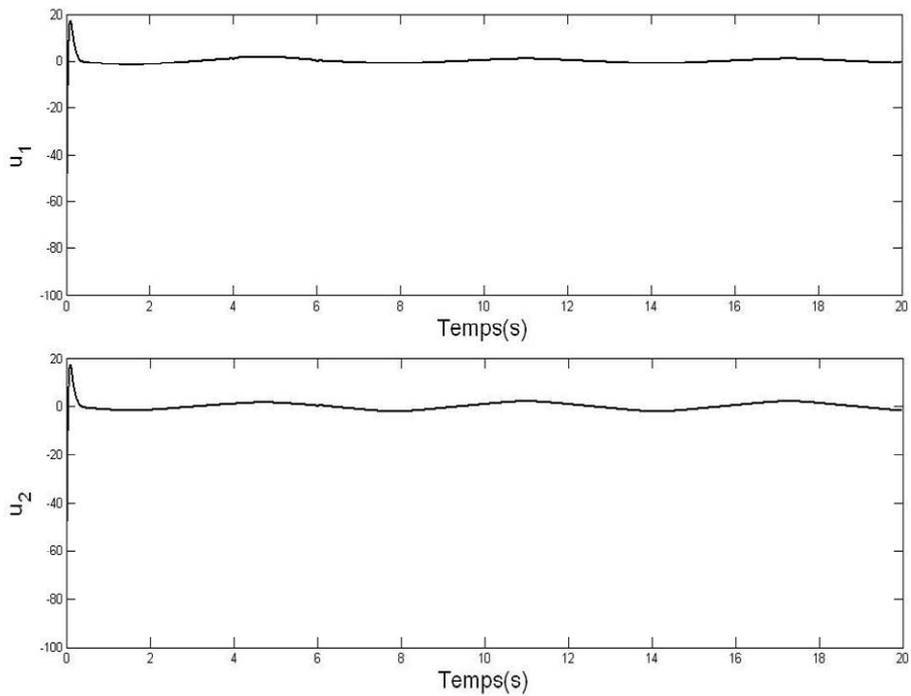


Figure 4. 7: Evolution du signal de la commande

#### 4. Conclusion

Dans cette section, nous avons présenté une commande adaptative floue avec modes glissants d'un système non linéaire MIMO en présence de défauts actionneurs et de perturbations externes. L'approche proposée a permis d'accommoder le défaut actionneur

incertain durant le fonctionnement où les deux défauts considérés modélisés à savoir la perte d'efficacité et le blocage. En outre, nous avons montré que tous les signaux du système bouclé sont semi globalement et uniformément borné et l'erreur de poursuite entre la sortie du système et le signal de référence converge dans un petit voisinage de zéro. Néanmoins, l'utilisation d'un système flou de type 1 ne permet pas de prendre en compte les erreurs dans l'interprétation des informations linguistiques et les erreurs de mesures dans les signaux d'entrée.

# 3<sup>ème</sup> Approche: Commande adaptative floue robuste indirecte

Pour modéliser le système, nous pouvons utiliser l'équation physique. Cependant, dans certains cas, le modèle est obtenu en utilisant quelques conditions de simplification alors que, les paramètres sont généralement inconnus. Pour contourner ce problème, il est nécessaire de trouver une méthode adéquate pour les systèmes complexes, incertains et perturbés.

Parmi les approches proposées dans la littérature pour approximer les fonctions inconnues ( $f(X)$  et  $g(X)$ ), on trouve les systèmes flous, les réseaux de neurones [Her et al, 1994] ou les réseaux d'ondelettes neuronales [Hus, 2010].

Dans ce qui suit, nous proposons de combiner une commande adaptative floue indirecte et les modes glissants pour garantir les performances de poursuite en présence de défauts actionneurs et des perturbations externes. L'approximation des dynamiques inconnues va être assurée par deux systèmes flous de type-2.

## 1. Description du problème

On considère une classe générale d'un système non linéaire dynamique incertain mono entrée mono sortie (SISO) d'ordre  $n$  décrit par les équations suivantes:

$$\begin{aligned} x^{(n)} &= f(X) + g(X)u + d \\ y &= x \end{aligned} \tag{4-54}$$

où  $f(X)$  et  $g(X)$  sont deux fonctions continues, inconnues, incertaines supposées bornées.  $u \in \mathfrak{R}$  et  $y \in \mathfrak{R}$  représentent respectivement l'entrée et la sortie du système,  $d$  représente les perturbations externes inconnues et bornées.  $X = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T \in \mathfrak{R}^n$  représente le vecteur d'états du système a supposé pour être disponible à la mesure.

Le système non linéaire (4-54) est supposé contrôlable. Ainsi, nous pouvons considérer que nous avons toujours  $g(X) \neq 0$ .

Si nous définissons  $y_{ref}$  la trajectoire de référence et par  $e = y_{ref} - y$  l'erreur de poursuite, nous pouvons définir la surface de glissement par:

$$s(X,t) = \left( \frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right)^{n-1} e \quad (4-55)$$

où  $\lambda$  est une constante positive [Slo, 1991]. Elle définit l'inclinaison de la surface de glissement et qui peut s'exprimer par:

$$\frac{1}{2} \frac{ds^2(X,t)}{dt} = s(X,t) \dot{s}(X,t) \leq -\eta |s(X,t)|; \eta > 0 \quad (4-56)$$

Le système est commandé dans le même sens de la direction de la surface de glissement. Par conséquent, l'erreur de poursuite est considérée comme un vecteur de l'erreur d'état selon la surface de glissement  $s(e)=0$ . Utilisant la définition de l'erreur  $e=y_{ref}-y$ , nous pouvons écrire la dérivée de la surface de glissement  $s(X,t)$  comme:

$$\dot{s}(X,t) = y_{ref}^{(n)} - f(X) - g(X)u + \phi_s \quad (4-57)$$

où  $\phi_s$  est défini comme:

$$\phi_s = \sum_{\beta=1}^n \frac{(n-1)!}{\beta!(n-\beta-1)!} \left( \frac{\partial}{\partial t} \right)^{(n-\beta-1)} \lambda^\beta \dot{e} \quad (4-58)$$

Pour satisfaire la condition donnée par l'expression (4-56), nous pouvons choisir la loi de commande comme suit:

$$u = g(X)^{-1} \left[ -f(x) + y_{ref}^{(n)} + \phi_s \right] - g(X)^{-1} K \text{sign}(s) \quad (4-59)$$

dont la commande équivalente  $u_{eq} = g(X)^{-1} \left[ -f(x) + y_{ref}^{(n)} + \phi_s \right]$  forcera le système à rester sur la surface de glissement et peut être obtenue en utilisant  $\dot{s}(X,t)=0$  [Slo, 1991]. La loi de commande de commutation (switching) pour atteindre la surface de glissement est donnée par  $u_{sw} = -g(X)^{-1} K \text{sign}(s)$ . Cette loi de commande permet d'obtenir de bonnes performances de poursuite en dépit de la présence de perturbations externes à condition qu'aucun défaut ne se produise sur l'actionneur. La section suivante sera dédiée à la généralisation de cette approche au cas d'un système présentant des défauts au niveau de l'actionneur.

## 2. Conception de la commande tolérante aux défauts

Considérons le problème de commande du système non linéaire (4-54) avec  $m$  défauts actionneurs. La commande d'entrée peut être écrite comme suit:

$$u(t) = \sum_{i=j}^m u_j(t) \quad (4-60)$$

Chaque commande d'entrée  $u_j(t)$ , soumise à des défauts actionneurs, peut être exprimée par:

$$u_j(t) = \rho_j v_j(t) + \sigma_j (u_j^c - \rho_j v_j(t)) \quad (4-61)$$

$u_j(t)$  présente le  $j^{\text{ème}}$  signal de commande appliqué. L'expression précédente (4-60) de la commande d'entrée permet de décrire la perte d'efficacité et les défauts actionneurs.

En effet,  $\rho_j$  décrit le pourcentage de la partie efficace restante de l'actionneur correspondant

$u_j$ :  $\rho_j = 1$  représente le comportement normal (sans défaut), et  $\rho_j = 0$  signifie la perte totale d'efficacité. Dans le cas où le blocage est considéré, on utilise le terme  $\sigma_j$  pour  $\sigma_j = 1$ , le blocage de l'actionneur à une valeur de  $u_j^c$ . Si nous considérons une structure spécifique proportionnelle de la commande [Li et al, 2008] où chaque commande d'entrée peut être réécrite comme:

$$u_j(t) = b_j v_0(t) \quad (4-62)$$

où  $b_j$  est une constante non nulle et  $v_0(t)$  est le signal de commande à concevoir, alors, l'équation (4-62) peut être reformulée comme suit:

$$u_j(t) = \rho_j (1 - \sigma_j) b_j v_0(t) + \sigma_j u_j^c \quad (4-63)$$

En utilisant la nouvelle équation du signal de commande d'entrée, le système (4-54) peut être décrit par:

$$x^{(n)} = f(X) + g(X) \sum_{i=j}^m \rho_j (1 - \sigma_j) b_j v_0(t) + \sum_{i=j}^m g(X) \sigma_j u_j^c + d \quad (4-64)$$

Notons par:

$$\begin{aligned} h_1(X) &= f(X) + \sum_{i=j}^m g(X) \sigma_j u_j^c \\ h_2(X) &= g(X) \sum_{i=j}^m \rho_j (1 - \sigma_j) b_j \end{aligned} \quad (4-65)$$

Le système (4-54) sera décrit alors par:

$$x^{(n)} = h_1(X) + h_2(X) v_0(t) + d \quad (4-66)$$

qui peut être commandé par la loi basée sur les modes glissants donnée par:

$$v_0(t) = h_2(\underline{x})^{-1} \left[ h_1(\underline{x}) + y_{ref}^{(n)} + \phi_s - K \text{sign}(s) \right] \quad (4-67)$$

En se basant sur les définitions de  $h_1(X)$  et  $h_2(X)$ , la loi de commande (4-67) ne peut être appliquée sous cette forme. En plus, le terme  $K \text{sign}(s)$  provoque le phénomène de broutement (chattering) qui peut détériorer le système et il est difficile de calculer le terme  $K$  puisqu'il dépend directement des bornes supérieures des perturbations externes et des incertitudes généralement inconnues.

### 3. Mise en œuvre de l'approche proposée

Nous proposons, dans ce qui suit, une loi de commande floue type-2 basée sur les modes glissants pour forcer le système à assurer une bonne performance de poursuite en présence de perturbations externes et de défauts actionneurs. Pour ce faire, nous approximations les deux fonctions inconnues  $h_1(X)$  et  $h_2(X)$  par deux systèmes adaptatifs flous de type-2. Pour résoudre le problème de broutement et de connaissances de terme  $K$ , nous substituons le terme  $K \text{sign}(s)$  par un terme lisse  $\frac{s}{\alpha^2}$ .

L'extension du théorème universel d'approximation [Wan, 1994] aux systèmes flous de type-2 permet de garantir, l'existence de deux systèmes flous de type-2 optimum dans la forme à savoir:

$$\widehat{h}_1^*(X) = \Theta_1^{*T} \Psi_1 \text{ et } \widehat{h}_2^*(X) = \Theta_2^{*T} \Psi_2 \quad (4-68)$$

approximant uniformément les fonctions inconnues continues respectivement  $h_1(X)$  et  $h_2(X)$  dans un ensemble compact d'approximation exacte:

$$h_{1,2}(X) = \widehat{h}_{1,2}^*(X) + \varepsilon_{1,2} \quad (4-69)$$

où  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$  sont deux très petites constantes positives représentant les erreurs minimales d'approximation. En utilisant l'équation (4-69), le système à étudier (4-54) sera ainsi décrit par:

$$x^{(n)} = (\widehat{h}_2^*(X) + \varepsilon_2) v_0 + (\widehat{h}_1^*(X) + \varepsilon_1) + \phi_s + d \quad (4-70)$$

Notre choix, de singleton pour la fuzzification, de produit pour le moteur

d'inférence et la méthode d'intervalle pour la defuzzification, est motivé par deux principaux aspects:

**L**e premier aspect repose sur l'exploitation efficace du théorème universel de l'approximation. Le deuxième aspect concerne le temps de calcul réduit exigé par cette structure comparée à d'autres structures des systèmes logiques flous type-2.

**P**our atteindre l'objectif de la commande, nous présentons dans ce qui suit la synthèse de l'approche proposée qui assure la stabilité et la robustesse du système bouclé en présence de perturbations externes et de défauts. Alors, l'expression de la dérivée de la surface de glissement peut être exprimée par:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= e^{(n)} + \phi_s \\ \dot{s} &= y_{ref}^{(n)} - (\widehat{h}_2^*(X) + \varepsilon_2) u_0 + (\widehat{h}_1^*(X) + \varepsilon_1) - \phi_s - d \end{aligned} \quad (4-71)$$

Ainsi, la dérivée de la surface de glissement peut se résumer en:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= y_{ref}^{(n)} - \widehat{h}_2^*(X) u_0 - \widehat{h}_1^*(X) - \phi_s - d_c \\ d_c &= -\varepsilon_2 u_0 - \varepsilon_1 - d \end{aligned} \quad (4-72)$$

### Proposition

*L'utilisation de la loi de commande:*

$$u_0 = \widehat{h}_2^{-1}(X) \left[ y_{ref}^{(n)} - \widehat{h}_1(X) - \phi_s - \frac{s}{\alpha^2} \right] \quad (4-73)$$

*avec les lois d'adaptation suivantes:*

$$\begin{aligned} \dot{\Theta}_1 &= -\gamma_1 s \psi_1 \\ \dot{\Theta}_2 &= -\gamma_2 s \psi_2 u_0 \end{aligned} \quad (4-74)$$

*permet d'assurer que les signaux du système bouclé sont bornés et l'erreur de poursuite converge asymptotiquement vers zéro, en dépit de la présence de perturbations externes, d'incertitudes et de défauts actionneurs.*

### Preuve

*Pour démontrer la stabilité du système bouclé, considérons la fonction de Lyapunov suivante:*

$$V = s^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \tilde{\Theta}_1^T \tilde{\Theta}_1 + \frac{1}{2\gamma_2} \tilde{\Theta}_2^T \tilde{\Theta}_2 \quad (4-75)$$

où  $\tilde{\Theta}_{1,2} = \Theta_{1,2} - \Theta_{1,2}^*$  et  $\gamma_1, \gamma_2$  sont deux constantes d'apprentissage. La dérivée de l'équation (4-75) sera donnée comme:

$$\dot{V} = s\dot{s} + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{\Theta}_1^T \dot{\Theta}_1 + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{\Theta}_2^T \dot{\Theta}_2 \quad (4-76)$$

Utilisons l'équation (4-73), la dérivée de la surface de glissement  $S$  devient:

$$\dot{s} = (\hat{h}_2(X) - h_2^*(X))v_0 + (\hat{h}_1(X) - h_1^*(X)) - d_c - \frac{s}{\alpha^2} \quad (4-77)$$

qui sera réécrite comme:

$$\dot{s} = \tilde{\Theta}_2^T \xi_2 v_0 + \tilde{\Theta}_1^T \xi_1 - d_c - \frac{s}{\alpha^2} \quad (4-78)$$

alors, l'équation (4-76) sera donnée comme suit:

$$\dot{V} = \tilde{\Theta}_2^T \left[ \xi_2 s v_0 + \frac{1}{\gamma_2} \dot{\Theta}_2 \right] + \tilde{\Theta}_1^T \left[ \xi_1 s + \frac{1}{\gamma_1} \dot{\Theta}_1 \right] - s \left[ d_c + \frac{1}{\alpha^2} \right] \quad (4-79)$$

l'utilisation des lois d'adaptation (4-74), nous conduit à:

$$\dot{V} = -s d_c - \frac{s}{\alpha^2} \quad (4-80)$$

l'équation (4-80) peut être réécrite comme:

$$\dot{V} \leq s^2 + \frac{d_c^2}{4} - \frac{s^2}{\alpha^2} = \frac{d_c^2}{4} + \left(1 - \frac{1}{\alpha^2}\right) s^2 \quad (4-81)$$

Intégrons cette inégalité entre 0 et  $T$  et utilisons la définition de la fonction de Lyapunov  $V$ , nous pouvons obtenir:

$$\int_0^T \frac{s^2}{\alpha^2} dt \leq \int_0^T \frac{d_c^2}{4} dt \quad (4-82)$$

Puisque les perturbations externes sont supposées bornées aussi bien que les erreurs minimales d'approximation  $\xi_1$  et  $\xi_2$ , nous pouvons conclure que  $s \in L^2$  ce qui implique que  $s \rightarrow 0$ . Par conséquent, la convergence de  $e$  vers zéro est garantie. Aussi, nous pouvons conclure que la stabilité et la robustesse du système bouclé est garantie [Slo, 1991].

#### 4. Exemple de simulation

Considérons le système de pendule inversé avec la redondance des actionnaires. Le système est décrit par les équations suivantes:[Li et al, 2008]

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a(x_1, x_2) + b(x_1, x_2)(u_1 + u_2) + d \\ d = x_1 \\ a(x_1, x_2) = \frac{g \sin(x_1) - \frac{mlx_2^2 \cos(x_1) \sin(x_1)}{m_c + m}}{l \left( \frac{4}{3} - \frac{m \cos^2(x_1)}{m_c + m} \right)} \\ b(x_1, x_2) = \frac{\frac{\cos(x_1)}{m_c + m}}{l \left( \frac{4}{3} - \frac{m \cos^2(x_1)}{m_c + m} \right)} \end{array} \right. \quad (4-83)$$

où  $x_1 = \theta$  et  $x_2 = \dot{\theta}$  représentent respectivement la position et la vitesse angulaire.

Les paramètres du système étudié sont donnés dans le tableau suivant:

Tableau 4. 2: Paramètres du système

Paramètre	Valeur
Gravité $g$	$9,8\text{ms}^{-2}$
Masse du chariot $m_c$	1Kg
Masse du bras: $m$	0.1Kg
Longueur du bras: $l$	0.5m

L'objectif de la commande est de contrôler l'état  $x_1$  et la poursuite de la trajectoire de référence,  $y_{ref} = \sin(t)$ . Ainsi, la loi de commande est résumée d'après les étapes suivantes:

- 1- dans le but de développer l'algorithme d'apprentissage des systèmes logiques flous type-2, nous utilisons des fonctions d'appartenance pour  $x_1$  et  $x_2$  données par:

$$\begin{aligned}
\mu_{\tilde{H}_{1j}^i} &= \frac{1}{1 + \left( \exp \left( 1.8 \left( \frac{x_i + (0.61 + c_1)}{\frac{\pi}{16}} \right) \right) \right)} \\
\mu_{\tilde{H}_{2j}^i} &= \exp \left( - \left( \frac{x_z}{\frac{\pi}{4.5 + c_2}} \right)^2 \right) \\
\mu_{\tilde{H}_{3j}^i} &= \frac{1}{1 + \left( \exp \left( -1.8 \left( \frac{x_{i+(-0.61-c_1)}}{\frac{\pi}{16}} \right) \right) \right)}
\end{aligned} \tag{4-84}$$

où  $c_1$  et  $c_2$  représentent les degrés d'incertitudes dans ce cas  $c_1 \in [0,0.2]$  et  $c_2 \in [0,1]$ . Après, pour approximer les fonctions inconnues, utilisons 9 règles. Les valeurs initiales des règles floues des paramètres de conséquences sont choisies dans l'intervalle  $\left[ -\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4} \right]$  et les constantes d'apprentissages sont fixées à:  $\gamma_1 = 200$  et  $\gamma_2 = 1$ .

2- puisque le système considéré (4-83) est d'ordre  $n=2$ , la surface de glissement peut être obtenue comme:  $s(t) = \dot{e}(t) - \lambda e(t)$ . Pour concevoir la commande, nous choisissons le gain de la surface de glissement égale à  $\lambda=10$ .

3- Pour évaluer la robustesse du système en boucle fermée, nous procédons en présence de perturbations externes et d'incertitudes comme suit:

a- les perturbations structurelles de la masse du bras et de chariot respectivement:

$$d_m = 0.005 \sin(2t) + 0.005 \sin(3t) \text{ et } d_{m_c} = 0.05 \sin(2t) + 0.05 \sin(3t)$$

b- la perturbation externe  $d = 0.05 \frac{\pi}{6} \sin(2t) + 0.05 \frac{\pi}{6} \sin(3t)$ .

**P**our évaluer la robustesse de l'approche proposée en présence de défauts actionneurs, nous étudions les deux cas suivants:

i- Cas de perte d'efficacité

**D**ans ce cas, nous supposons que l'efficacité des deux actionneurs, évolue dans le temps, montrée par la figure (Figure 4.8). Cependant, il faut avoir toujours, au moins, un actionneur actif, pour assurer la mission du système. Les résultats de simulation sont donnés par les figures (Figure 4.8, Figure 4.9, Figure 4.10 et Figure 4.11). On remarque malgré la

perte d'efficacité des actionneurs et la présence de perturbations, la commande proposée permet de maintenir un bon niveau de poursuite, ce que montre l'apport de cette approche en termes de tolérance aux défauts.

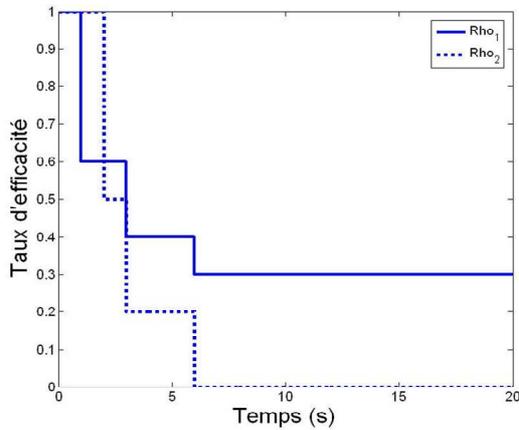


Figure 4. 8: Taux d'efficacité des actionneurs

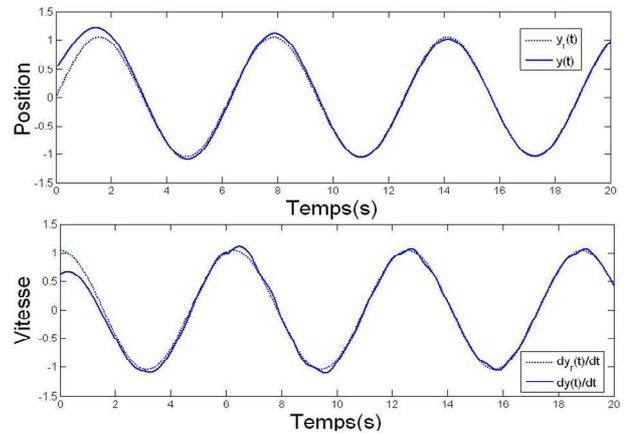


Figure 4. 9: Variable d'états ainsi que les trajectoires de référence

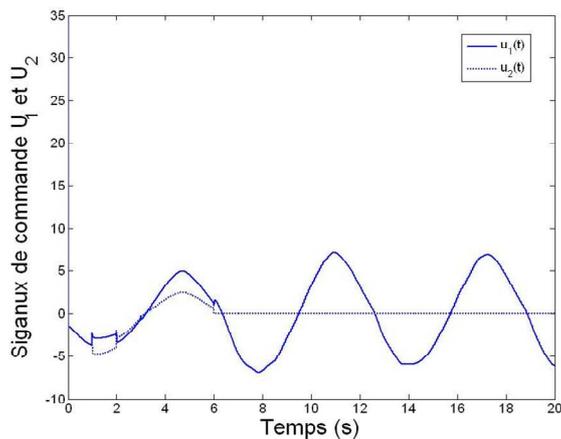


Figure 4. 10: Signaux de commande calculés.

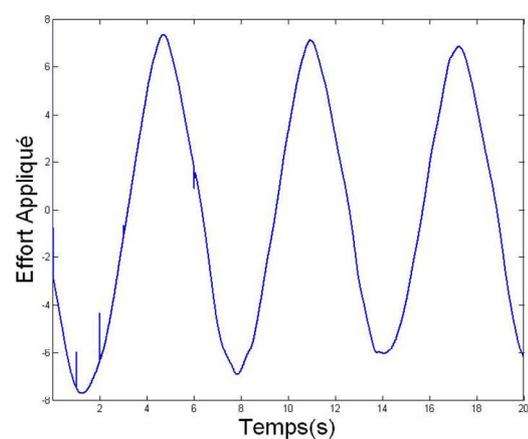


Figure 4. 11: Effort appliqué au pendule.

## ii- Cas de blocage

Pour étudier les performances de notre approche dans des conditions sévères, nous avons considéré le cas de blocage. En effet, l'efficacité des deux actionneurs évolue dans le temps mais à  $t=6s$ , le deuxième actionneur est bloqué à une valeur de  $u_c = 4.5 N$ .

Les résultats de simulations données par les figures (Figure de 4. 12 à 4. 14): la figure (Figure 4.13) montre l'évolution des états du pendule qui convergent vers ses signaux de référence en dépit de la perte totale d'efficacité du second actionneur à  $t = 6s$ .

Les figures (Figure 4. 13 et Figure 4. 14) montrent l'évolution des signaux de commande de chacun des actionneurs ou de la totalité appliquée au système.

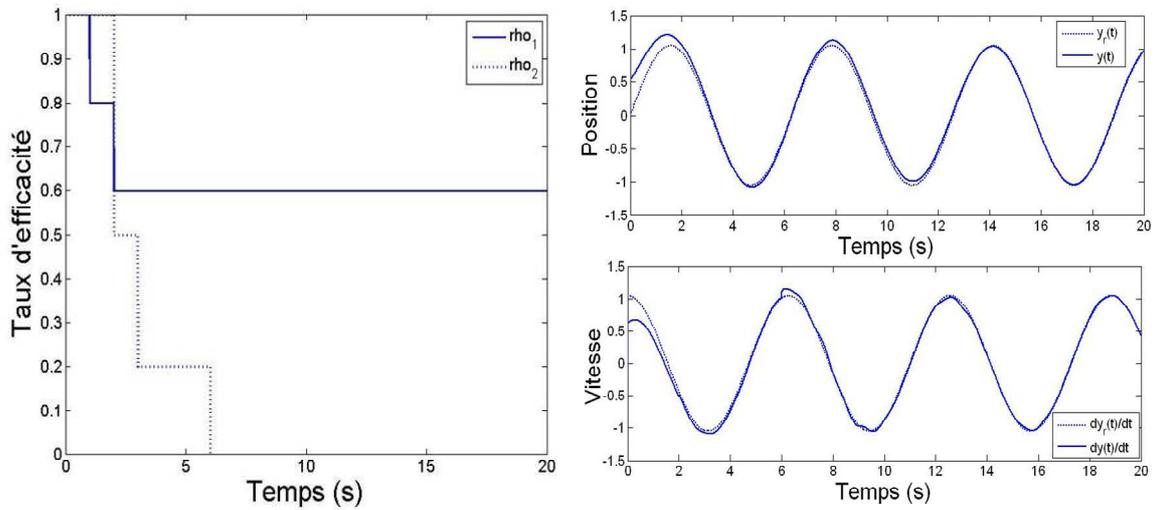


Figure 4.12: Taux d'efficacité des actionneurs Figure 4.13: l'évolution des états du pendule

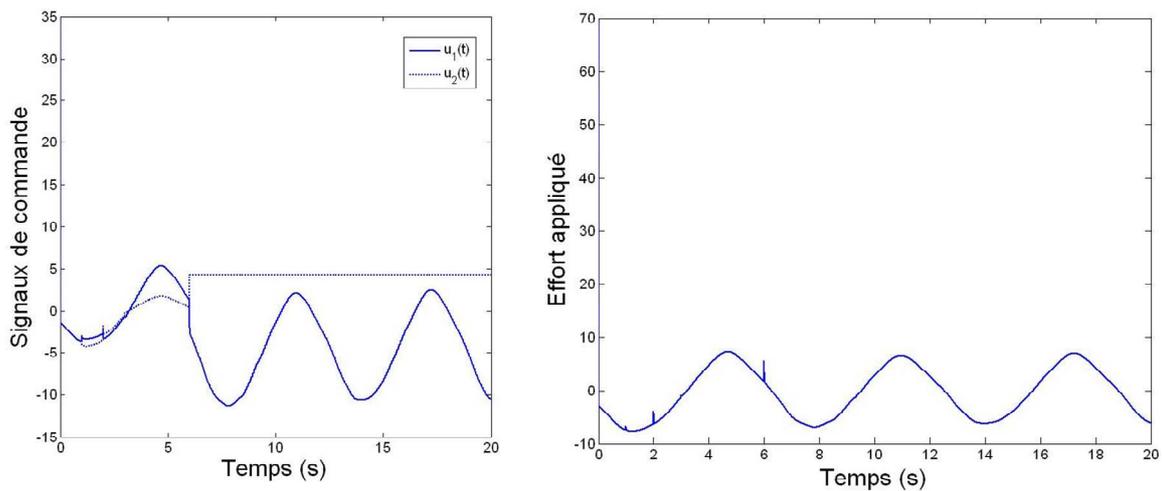


Figure 4.14: Evolution des signaux de commande (actionneurs), Figure 4.15: Effort appliqué

Nous remarquons, que malgré la gravité des perturbations (perte d'efficacité, perturbations externes, variations des paramètres), le système arrive à atteindre de bonnes performances de poursuite.

## 5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une famille de commande adaptative floue robuste tolérante aux défauts d'actionneurs. Ainsi, la logique floue nous a permis de s'affranchir de la connaissance exacte des dynamiques du système et les modes glissants nous ont permis de garantir la robustesse vis-à-vis des perturbations (externes ou paramétriques) et des défauts pouvant apparaître au niveau des actionneurs. Lors de la mise en œuvre de ces approches, en plus des performances et la robustesse, nous avons visé la réduction du temps de calcul à travers des algorithmes simples et une utilisation minimale de contraintes afin de faciliter l'implémentation, en temps réel, de ces approches sur un banc d'essais en cours d'élaboration.

## **Conclusion générale**

### **1. Bilan de point de vue méthodologie**

**L**e diagnostic est un acte intelligent, difficilement programmable par des techniques classiques, d'où le recours à de nouvelles technologies qui permettent d'analyser les connaissances, le fonctionnement et le dysfonctionnement du système industriel pour pouvoir prendre la décision adéquate face à un tel comportement.

**A**insi, dans un système dynamique, tout changement temporaire dans les conditions de travail, peut provoquer; d'une part, un arrêt ce qui rend le système indisponible. D'autre part, provoque des changements dans la structure ou dans ses paramètres ce qui est non souhaité et doit être corrigé.

**P**ar conséquent, pour maintenir le système en état d'équilibre quand un défaut surgisse nécessite une mise en œuvre d'une commande tolérante aux défauts. Cette dernière a pour but de trouver des solutions, si elles existent, afin d'atteindre les objectifs souhaités en présence de défauts, en prenant en considération toute information issue du module diagnostic.

**M**éthodologiquement, la politique de commande tolérante aux défauts a pour but de conserver la maîtrise du comportement dynamique du système commandé en présence de défaut. La caractérisation de ce dernier est une étape nécessaire dans la mise en œuvre des méthodes de commande tolérante aux défauts. Sachant que les performances assurées sont, généralement, au prix de la complexité du système et des approches développées.

**N**éanmoins, la plupart des approches exige la disponibilité d'un modèle mathématique du système et la performance assurée sera alors, liée directement à l'exactitude de ce dernier et sa fiabilité.

**C**ependant, la majorité de ces approches sont limitées à des formes particulières de système, leurs analyse et commande ne sont pas, évidemment, des tâches faciles. Plus particulièrement, elle repose sur le caractère linéaire du système étudié.

Par contre, cette hypothèse n'est validée qu'autour d'un point d'équilibre de fonctionnement du système et dès qu'on s'éloigne de ce point, les performances du modèle se dégradent d'où la nécessité d'avoir un modèle plus adapté et éventuellement non linéaire.

**A**insi, la logique floue a été utilisée comme alternative pour élaborer un modèle non linéaire et ainsi mettre en œuvre de lois de commande tolérantes aux défauts efficaces.

## **2. De point de vue contributions**

**D**ans ce travail de recherche nous avons proposé des approches originales basées sur la commande adaptative floue combinée aux modes glissants. Cette combinaison nous permet d'assurer de bonnes performances en poursuite même en présence de variations paramétriques, de perturbations externes et de défauts actionneurs. Ainsi, les deux premières approches adoptent le schéma direct où la commande par rétroaction est remplacée par un contrôleur adaptatif flou. Ces deux approches fournissent certes de bonnes performances mais celles-ci restent liées directement à la qualité de l'information linguistique utilisée pour la mise en œuvre du système flou. Pour remédier à ce problème, nous avons proposé une troisième approche basée sur une commande adaptative floue indirecte utilisant les systèmes flous de type-2. La robustesse vis-à-vis des perturbations et des défauts actionneurs est assurée à l'aide des modes glissants. De plus, dans les trois approches, nous avons mis en œuvre la loi de commande de telle sorte que le phénomène de chattering, considéré comme le principal inconvénient des modes glissants, soit éliminé ce qui nous permet de mieux préserver nos actionneurs. Pour valider ces approches, nous avons présenté plusieurs résultats de simulation où nous avons considérés plusieurs cas avec des défaillances sévères comme la perte totale d'efficacité (blocage).

### **Perspectives**

**C**omme suite logique à ce travail, nous projetons améliorer ces approches en considérant également les défauts capteurs. En effet, dans nos approches nous avons supposé que nos états sont mesurables et la valeur fournie par les capteurs est fiable. Comme solution serait l'utilisation des observateurs flous de type-2 ce qui nous permettra, certainement, de faire la différence entre le bruit de mesure et la présence d'un défaut capteur. De plus, une implémentation en temps réel sur un banc d'essais permettra de valider nos approches et de vérifier les résultats obtenus par simulation.

## Références bibliographiques

### A

- [Ait et al, 2002] A. Aitouche et G. Hoblos ‘Fault tolerance analysis of sensor system application to a combat aircraft system’, *IEEE international conference on system, Man and cybernetic*, 2002.
- [Ait et al, 2004] A. Aitouche G. Hoblos et H. Chafouk, ‘Détection de défauts basée sur les indices de pseudo-observabilité’, *Instrumentation aspects fondamentaux, Lavoisier*, 2002.
- [Akh et al, 2003] A. Akhenak, M. Chadli, J. Ragot et D. Maquin, ‘Sliding mode multiple observer for fault detection and isolation’, *42th IEEE Conference on Decision and Control, Hawaii, USA*, Vol 1, 2003.
- [Alw et al, 2006] H. Alwi et C. Edwards, ‘Fault tolerant control of a large civil aircraft using sliding mode bases scheme’, *In IFAC Safe Process, Beijing, China*, 2006.
- [Alw et al, 2006] H. Alwi et C. Edwards, ‘Robust sensor fault estimation for tolerant control of a civil aircraft using sliding modes’, *In Proceedings of the American Control Conference, Minneapolis, USA*, 2006.
- [Alw, 2008] H. Alwi, ‘Fault tolerant sliding mode control schemes with aerospace applications’, *Doctorat de l’Université de Liecester*, 2008.
- [Alw et al, 2011] H. Alwi et C.-P. Tan, ‘Fault detection and fault-tolerant control using sliding modes’, *Advances in Industrial Control, London: Springer-Verlag*, 2011.
- [Ast et al, 1989] K. J. Aström et B. Wittenmark, ‘Adaptive control’, *Addisson- wesley*, 1989

### B

- [Bab, et al, 1997] Babuska et Verbruggen, ‘Constructing fuzzy models by product space clustering’, *In Hans Hellendoorn, Dimiter Driankov, Selected Approaches to Fuzzy Model Identification , Berlin, Springer Verlag*, 1997.
- [Bla et al, 2003] M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze et M. Staroswiecki, ‘Diagnosis and fault tolerant control’, *Springer-Verlag*, 2003.
- [Bla et al, 2006] M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze et M. Staroswiecki, ‘Diagnosis and fault tolerant control’, (*2<sup>nd</sup> edition*), *Springer: Germany*, 2006.
- [Bas et al, 1993] M. Basseville et I.V. Nikiforov, ‘Detection of Abrupt Changes, Theory and Application’, *Prentice-Hall*, 1993.

- [Bas, 1999]** M. Basseville, 'On fault detectability and isolability', *Rapport de recherche IRISA N°1240*, 1999.
- [Bas et al, 1996]** M. Basseville et M.O. Cordier, 'Surveillance et diagnostic de systèmes dynamiques: Approches complémentaires du traitement de signal et de l'intelligence artificielle', *N°1004, Irista*, 1996.
- [Bat et al, 2008]** F. Bateman, H. Noura, et M. Ouladsine, 'Active fault detection and isolation strategy for an unmanned aerial vehicle with redundant flight control surfaces', *In Proceedings of the 16<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Control and Automation, Ajaccio, France*, 2008.
- [Batt et al, 2011]** M. Batteux, P. Dague, N. Rapin et P. Fiani, 'Diagnosability study of technological systems: Modern Approaches in Applied Intelligence', *24th International Conference on Industrial Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems, Syracuse, NY, USA*, 2011.
- [Ben et al, 2010a]**, M. Benbrahim, N. Essounbouli, A. Hamzaoui et A. Betta, 'Commande adaptative floue robuste tolérante aux défauts pour une classe de systèmes non linéaires incertains et perturbés', *In 1<sup>st</sup> International Conference on Industrial Engineering & Manufacturing, Batna Algeria, ICIEM'10, May 09-10*, 2010.
- [Ben et al, 2010b]** M. Benbrahim, N. Essounbouli, A. Hamzaoui et A. Betta, 'Adaptive fuzzy sliding mode control for MIMO Nonlinear systems subject to actuator faults and external disturbances', *In 18th Mediterranean Conference on Control and Automation Congress, Palace Hotel Marrakech, Morocco IEEE, MED'10, June 23-25*, 2010.
- [Ben et al, 2010c]** M. Benbrahim, N. Essounbouli, A. Hamzaoui et A. Betta, 'Adaptive fuzzy sliding mode control for uncertain nonlinear systems against actuator faults', *In 7<sup>th</sup> International Conference on Informatics in control, Automation and Robotics, INSTICC Funchal, Madeira- Portugal, ICCINCO'10, June 15-18*, 2010.
- [Ben et al, 2013]** M. Benbrahim, N. Essounbouli, A. Hamzaoui et Betta Ammar, 'Adaptive type-2 fuzzy sliding mode controller for SISO nonlinear systems subject to actuator faults', *International Journal of Automation and Computing, Springer Berlin Heidelberg, Vol 10(4)*, 2013.
- [Ber et al, 2003]** Bernadette bouchon-meunier et C. Marsala, 'Logique floue, principes, aides à la décision', *Traité IC2, Information- Commande Communication*, Hermès, 2003
- [Bor et al, 1998]** D. Borne, J. Rozinoer, J.Y. Dieulot et L. Dubois, 'Introduction à la commande floue', *Collection Sciences et Technologies, Paris*, 1998.

**[Bos et al, 1998]** J.D. Boskovic, S. Yu et R.K. Mehra, 'A stable scheme for automatic control reconfiguration in the présence of actuator failures', *Proceedings of the American Control Conference*, 1998

**[Bos et al, 1999]** J. D. Boskovic et R. K. Mehra, 'Stable multiple model adaptive flight control for accommodation of a large class of control effector failures', *In Proceedings of the American Control Conference*, Vol.3, 1999.

**[Bos et al., 1999]** J.D. Boskovic, S. Li et R.K. Mehra, 'Intelligent control of space-craft in the presence of actuator failures', *Conference on Decision and Control*, 1999.

**[Bou et al, 2000]** N. Boudaoud et M.A. Masson, 'Diagnosis of transient states: A pattern recognition approach', *APII- JESA*, Vol 34(5), 2000.

**[Bou et al, 1998]** R. Boukezzoula, S. Galichet et L. Foulloy, 'Fuzzy Learning Control of Nonlinear Systems Using Input-Output Linearization, *IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'98)*, San Diego, CA, USA, 1998.

**[Bou, 2000]** R. Boukezzoula, 'Commande floue d'une classe de systèmes non linéaires: Application au problème de suivi de trajectoire', *Doctorat de l'Université de Savoie*, 2000.

**[Buh, 1994]** H. Bühler, 'Réglage par logique floue', *Presse Polytechnique et Universitaires Romandes*, 1994.

## C

**[Cas et al 1996]** J. P. Cassar et M. Staroswiecki, 'Pour une approche unifiée de la surveillance', *Ecole d'été de Grenoble: Surveillance des systèmes continus, Tome1*, 1996.

**[Cas et al, 1997]** J. P. Cassar et M. Staroswiecki, 'A structural approach for the design of failure detection and identification systems', *In Proceeding IFAC, IFIP, IMACS Conference on Control of Industrial Systems*, 1997.

**[Cas et al, 2008]** O. Castillo et P. Melin, 'Type-2 fuzzy logic: Theory and applications', *Springer Verlag*, 2008.

**[Cha et al 2006]** K. Chafaa, L. Saidi, M. Ghanai et K. Benmahammed, 'Direct, adaptive type-2 fuzzy control for nonlinear systems', *International Journal of computational Intelligence and applications*, Vol 6(3), 2006.

**[Cha et al, 2007]** K. Chafaa, L. Saidi, M. Ghanai, et K. Benmahammed, 'Indirect adaptive interval type-2 fuzzy control for nonlinear systems', *International Journal of Modeling, Identification and Control*, Vol 2(2), 2007.

- [**Cha et al, 2000**] F. Chaoui, F. Giri, J. Dion, M'Saad, et L. Dugard, 'Direct adaptive control subject to input amplitude constraint', *IEEE Transaction on Automatic Control*, 2000.
- [**Cha et al, 2001**] F. Z. Chaoui, F. Giri et M'Saad, 'Adaptive control of input constrained type-1 plants stabilization and tracking', *Automatica*, 2001.
- [**Cha, 1993**] J. N. Chatain, 'Diagnostic par system expert', *Hermès, Paris*, 1993.
- [**Che et al, 1996**] B.S. Chen, Lee CH et Chang YL, 'Tracking design of uncertain nonlinear SISO systems: Adaptive fuzzy approach', *IEEE transaction on fuzzy systems*, Vol 4, 1996.
- [**Che et al, 1999**] J. Chen et R.J Patton, 'Robust model-based fault diagnosis for dynamics systems', *Kluwer Academic Publishers*, 1999.
- [**Che et al, 2001**] J. Chen et R.J. Patton, 'Fault tolerant control systems design using the linear matrix inequality approach', *Europeen Control Conference*, Vol 10, 2001.
- [**Chu, 1992**], C. K. Chui, 'An introduction to wavelets', *Academic Press Professional, Inc., San Diego, CA*, 1992.
- [**Chu et al, 1996**] V. K. Chu et M. Tomizuka, 'Sliding Mode Control with Nonlinear Sliding Surfaces', *Proceedings of the 1996 IFAC World Congress, San Francisco (USA)*, Vol. F 1996.
- [**Cho, 1980**] E.Y. Chow, 'Failure detection system design methodology', *Doctorat, Lab Information and decision system, MIT*, 1980.
- [**Cho et al, 1984**] E.Y. Chow et A. S. Willsky, 'Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems', *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol 29, 1984.
- [**Coc, 1993**] V. Cocquempot, 'Surveillance des processus industriels complexes: Génération et optimisation des relations de redondance analytique', *Doctorat de l'Université de Lille*, 1993.
- [**Coc, 2004**] V. Cocquempot, 'Contribution à la surveillance des processus industriels complexes', *Habilitation à diriger des recherches*, 2004.
- [**Com, 2000**]. C. Combastel, 'Méthodes d'aides à la décision pour la détection et la localisation de défauts dans les entraînements électriques', *Doctorat de l'INPG de Grenoble*, 2000.
- [**Com, 2005**] C. Combastel, 'Multiple fault diagnostic decision in dynamical systems', *In 17<sup>th</sup> World Congress of the International Association for Mathematics and Computers in Simulation, IMACS'05, Paris, France*, 2005.
- [**Cor et al, 2005**] M.L. Corradini, G. Orlando et G. Parlangeli, 'A fault tolerant sliding mode controller for accommodating actuator failures', *In 44<sup>th</sup> IEEE Conference on decision and control*, 2005.

## D

**[Dag et al, 2000]** P. Dague et B. Dubuisson, 'Diagnostic par intelligence artificielle et reconnaissance des formes', *Hermès, Paris*, 2000.

**[Den, 1997]** T. Denoeux, 'Analysis of evidence theoretic decision rules for pattern classification', *Pattern recognition*, Vol 30(7), 1997.

**[Dub, 1989]** B. Dubuisson, 'Détection et diagnostic de pannes des processus' *R 7597*, 4, 1989.

**[Dub, 1990]** B. Dubuisson, 'Diagnostic et reconnaissance de formes', *Hermès, Paris*, 1990.

**[Dub, 2001]** B. Dubuisson, 'Automatique et statistiques pour le diagnostic', *Traité IC2, Informatique Commande Communication, Hermès, Sciences*, 2001.

**[Dum et al, 2006]** P. E. Dumond, A. Aitouche et M. Bayart, 'Fault tolerant control on electric vehicle', *IEEE, international conference on industrial Technology*, 2006.

## E

**[Ess, 2004]** N. Essounbouli, Commande adaptative floue robuste des systèmes non linéaires incertains, *Doctorat de l'Université de Reims Champagne Ardenne*, 2004.

**[Ess et al, 2006]** N. Essounbouli, A. Hamzaoui and J. Zaytoon, 'An improved robust adaptive fuzzy controller for MIMO systems', *Control and Intelligent Systems*, Vol. 34(1), 2006.

**[Ess et al, 2006]** N. Essounbouli, A. Hamzaoui, 'Direct and indirect robust adaptive fuzzy controllers for a class of nonlinear systems', *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 4(2), 2006.

**[Ess et al, 2006]** N. Essounbouli, A. Hamzaoui, and J. Zaytoon, 'Fuzzy sliding mode control for a class of nonlinear continuous systems', *International Journal of Computer Applications in Technology, Inderscience*, Vol 25(2), 2006.

## F

**[Fek et al, 2006]** A. Fekih, H. Xu et F. N. Chowdhury. 'Two neural net-learning methods for model based fault detection', *In Proceedings of the 6th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes, Beijing*, 2006.

**[Fra, 2008]** D. Fragkoulis, 'Détection et localisation des défauts provenant des actionneurs et des capteurs application sur un système non linéaire'. *Doctorat de l'Université de Toulouse*, 2008.

**[Fra, 1990]** P. M. Frank, 'Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy- A survey and some new results', *Automatica*, Vol 26(3), 1990.

## G

- [Gao et al, 1992] Z. Gao et P. J. Antsaklis, 'Reconfigurable control system design via perfect model following', *International Journal of control*, Vol 56(4), 1992.
- [Gen, 1995] S. Gentil, 'Systèmes d'aides à la supervision', In N. Rakoto-Rovalontsalana and J Aguilar-Martin, Editors, *Supervision de processus à l'aide du système expert*, Hermès, Paris, 1995.
- [Gen, 1996] S. Gentil, 'Intelligence artificielle pour la surveillance des procédés continus', In *Actes de L'école D'été D'automatique de Grenoble, Tome 1, Grenoble, France*, 1996.
- [Gen et al, 2004] S. Gentil, J. Montmain et C. Combastel, 'Combining FDI and AI approaches within causal model based diagnosis', *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics part B*, Vol 34(5), 2004.
- [Gen, 2007] S. Gentil, 'Supervision des procédés complexes', *IC2, Hermès 2007*
- [Ger, 1995] J. Gertler, 'Diagnosing parametric faults: From parameter estimation to parity relations', In *Proceedings of ACC*, 1995.
- [Ger, 1997] J. Gertler, 'Fault detection and isolation using parity relations', *Control engineering practice*, Vol 5(5), 1997.
- [Ger, 1998] J. Gertler, 'Fault detection and diagnosis', In *Engineering Systems*, Marcel Dekker Inc., 1998.
- [Gue et al, 2006] F. Guenab, D. Theilliol, Y. Zhang et D. Sauter, 'Fault tolerant control system design: A Reconfiguration strategy based on reliability analysis under dynamic behavior constraints', *6<sup>th</sup> IFAC Symposium Safeprocess, Beijing, China*, 2006.
- [Gue et al, 2009] F. Guenab, W. Schön et J-L. Boulanger, 'Système tolérant aux défauts: Synthèse d'une méthode de reconfiguration et/ou restructuration intégrant la fiabilité de certains composants', *JESA*, Vol 43(10), 2009.
- [Gue et al, 2001] T.M. Guerra et L. Vermeiren, 'Control laws for Takagi-Sugeno fuzzy models', *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 120, no.1, 2001.
- [Gue et al, 2005] K. Guesmi, N. Essounbouli, N. Manamanni, A. Hamzaoui et J. Zaytoon., 'A fuzzy logic controller synthesis for a boost converter', *IFAC 05 World Congress, Prague*, 2005.

## H

- [Hag, 2007] H. Hagra, 'Type-2 FLCs: A new generation of fuzzy controllers', *IEEE Computational Intelligence Magazine*, Vol 2(1), 2007.

**[Ham et al, 2000]** A. Hamzaoui, A. Elkari et J. Zaytoon, ‘A supervisory robust adaptive fuzzy controller’, *In Proceeding of IFAC Workshop on Control Optimization , Saint petersburg, Russie, 2000.*

**[Har, 2003]** M.F.Harkat, ‘Detection et localisation des défauts par analyse en composantes principales’, *Doctorat de l’INPL, Nancy, 2003.*

**[Her et al, 1994]** J. Héroult et C. Jutten, ‘Reseaux de neurones et traitement du signal’, *Hermès, Paris, 1994.*

**[Hus, 2010]** A. Hussain , N. Essounbouli et A. Hamzaoui, ‘A robust adaptive fuzzy wavelet network based controller for a class of nonlinear systems’, *American Control Conference, Washington, USA, 2010.*

**[Hus et al, 2011]** A. Hussain, N. Essounbouli, A. Hamzaoui, F. Nollet, et J. Zaytoon, ‘Type-2 fuzzy sliding mode control without reaching phase for nonlinear system’, *Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol 24(1), 2011.*

**[Hus, 2008]** A. Hussain, ‘Contribution à la commande adaptative robuste par modes glissants’, *Doctorat de l’Université de Reims Champagne-Ardenne, France, 2008.*

## I

**[Ibr, 2004]** A. M. Ibrahim, ‘Fuzzy Logic for embedded systems applications’, *Elsevier Science, 2004.*

**[Ich et al, 2009]** D. Ichalal, B. Marx, J. Ragot, et D. Maquin, ‘Fault diagnosis for Takagi-Sugeno nonlinear systems’. *In Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Barcelona, Spain, 2009.*

**[Ich, 2009]** D. Ichalal, ‘Estimation et diagnostic de systèmes non linéaires décrits par un modèle de Takagi –sugeno’, *Doctorat de l’Université de , 2009.*

**[Ise, 1984]** R. Isermann, ‘Process fault detection based on modeling and estimation’, *Automatica, Vol 20(4), 1984.*

**[Ise, 1993]** R. Isermann, ‘Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing: Tutorial Paper’, *Automatica, Vol 29(4), 1993.*

**[Ise, 1997b]** R. Isermann, ‘Supervision, fault- detection and fault-diagnosis methods: An introduction’, *Control Engineering Practice, Vol 5(5), 1997.*

**[Ise et al, 1997a]** R. Isermann et P. Ballé, ‘Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes’, *Control Engineering Practice, Vol 5(5), 1997.*

[Ise, 1998] R. Isermann, 'On fuzzy logic applications for automatic control, supervision and faults diagnosis', *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics- Part A, System and humans*, Vol 28(2), 1998.

[Ise, 2006] R. Iserman, 'Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance', *Springer-Verlag, Berlin Heidelberg*, 2006.

[Isi, 1989] A. Isidori, 'Nonlinear control systems', 2<sup>ème</sup> edition, *Springer Verlag, Berlin*, 1989.

[Isi, 1995] A. Isidori, 'Nonlinear control systems', 3<sup>ème</sup> edition, *Springer Verlag, London*, 1995.

## J

[Jan, 2007] J. Jantez, 'Foundations of Fuzzy control', *John Wiley and Sons Ltd*, 2007.

[Jam, 2003] Jamouli, 'Génération de résidus directionnels pour le diagnostic des systèmes linéaires stochastiques et la commande tolérante aux défauts'. *Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy*, 2003.

[Jia et al, 2004] B. Jiang, M. Staroswiecki, et V. Cocquemot. 'Fault estimation in nonlinear uncertain systems using robust/sliding-mode observers', *IEE Proceedings, Control Theory and Applications*, Vol 151(1), 2004.

[Jia et al, 2005] B. Jiang, F.N. Chowdhury, 'Fault esatimation and accomodation for linear Mimo discrete tme systems', *IEEE Transactions control systems technology*, Vol 13(3), 2005.

[Joh et al, 2007] R. I. John et S Coupland, 'Type-2 fuzzy a historical view', *IEEE Computational, Intelligence Magazine*, Vol 2(1), 2007.

## K

[Kar et al, 1998] N. N. Karnik et J. M. Mendel, 'An introduction to type-2 fuzzy logic systems', *Technical report, Univ. Southen California*, 1998.

[Kar et al, 1998] N. N. Karnik et J.M. Mendel, 'Type-2 fuzzy logic systems: Type-reduction', *In IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol 2, 1998.

[Kar et al, 1999] N.N. Karnik, J. Mendel et Q. Liang, 'Type-2 fuzzy logic systems', *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 7(6), 1999.

[Kha, 1996]. H. K. Khalil, 'Nonlinear systems', *Prentice Hall*, 1996.

[Khe, 2011] A. Khelassi, 'Nouvelle méthodologie de synthèse des lois de commande tolérante aux fautes garantissant la fiabilité des systèmes', *Doctorat de l'Université de Nancy*, 2011.

[Kim et al, 1997] E. Kim, P. Park, S. Ji et M. Park M 'A New Approach to Fuzzy Modeling', *IEEE Trans.on Fuzzy Systems*, Vol 5(3), 1997.

**[Kin, 2003]** M. Kinnaert, 'Fault diagnosis based on analytical models for linear and nonlinear systems - a tutorial'. *Proceedings of IFAC Safeprocess'03, Washington DC, USA, 2003.*

## **L**

**[Lab et al, 2007]** S. Labiod, et T. M. Guerra, 'Direct adaptive fuzzy control for a class of MIMO nonlinear systems', *International Journal of Systems Science*, Vol 38, 2007.

**[Lag et al, 2007a]** I. Lagrat, H. Ouakka, et I. Boumhidi, 'Adaptive control of a class of non linear systems based on Takagi-Sugeno Fuzzy Models', *Proceeding ICTIS Fez Morocco, 2007.*

**[Lag et al, 2008]** I. Lagrat, H. Ouakka, et I. Boumhidi, 'Fuzzy adaptive control of a class of MISO nonlinear systems', *Control and cybernetics*, Vol 37(1), 2008.

**[Lan et al, 1997]** I. Landau et A. Karimi, 'An output error recursive algorithm for unbiased identification in closed loop'. *Automatica*, Vol 33(5) 1997.

**[Lan et al, 1997]** I. Landau, R. Lozano et M M'saad, 'Adaptive control', 1997.

**[Lef, 2009]** A. Lefebvre, 'Contribution à l'amélioration de la testabilité et du diagnostic de systèmes complexes: Application aux systèmes avioniques, *Doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 2009.*

**[Li et al, 2008]** P. Li et G. H. Yang, 'Fault Tolerant Control for Unknown Nonlinear Systems with Actuator Failures: An Adaptive Fuzzy Approach', *American Control Conference, Washington, USA, 2008.*

**[Li et al, 2008]** P. Li et G. H. Yang, 'Adaptive Fuzzy Control of Unknown Nonlinear Systems with Actuator Failures for Robust Output Tracking', *Proceedings of the American Control Conference, Washington, USA, 2008.*

**[Li et al, 2009]** P. Li et G. H. Yang, 'Backstepping adaptive fuzzy control of uncertain nonlinear systems against actuator faults', *Journal of Control Theory and Applications*, Vol 7(3), 2009.

**[Li et al, 2010]** P. Li et F. Jin, 'Fault-Tolerant Control of Uncertain MIMO Nonlinear Systems: An Adaptive Fuzzy Approach', *Control and Decision Conference, 2010.*

**[Li et al, 2011]** P. Li et G. H. Yang, 'An adaptive fuzzy design for fault tolerant control of MIMO nonlinear uncertain systems', *Journal of Control Theory and Applications*, Vol 9(2), 2011.

**[Lia et al, 2000]** Q. Liang et J. M. Mendel, 'Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems: Theory and Design', *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol 8, 2000.

[Lia et al, 2002] F. Liao, J. Wang et G. Yang, 'Robust flight tracking control: An LMI approach', *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002.

## M

[Mah et al, 2003] M. Mahmoud, J. Jiang et Y. Zhang, 'Active fault tolerant control systems stochastic analysis and synthesis', *Springer*, 2003.

[Maq et al, 1994] D. Maquin, M. Luong et J. Ragot, 'Sûreté de fonctionnement et redondance analytique', *Qualité et Sûreté de Fonctionnement, 1<sup>er</sup> Congrès Pluridisciplinaire*, 17-18 novembre, Compiègne, France, 1994.

[Maq et al, 2000] D. Maquin et J. Ragot, 'Diagnostic des systèmes linéaires', *Collection Pédagogiques d'Automatique*, 2000.

[Maq et al, 2007] D. Maquin et J. Ragot, 'Validation de données à base de modèles', Chap5 dans Supervision des procédés complexes, *Traité Information, Commande, Communication, IC2, Hermès Science Publications, Paris*, 2007.

[Meh et al, 2002] H. Mehrdad et G. Saeed, 'Hybrid adaptive fuzzy identification and control of non linear systems', *IEEE Transactions on fuzzy systems*, Vol 10(2), 2002.

[Men, 2000] J.M. Mendel, 'Uncertainty, fuzzy logic and signal processing', *Signal processing*, Vol 80(6), 2000.

[Men, 2001] J.M. Mendel, 'Uncertain rule-based fuzzy logic systems: Introduction and new directions'. *Prentice-Hall, NJ*, 2001.

[Men et al, 2002] J.M. Mendel et R. John, 'Type-2 fuzzy sets made simple', *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol 10, 2002.

[Men, 2003] J.M. Mendel, 'Type-2 fuzzy sets: some questions and answers'. *IEEE Neural Networks Society*, 2003.

[Men, 2004] J.M. Mendel, 'Computing derivatives in interval type-2 fuzzy logic systems', *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol 12(1), 2004.

[Men, 2007] J. M. Mendel, 'Advances in Type-2 Fuzzy Sets and Systems', *Information Sciences*, Vol 177, 2007.

[Men, 2007] J. M. Mendel, 'Type-2 Fuzzy Sets and Systems: An overview', *IEEE Computational Intelligence Magazine*, Vol 2(1), 2007.

[Men, 2010] J.M. Mendel. 'A quantitative comparison of interval type-2 and type-1 fuzzy logic systems: First results', *In IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 2010

[Meu, 1995] B. B. Meunier, 'La logique floue et ses applications', *Edition Addition-Wesley, France*, 1995.

## N

[Nou et al, 2000] H. Noura, D. Sauter, F. Hamelin et D. Theillol, 'Fault tolerant control in dynamic system: Application to a waiting machine', *IEEE Control System Magazine, Vol 20(1)*, 2000

[Nou, 2002] H. Noura, 'Méthodes d'accommodation aux défauts: Théorie et application', *Habilitation à diriger les Recherches*, 2002.

[Nou et al, 2009] H. Noura, D. Theilliol, J.-C. Ponsart et A. Chamseddine., 'Fault-tolerant Control Systems Design and Practical Application', *Springer, series: Advances in Industrial Control*, 2009

## O

[Ouk et al, 2009] H. Ouakka et I. Boumhidi, 'Optimal TS models for identification of nonlinear systems from input-output data', *ICGST International Journal on Automatic Control and Systems Engineering, ACSE*, 2009.

[Oud, 2008] M. Oudghiri, 'Commande multi modèles tolérantes aux défauts: Application au contrôle de la dynamique d'un véhicule automobile', *Doctorat de l'Université de Picardie Jules Vernes*, 2008.

## P

[Pag et al, 2005] O. Pagès, et A. E. Hajjaji, 'Two fuzzy multiple reference model tracking control designs with an application to vehicle lateral dynamics control', *IEEE Conf. on Decision and Control, and the European Control Conference*, 2005.

[Pas, 1998] K. V. Passino, S. Yurkovich, 'Fuzzy Control', *Addison Wesley Longman*, 1998.

[Pat et al., 1989] R.J. Patton, P.M. Frank, et R.N. Clark, 'Fault diagnosis in dynamic systems: Theory and application', *International Series in Systems and Control Engineering. Prentice Hall, Englewood Cliffs*, 1989.

[Pat, 1993], R.J. Patton, 'Robustness Issues in fault tolerant control', *Plenary paper, Tooldiag, Toulouse*, 1993.

[Pat et al, 1993], R.J. Patton et J. Chen, 'A survey of robustness in quantitative model based fault diagnosis', *Application Math et comp sciences, Vol (3)3*, 1993.

**[Pat, 1997]** R.J. Patton, 'Fault tolerant control: The 1997 situation', *Proceedings of safeprocess, Hull England IFAC*, 1997.

**[Pat et al, 1997a]** R.J. Patton et J. Chen, 'Observer based fault detection and isolation: Robustness and applications', *Control Engineering and Practice*, Vol 5(5), 1997

**[Pat et al, 2000]** R.J. Patton, P.M. Frank et R.N. Clark, 'Issues of fault diagnosis for dynamic systems', *Springer Verlag*, 2000.

**[Per et al, 2002]** W. Perruquetti et J. P. Barbot, 'Sliding Mode Control in Engineering', *Marcel Dekker*, 2002.

**[Plo, 1998]**, S. Ploix, 'Diagnostic des systèmes incertains: Approche bornante', *Doctorat, de l'Université Henri Poincaré, CRAN*, 1998.

**[Pol et al, 1995]** M. M. Polycarpou et A. Helmicki, 'Automated fault detection and accommodation: A learning systems approach', *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, Vol 25, 1995.

**[Pol, 2001]** M. M. Polycarpou, 'Fault accommodation of a class of multivariable nonlinear dynamical systems using a learning approach', *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol 46, 2001.

**[Pui et al, 2008]** V. Puig, J. Quevedo, T. Escobet, F. Nejjari, et S. de Las Heras. 'Passive robust fault detection of dynamic processes using interval models'. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol 16(5), 2008.

**[Pui, 2010]** V. Puig. 'Fault diagnosis and fault tolerant control using set-membership approaches: Application to real case studies', *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, Vol 20(4), 2010.

## Q

## R

**[Rag et al, 1994]** J. Ragot et D. Maquin, 'An algorithm for obtaining redundancy equation of LTI systems', *Automatica*, Vol 30(3), 1994.

**[Rag et al, 1997]** J. Ragot, F. Kratz, and D. Maquin, 'Espace de parité pour les systèmes linéaires incertains. Synthèse, quelques résultats nouveaux et mise en œuvre'. *Seizième Colloque GRETSI, Grenoble, France*, 1997.

**[Rag et al, 2007]** J. Ragot, D. Maquin et S. Gentil, Chap6 dans 'Supervision des procédés complexes' *Traité Information, Commande, Communication, IC2, Hermès Science Publications, Paris*, 2007.

[**Rod, 2005**] M. Rodrigues, ‘Diagnostic et commande active tolérante aux défauts appliqués aux systèmes décrits par des multi-modèles linéaires’, *Doctorat de l’Université Henri Poincaré*, 2005.

[**Rou, 1992**] G. Rouhouse, ‘Sûreté des Automatismes: Comment Assurer la Sécurité, la Disponibilité, la Maintenabilité des Automatismes Industriels? les Méthodes Disponibles et les Réglementations’, *Publications CETIM. Mécanique et Productique*, 1992.

## S

[**Sau et al, 2002**] D. Sauter, F. Hamelin, H. Noura et D. Tielliol, ‘Fault tolerant control in dynamics systems’, *In IFAC Triennial World Congress, Barcelona. Spain*, 2002.

[**Sau et al, 2007**] D. Sauter et F. Hamelin, Chap8 dans ‘Supervision des procédés complexes’ *Traité Information, Commande, Communication, IC2, Hermès Science Publications, Paris*, 2007.

[**Slo, 1984**] J. J Slotine, ‘Sliding controller design for nonlinear systems’, *International. Journal on Control*, Vol 40(2), 1984.

[**Slo, 1991**] J. J. Slotine et Li. Weiping. ‘Applied nonlinear control’, *Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey*, 1991.

[**Spo et al, 1996**] J.T. Spooner et K.M. Passino, ‘Stable adaptive control using fuzzy systems and neural networks’, *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, Vol 4, 1996.

[**Spo et al, 2001**] J.T. Spooner, R. Ordonez, M. Maggiore et K.M. Passino, ‘Adaptive control and estimation for nonlinear systems: Neural and fuzzy approximation techniques’, *John Wiley and Sons*, 2001.

[**Sta, 2005**] M. Staroswiecki. ‘Fault tolerant control: The pseudo-inverse method revisited’, *In Proceedings of the 16th IFAC World Congress*, 2005.

## T

[**Tan et al, 1999**] Y. Tang, N. Zhang et Y. Li, ‘Stable fuzzy adaptive control of a class of nonlinear systems’, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol 104, 1999.

[**Tan et al, 2005**] X. D. Tang, G. Tao et S. M. Joshi, ‘Virtual grouping based adaptive actuator failure compensation for MIMO nonlinear systems’, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol 50(11), 2005.

- [**Tan et al, 2007**] X. D. Tang, G. Tao et S. M. Joshi, ‘Adaptive actuator failure compensation for nonlinear MIMO systems with an aircraft control application’, *Automatica*, Vol 43(11), 2007.
- [**Tao et al, 2001**] G. Tao, X. Ma, et S.M. Joshi ‘Adaptive state feedback and tracking control of systems with actuator failures’, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol 46, 2001.
- [**Tao et al, 2002**] G. Tao, S. Chen et Joshi-SM, ‘An adaptive control scheme for systems with unknown actuator failures’, *Automatica*, Vol 38, 2002.
- [**Tao, 2003**] G. Tao, ‘Adaptive control design and analysis’, *Wiley Interscience, John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey*, 2003.
- [**Tao et al, 2004**] G. Tao, S. Chen, X. Tang et S.M. Joshi, ‘Adaptive Control of Systems with Actuator Failures’, *London: Springer-Verlag*, 2004.
- [**The et al, 1998**] D. Theillol, H. Noura et D. Sauter, ‘Fault tolerant control method for actuator and component faults’, *In proceedings of the 37<sup>th</sup> IEEE Conference on decision and control*, 1998.
- [**The et al, 2002**] D. Theillol, H. Noura et J. C. Ponsart, ‘Fault diagnosis and accomodation of three tank system based on analytical redundancy’, *In ISA, Transactions*, Vol 41(3), 2002.
- [**Tou, 2005**] S. Touaf, ‘Diagnostic logique des systèmes complexes dynamiques dans un contexte multiagent’, *Doctorat de l’Université de Joseph Fourier, Grenoble*, 2005.
- [**Tus, 2012**] J. Tushar, ‘Contribution à la synthèse des commandes tolérantes aux défauts par l’approche comportementale’, *Doctorat de l’Université de Lorraine, France*, 2012.

## U

- [**Utk, 1992**] V.I. Utkin, ‘Sliding modes in control optimization’, *Springer Verlag*, 1992.

## V

- [**Vei et al, 1992**] R. Veillette, J. Medanic et W. Perkins, ‘Design of reliable control systems’, *IEEE transactions on Automatic Control*, 1992.
- [**Vei, 1995**] R. Veillette, ‘Reliable linear quadratic state feed-back control’, *Automatica*, 1995.
- [**Vil, 1988**] A. Villemeur, ‘Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels’. *Eyrolles*, 1988.
- [**Vil et al, 1992**] A. Villemeur, A. Cartier et M.C. Lartisien: ‘Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment’, *Methods and Techniques, Wiley*, Vol 1, 1992.

## W

- [Wan et al, 1992] L. X. Wang et J. Mendel, 'Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least squares learning', *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1992.
- [Wan, 1992] L. X. Wang, 'Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems', *Proceedings of the 31st IEEE Conference on Decision and Control, Tucson, A Z, USA*, 1992.
- [Wan, 1994] L. X. Wang, 'Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis', *Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ*, 1994.
- [Wan, 1997] L. X. Wang, 'A course in fuzzy control systems and control', *Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ*, 1997.
- [Wan et al, 2007] R. Wang, G. Jin et J. Zhao, 'Robust fault tolerant control for a class of switched nonlinear systems in lower triangular form', *Asian Journal of Control*, Vol 9(1), 2007.
- [Wu et al, 2006] H. Wu et H. Zhang, 'Reliable  $H_\infty$  fuzzy control for continuous time nonlinear systems with actuator failures', *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2006.

## X

- [Xia et al, 2009] Z. Xiao et G. H. Yang, 'Robust fault tolerant compensation control with actuator failures and bounded disturbances', *Acta Automatica Sinica*, Vol 35(3), 2009.
- [Xiong et Saif, 2000] Y. Xiong et M. Saif, 'Sliding-mode observer for uncertain systems: Linear systems case', *IEEE Conference on Decision and Control*, Vol 1, 2000.
- [Xu et al, 2004] A. Xu et Q. Zhang 'Nonlinear system fault diagnosis based on adaptive estimation', *Automatica*, Vol 40(7), 2004.
- [Xue et al, 2006] H. Xue et J. Jiang, 'Fault detection and accommodation for nonlinear systems using fuzzy neural networks', *IEEE 5<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion control Conference*, 2006.

## Y

- [Yan et al, 2001], G. Yang, J. Wang et Y. Soh, 'Reliable  $H_\infty$  controller design for nonlinear systems', *Automatica*, 2001.
- [Yan et al, 2006] G. H. Yang et D. Ye, 'Adaptive fault-tolerant  $H_\infty$  control via state feedback for linear systems against actuator faults', *Conference on Decision and Control*, 2006.
- [Ye et al, 2006] D. Ye et G. Yang, 'Adaptive fault-tolerant tracking control against actuator faults with application to flight control', *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol 14(6), 2006.

[Yin, 2000] H. Ying, 'Fuzzy control and modeling, analytical foundations and applications', *IEEE Press, NJ*, 2000.

[You et al, 2009] H. Yousef, M. Hamdy, et al, 'Adaptive fuzzy decentralized control for interconnected MIMO nonlinear subsystems' *Automatica*, Vol 45, 2009.

## Z

[Zad, 1965] L.A. Zadeh, 'Fuzzy sets. Information and control', 1965.

[Zad, 1975] L.A. Zadeh, 'The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning', *Information sciences*, Vol 8, 1975.

[Zha, 1999]. Q. Zhang, 'Identification et surveillance de systèmes dynamiques' *Habilitation à diriger les recherches, université de Rennes1, Institut de Formation Supérieure en Informatique et en Communication*, 1999.

[Zha et al, 1999a] Y. Zhang et J. Jiang, 'Design of integrated fault detection, diagnosis and reconfigurable control systems' *Conference on Decision and Control*, 1999.

[Zha et al, 1999b] Y. Zhang et J. Jiang, 'An interacting multiple-model based fault detection diagnosis and fault tolerant control approach', *Conference on Decision and Control*, 1999.

[Zha et al, 2003a] Y. Zhang et J. Jiang, 'Bibliographical review on reconfigurable fault tolerant control systems', *In Proceedings of Safeprocess, IFAC, Washington, USA*, 2003.

[Zha et al, 2006] Y. Zhang et J. Jiang, 'Issues on integration of fault diagnosis and reconfigurable control in active fault tolerant control systems', *6<sup>th</sup> IFAC Symposium on fault Diagnostic, Supervision and Safety for Technical Processes*, 2006.

[Zha et al, 2008] Y. Zhang et J. Jiang, 'Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems', *Annual Reviews in Control*, Vol 32(2), 2008.

[Zha et al, 2004] X. D. Zhang, T. Parisini et M. M. Polycaprou, 'Adaptive fault-tolerant control of nonlinear uncertain systems: An information-based diagnostic approach', *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 49(8), 2004.

[Zha et al, 2006] X. Zhang, Y. Liu, et al, 'An intelligent hierarchical, approach to actuator fault diagnosis and accommodation', *IEEE Aerospace Conference*, 2006.

[Zha et al, 2010] X. Zhang, M. M. Polycarpou, et T. Parisini, 'Fault diagnosis of a class of nonlinear uncertain systems with Lipschitz nonlinearities using adaptive estimation' *Automatica*, Vol 46(2), 2010.

**[Zha et al, 2008]** D. Zhang, Z. Wang et S. Hu, 'Robust satisfactory fault tolerant control of uncertain linear discrete time systems: An LMI Approach', *International Journal of Systems Science*, 2008.

**[Zha et al, 1998]** Q. Zhao et J. Jiang, 'Reliable state feedback control system design against actuator failure', *Automatica*, 1998.

**[Zwin, 1995]** G. Zwingelstein, 'Diagnostic des Défaillances: Théorie et pratique pour les systèmes industriels', *Traité des Nouvelles Technologies, Série Diagnostic et Maintenance*, Hermès, 1995.