



# MÉMOIRE

Présentée  
en vue de l'obtention du titre de

**MAGISTER**

En

Electronique : Option Control

par

**Fouad ALOUANI**

Ingénieur d'Etat en Electronique du CU- Tebessa

**Thème**

**Commande par Logique Floue Appliquée aux pendules inversés et au  
Simulateur de Vol d'Hélicoptère : Simulation et Expérimentation**

Soutenue publiquement le 24/06/2006 devant le jury composé de:

Mohamed Séghir BOUCHERIT	Professeur à E.N.P	Président
Djamel BOUKHETALA	Maître de conférences à l'E.N.P	Rapporteur
Farès BOUDJEMA	Professeur à E.N.P	Examineur
Mohamed BOUAMAR	Maître de conférences à UMBM	Examineur

# TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	1
<b>CHAPITRE I : COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE</b>	4
I.1- Introduction .....	4
I.2- La logique floue .....	4
I.3- Les concepts .....	6
I.3.1-Sous-ensemble flou .....	6
I.3.2-Variante linguistique .....	8
I.3.3-Opérateurs de la logique floue .....	9
I.3.4-Fonction d'appartenance .....	11
I.3.5-Propositions et règle floue .....	12
I.4-Commande par logique floue .....	13
I.4.1-Introduction .....	13
I.4.2-Principe et réalisation d'un régulateur flou .....	14
I.4.2.1-Procédé générale lors de la conception d'une commande par logique floue .....	14
I.4.2.2-Propriétés d'une commande par logique floue .....	15
I.4.3-Structure d'un régulateur flou .....	16
I.4.3.1-Interface de fuzzification .....	17
I.4.3.2-Base de connaissances .....	18
I.4.3.3-Moteur d'inférence floue .....	19
I.4.3.3.1-Méthode d'inférence max-min .....	19
I.4.3.3.2-Méthode d'inférence max-prod .....	20
I.4.3.3.3-Méthode d'inférence somme-prod .....	20
I.4.3.4-Interface de défuzzification .....	21
I.4.4-Différents types de régulateurs flous .....	23
I.4.4.1-Régulateur de type Mamdani .....	23
I.4.4.2-Régulateur de type Sugeno .....	24
I.4.5-Principe du régulateur flou .....	24
I.4.5.1-Variante d'entrées du régulateur .....	24
I.4.6-Avantages et inconvénients de la commande par logique Floue .....	25
I.5-Conclusion .....	26
<b>CHAPITRE II : MODELISATION ET COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE D'UN SIMPLE ET DOUBLE PENDULE INVERSE</b>	27
II.1-Introduction .....	27
II.2-Modélisation et commande par logique floue d'un simple pendule inversé	28
II.2.1-Introduction .....	28
II.2.2-Modélisation du système simple pendule inversé .....	29
II.2.2.1-Modèle de connaissance .....	29
II.2.2.2-Paramètres du modèle .....	32
II.2.2.3-Simulation .....	32

II.2.3-Commande décentralisée floue du système simple pendule inversé .....	33
II.2.3.1-Structure de la commande décentralisée floue .....	34
II.2.3.2-Structure de régulateur flou de MAMDANI .....	34
II.2.3.2.1-Base de règle floue (un ensemble de règle de type SI-ALORS) .....	35
II.2.3.2.2-Moteur d'inférence .....	36
II.2.3.2.3-Interface de fuzzification .....	36
II.2.3.2.4-Interface de défuzzification .....	36
II.2.3.2.5-Les gains de normalisations .....	37
II.2.3.3-Signal de commande .....	37
II.2.3.4-Implémentation du régulateur flou .....	37
II.2.3.5-Simulation en boucle fermée .....	38
II.2.3.5.1-Test de stabilisation .....	39
II.2.3.5.2-Test de poursuite d'une trajectoire .....	39
II.2.3.5.3-Test de robustesse vis-à-vis changement des conditions initiales .....	41
II.2.3.5.4-Test de robustesse vis-à-vis variation paramétrique .....	44
II.2.4-Interprétation des résultats .....	49
II.3-Modélisation et commande décentralisée par logique floue d'un double pendule inversé.....	50
II.3.1-Introduction .....	50
II.3.2-Modèle du système double pendule inversé .....	51
II.3.2.1-Paramètres du modèle .....	52
II.3.2.3-Simulation .....	52
II.3.3-Commande floue du système double pendule inversé .....	53
II.3.3.1-Structure de la commande floue .....	53
II.3.3.2-Structure de régulateur flou de MAMDANI .....	54
II.3.3.3-Implémentation du régulateur flou .....	55
II.3.3.4-Simulation .....	56
II.3.3.4.1-Test de stabilisation .....	56
II.3.3.4.2-Test de robustesse vis-à-vis changement des conditions initiales .....	57
II.3.3.4.3-Test de robustesse vis-à-vis variation paramétrique ...	58
II.3.4-Interprétation des résultats .....	61
II.4-Conclusion .....	61

## **CHAPITRE III : MODELISATION ET COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE D'UN SIMULATEUR DE VOL D'HELICOPTERE** 62

III.1-Introduction .....	62
III.2-Le système TRMS - Le simulateur de vol d'hélicoptère .....	63
III.2.1-Modélisation du système TRMS .....	63
III.2.1.1-Sous système d'élévation .....	64
III.2.1.2-Sous système d'azimut .....	68
III.2.1.3-Dynamiques des propulseurs .....	70
III.2.1.4-modèle d'état .....	72
III.2.1.5-Le modèle découplé .....	73

III.2.1.5.1-Modèle 1DDL vertical .....	74
III.2.1.5.2-Modèle 1DDL horizontal .....	74
III.2.1.6-Paramètres du modèle .....	75
III.2.1.6.1-Caractéristiques non linéaires.....	75
III.2.1.6.2-Paramètres physiques .....	76
III.2.1.6.3-Paramètres physiques déterminés par une Identification .....	76
III.2.1.6.4-Constantes de temps et gains statiques .....	76
III.2.2-Simulation .....	77
III.2.2.1-La réponse libre .....	77
III.2.2.2-La réponse en boucle ouverte .....	79
III.3-Commande décentralisée par logique floue du système TRMS .....	81
III.3.1-Introduction .....	81
III.3.2-Commande floue décentralisé du système TRMS .....	82
III.3.2.1-Structure de régulateur flou de MAMDANI .....	82
III.3.2.2-Implémentation du régulateur flou .....	83
III.3.2.3-Simulation .....	84
III.3.3-Interprétation des résultats.....	89
III.4-Conclusion .....	89
<b>CHAPITRE IV: IMPLEMENTATION PRATIQUE DE LA COMMANDE</b>	<b>91</b>
<b>PAR LOGIQUE FLOUE D'UN SIMULATEUR DE VOL D'HELICOPTERE</b>	
IV.1-Introduction .....	91
IV.2-Présentation du simulateur .....	91
IV.2.1-Propulseurs .....	93
IV.2.2-Commande des moteurs .....	93
IV.2.3-Les encodeurs optiques .....	93
IV.2.4-La base du TRMS .....	94
IV.2.5-Boîtier marche/arrêt .....	95
IV.2.6-Le (SCSI BOX) .....	95
IV.2.7-Carte d'acquisition .....	96
IV.2.8-Environnement De Développement .....	97
IV.2.9-Considérations pratiques lors de l'implémentation d'une loi de Commande .....	101
IV.3-Implémentation pratique de la commande floue .....	102
IV.3.1-Commande du système en mode horizontal découplé, 1-DDL .....	103
IV.3.1.1-Test de stabilisation .....	104
IV.3.1.2-Test de poursuite d'une trajectoire .....	104
IV.3.2-Commande du système en mode vertical découplé, 1-DDL .....	105
IV.3.2.1-Test de stabilisation .....	105
IV.3.2.2-Test de poursuite d'une trajectoire .....	106
IV.3.3-Commande du système en mode couplé, 2-DDL .....	106
IV.3.3.1-Test de stabilisation .....	107
IV.3.3.2-Test de poursuite d'une trajectoire .....	107
IV.3.3.3-Tests de robustesse .....	109
IV.3.4- Interprétation des résultats .....	110
VI.4-Conclusion .....	110
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>111</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>113</b>

### ملخص:

العمل المنجز في هذه المنكرة يخص تطبيق تقنية التحكم باستخدام المنطق الغامض على مجموعة من الاجهزة اللاخطية. جهاز لهادي الرقاص المقلوب , جهاز ثنائي الرقاص المقلوب, و كذا جهاز المحاكاة لطائرة الهليكوبتر (Twin Roto MIMO System). بدلية قمنا بتقديم و توضيح النماذج لرياضية الاخطية لكل من جهازي الرقاص المقلوب وكذلك جهاز ثنائي الرقاص المقلوب, ثم قمنا باجراء تحكم محاكي لكل من الجهازين, و هذا باستخدام طريقة تحكم ذات بنية لامركزية.

كل النتائج المحصل عليها من خلال اجراء مجموعة من الاختبارات, تم توضيحها و ارفاقها بمجموعة من الملاحظات و التعليقات. بالنسبة لجهاز المحاكاة (TRMS), قمنا باستخراج نموذج رياضي لاخطي. هذا الأخير سمح باستخراج نمونجين ثنائيين يخصصان حركة المحاكي في كل من المستويين الاقي و العمودي. جميع هذه النماذج استغلنا فيما بعد في القيام بمجموعة من اختبارات محاكاة من اجل اختبار مدى فعالية التقنية المستعملة. في الاخير قمنا بتطبيق جميع أنظمة التحكم المحصل عليها على جهاز الحقيقي الموجود في مخبر التحكم في العمليات التصنيعية بالمدرسة المتعددة التقنيات. كل النتائج المحصل عليها تم توضيحها و ارفاقها بمجموعة من الملاحظات و التعليقات

كلمات مفتاحية: المنطق الغامض, TRMS, الرقاص المقلوب, تحكم لامركزي, محاكاة, تجرية

### Abstract :

This work deals with application of fuzzy logic control to physical systems. First, analytical models for single and double inverted pendulums are presented. Then, decentralized fuzzy controllers are synthesized and applied to each one. Some simulations with robustness tests are performed which demonstrates the feasibility of the proposed control strategy. Second, a non linear model of the Twin Rotor Multi-Input Multi-Output System (TRMS) is developed. A decentralized fuzzy controller is then designed and applied to this model. Simulation results containing robustness tests are obtained. Furthermore, the proposed control laws are implemented on the experimental platform. In order to highlight experimentally the performances of the control scheme, robustness tests both in stabilization and in trajectory tracking mode are performed.

**Key words:** Fuzzy logic, inverted pendulum, TRMS, decentralized control, simulation, experimentation

### Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'application de la commande par logique floue aux systèmes physiques. Dans un premier lieu, les modèles d'un simple et double pendule inversé ont été présentés. Des commandes floues ont été ensuite synthétisées puis appliquées aux deux systèmes en utilisant une structure de commande décentralisée. Des résultats de simulations contenant des tests de robustesses ont été présentés. Dans un second lieu, le modèle analytique d'un simulateur de vol d'hélicoptère a été élaboré sur lequel des commandes par logique floue ont été appliquées en modes couplé et découplé. Des simulations ont été effectuées aussi bien en stabilisation qu'en poursuite de trajectoire. Afin de valider les résultats de simulation, les commandes développées sont ensuite implantées en temps réel sur un simulateur de vol d'hélicoptère de type TRMS (Twin Rotor MIMO System). Les résultats expérimentaux comprenant des tests de robustesse ont montré l'efficacité des commandes proposées.

**Mots clé :** logique floue, pendule inversé, TRMS, commande décentralisée, simulation, experimentation.