



HAL
open science

Contribution à la commande des systèmes non linéaires par l'approche Takagi-Sugeno

Kevin Guelton

► **To cite this version:**

Kevin Guelton. Contribution à la commande des systèmes non linéaires par l'approche Takagi-Sugeno. Systèmes dynamiques [math.DS]. Université de Reims Champagne-Ardenne, 2010. tel-04079617

HAL Id: tel-04079617

<https://hal.science/tel-04079617v1>

Submitted on 24 Apr 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

*Génie informatique, automatique et traitement du signal
(Section n°61 du Conseil National des Universités)*

Présentée par

Kevin GUELTON

Maître de Conférences à l'URCA
Docteur en Automatique
Ingénieur en Génie Informatique et Productique

**CONTRIBUTION A LA COMMANDE DES
SYSTEMES NON LINEAIRES PAR L'APPROCHE
TAKAGI-SUGENO**

Soutenue le 23 novembre 2010 devant le jury composé de :

M. Ahmed El Hajjaji	Pr., UPJV, MIPS, Amiens,	Rapporteur
M. Thierry-Marie Guerra	Pr., UVHC, LAMIH, Valenciennes,	Examineur
M. Didier Maquin	Pr., INPL, CRAN, Nancy,	Rapporteur
M. Noureddine Manamanni	Pr., URCA, CReSTIC, Reims,	Garant HDR
M. Jean-Pierre Richard	Pr., EC-Lille, LAGIS, Villeneuve d'Ascq,	Examineur
M. Olivier Sename	Pr., INPG, GIPSA-Lab, Grenoble	Rapporteur
M. Janan Zaytoon	Pr., URCA, CReSTIC, Reims,	Examineur

TABLE DES MATIERES

Table des matières	1
Introduction générale	5
I. Curriculum vitae	9
1. État civil	9
2. Diplômes, titres et parcours universitaires	10
3. Positions occupées	11
3.1. Position actuelle	11
3.2. Positions précédemment occupées	11
II. Synthèse des activités pédagogiques	13
1. Contexte et parcours d'enseignant	13
2. Enseignements dispensés à Valenciennes (2000-2005)	14
3. Enseignements dispensés à Reims (depuis 2005)	16
4. Encadrement de stages, projets de fin d'études et d'ingénieurs	20
4.1. Suivis de stages en entreprise	20
4.2. Encadrements de projets universitaires	20
III. Participations à l'encadrement scientifique	21
1. Encadrement de travaux post-doctoraux	21
2. Encadrements de thèses soutenues	22
3. Encadrement de thèses en cours	24
4. Encadrements de Masters recherche et DEA	26

IV. Activités administratives et collectives	29
1. Implications pour la collectivité à l'URCA	29
2. Implication pour la collectivité hors URCA	29
5. Implications et prises de responsabilités pédagogiques à l'URCA	30
3. Activités extra-universitaires	30
V. Rayonnement et autres participations à la recherche	33
1. Participations à des contrats et projets de recherche	33
2. Collaborations scientifiques hors CReSTIC	34
3. Membre de comités internationaux de programme (IPC) dans des conférences	35
4. Membre de Comités d'Organisations (NOC) dans des conférences	36
5. Organisation, modération de Sessions Spéciales et Journées Scientifiques	36
6. Participation à des jurys de thèses	37
7. Participation à des communautés scientifiques	37
8. Activités de relecture d'articles (reviewing)	38
VI. Bibliographie personnelle	39
4. Revues Internationales	39
5. Revues Nationales	40
6. Chapitre d'ouvrage	40
7. Direction d'ouvrage	40
8. Conférences internationales	40
9. Conférences nationales	43
10. Autres participations à la recherche	44
11. Rapports et mémoires de recherche	44
12. Supports pédagogiques	45

VII. Synthèse des activités de recherche	47
1. Parcours scientifique : De la biomécanique à l'automatique	47
2. Travaux antérieurs à ma prise de fonctions à l'URCA (2000-2004)	48
2.1. Laboratoire et groupes de recherche	48
2.2. Travaux de DEA	49
2.3. Travaux de thèse de doctorat	49
3. Laboratoire et groupe de recherche actuels (depuis 2005)	51
4. Contexte initial et intégration au sein de l'équipe AUTO du CReSTIC	52
5. Travaux à caractère théorique (depuis 2005)	53
5.1. Quelques rappels sur les modèles TS et leur stabilisation	55
5.1.1. Présentation des modèles TS :	55
5.1.2. Obtention des modèles flous de type Takagi-Sugeno (TS)	57
5.1.3. Stabilité et stabilisation quadratique par retour d'état des modèles TS	59
5.1.4. Discussion sur le conservatisme des conditions LMI et la stabilisation non quadratique des modèles TS	62
5.2. Problèmes de commande des modèles TS traités sous forme LMI	66
5.2.1. Commande robuste par retour de sortie pour le suivi de trajectoire des systèmes TS	67
5.2.2. Synthèse de lois de commande pour les descripteurs TS	71
5.2.3. Stabilisation non quadratique par retour de sortie des systèmes TS	82
5.3. Alternatives aux problèmes rencontrés dans le cadre non quadratique	91
5.3.1. Utilisation d'une fonction de Lyapunov sous forme d'intégrale curviligne	91
5.3.2. Stabilisation non quadratique locale des systèmes TS	92
5.3.3. Vers un changement de point de vue : approches polynomiales	94
5.4. Quelques travaux d'ouverture sur la commande des SDH	98
5.4.1. Synthèse de contrôleur pour les systèmes linéaires à commutations	99
5.4.2. Commande robuste des systèmes non linéaires à commutations	100
6. Travaux à caractère applicatif	103
6.1. Conception et commande de machines de rééducation	103
6.1.1. Définition des objectifs du dispositif Sys-Rééduc en termes de rééducation	104
6.1.2. Conception et réalisation d'un premier prototype de la machine Sys-Rééduc	105
6.1.3. Architecture de commande proposée pour les machines de rééducation	107

6.2. Autres travaux à caractère applicatif	111
6.2.1. Modélisation TS en vue de la commande d'un robot pneumatique à deux degrés de liberté	111
6.2.2. Participations épisodiques à des travaux d'analyse du mouvement en biomécanique	112
Bilan et perspectives	115
Références bibliographiques	127
Annexes : Tirés à part de publications significatives	135

INTRODUCTION GENERALE

« Enseignant-chercheur ! Tiens donc, pourquoi pas ? »

C'est sans doute ce que j'ai dû me dire lorsque j'ai compris que j'aimerais devenir enseignant-chercheur. On se lance alors dans des études approfondies et l'on idéalise bien souvent, avec le regard envieux, ces « maîtres de conférences » et « professeurs » qui nous encadrent dans nos travaux de thèse. On se prend à rêver d'un tel avenir tout en découvrant le parcours du combattant qu'il faut parfois traverser pour obtenir un poste...

La carrière d'un enseignant-chercheur est un parcours individuel jalonné de plusieurs étapes. Certains, dont je suis, ont la chance d'obtenir un poste de maître de conférences après leur thèse de doctorat. Ils peuvent alors pourquoi pas se satisfaire de cette position, mais, bien souvent, que ce soit par ambition ou par goût du défi, ils aspirent à une évolution de carrière qui permettrait d'accéder à de nouvelles responsabilités et qui, peut-être, conduirait à l'obtention un poste de professeur des universités. Dans ce cas, une étape préalable consiste en l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR).

L'HDR est un diplôme français, obtenu le plus souvent après un doctorat, mais qui n'a pas pour objet de sanctionner l'achèvement d'un cursus universitaire. En effet, surtout lorsque celle-ci est passée assez tôt dans la carrière d'un enseignant-chercheur, l'HDR ne doit pas être vue comme un aboutissement mais plutôt comme une reconnaissance, une ouverture vers de nouvelles responsabilités et notamment vers une plus grande autonomie scientifique. C'est d'ailleurs en ce sens qu'elle est réglementairement définie par l'arrêté du 23 novembre 1988 (modifié en 2002) :

« L'habilitation à diriger des recherches sanctionne la reconnaissance du haut niveau scientifique du candidat, du caractère original de sa démarche dans un domaine de la science, de son aptitude à maîtriser une stratégie de recherche dans un domaine scientifique ou technologique suffisamment large et de sa capacité à encadrer de jeunes chercheurs. Elle permet notamment d'être candidat à l'accès au corps des professeurs des universités. »

Pour un maître de conférences, l'exercice consiste donc à rendre compte de ses activités d'enseignant-chercheur depuis sa nomination. Un mémoire d'HDR peut prendre différentes formes laissées à la discrétion du candidat. Certains choisissent de rédiger un curriculum vitae étendu auquel est adjoint un ensemble de publications. D'autres préfèrent un document scientifique plus détaillé se rapprochant parfois de ce qu'était, auparavant, la thèse d'état. Pour ma part, j'ai opté pour un format intermédiaire en essayant de décrire au mieux mon parcours d'enseignant-chercheur au travers :

- de mon curriculum vitae,
- d'une description de mes enseignements et activités pédagogiques,
- d'une présentation des encadrements scientifiques dispensés (stages post-doctoraux, thèse de doctorat, stages de master recherche et DEA),
- d'une présentation de mes activités dites de rayonnement et prises de responsabilités administratives et collectives,
- de la liste exhaustive de mes publications scientifiques,
- de la présentation de mes thèmes et activités de recherche à laquelle est adjointe en annexe une sélection de mes publications que j'estime les plus significatives,
- et enfin d'une conclusion dans laquelle sont abordées les perspectives scientifiques.

L'HDR visant à sanctionner un certain niveau scientifique, la partie concernant mes activités de recherche est la plus développée. Celles-ci concernent essentiellement, comme le titre de ce manuscrit l'indique, la commande des systèmes dynamiques non linéaires de type Takagi-Sugeno (TS). L'objectif recherché ici n'est pas de proposer un ouvrage de référence, c'est-à-dire un « livre » complet et détaillé des techniques de commande applicables à cette classe de systèmes, mais plutôt de décrire mon parcours scientifique.

Dans un premier temps, j'essaie de montrer comment, en partant d'activités de recherche appliquées en biomécanique, j'ai été amené à m'intéresser à ces problèmes d'automatique à caractère plus théorique. Puis, après un rappel des techniques élémentaires de synthèse de lois de commande sur la base d'une modélisation floue de type TS, je développe de manière succincte ma contribution à ce domaine de l'automatique non linéaire. Celle-ci s'articule autour des points suivants :

- la proposition de conditions de stabilité sous forme d'Inégalités Linéaires Matricielles (LMI) pour différents problèmes de commande des systèmes TS (stabilisation des systèmes écrits sous forme descripteur, commande par retour de sortie...),
- L'extension de ces conditions en vue de la réduction du conservatisme des conditions LMI, notamment par l'emploi de fonctions candidates non quadratiques de Lyapunov,
- La recherche de solutions ou alternatives aux problèmes de mise en œuvre des approches non quadratiques. C'est-à-dire proposer des techniques d'analyse de stabilité des systèmes TS qui ne requièrent pas la connaissance a priori de certains paramètres tels que les bornes des dérivées des fonctions d'appartenance.
- L'ouverture vers la commande d'autres classes de systèmes tels que les systèmes dynamiques hybrides (à commutations).

Dans la dernière partie de la section dévolue à la description de mes activités de recherche, je montre comment, au travers de travaux à caractère applicatif sur la commande de machines de rééducation ou encore d'un robot pneumatique, j'ai eu à cœur d'appliquer les techniques de commande développées pour les systèmes TS.

Enfin, à la fin de ce manuscrit, une conclusion sous forme de bilan est proposée et des perspectives de ces travaux de recherche sont présentées. Celles-ci concernent notamment, dans un souci de continuité, l'approfondissement des travaux présentés dans le cadre de la commande TS, mais aussi leur transposition au cas des systèmes hybrides, par des techniques LMI ainsi que par d'autres alternatives comme l'optimisation polynomiale.

I. CURRICULUM VITAE

1. État civil

GUELTON Kevin

Nationalité française

Né le 16 juillet 1975 à Lesquin (59)

Fonctions actuelles : **Maître de conférences, URCA¹**

Discipline : **Automatique**, 61^{ème} section du Conseil National des Universités

Laboratoire d'affiliation : **CReSTIC² EA3804, Reims** (Centre de Recherche en STIC)

Adresse personnelle: 48, rue Hincmar
 51100 Reims, France

Adresse professionnelle : CReSTIC EA 3804 – Université de Reims Champagne-
Ardenne

Moulin de la Housse, Case 33, BP 1039
51687 Reims Cedex 2, France

Téléphone : +33 3 26 91 32 61

Fax : +33 3 26 91 31 06

E-mail : kevin.guelton@univ-reims.fr

Site Web du laboratoire : <http://crestic.univ-reims.fr>

Pages Internet personnelles : <http://kguelton.free.fr>

¹ Université de Reims Champagne-Ardenne

² Centre de Recherche en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication

2. Diplômes, titres et parcours universitaires

2003 : *Doctorat*, spécialité Automatique et Informatique des Systèmes Industriels et Humains, mention Automatique, LAMIH³ UMR CNRS 8530, UVHC⁴.

Titre : **Estimation des caractéristiques du mouvement humain en station debout.**

Mise en œuvre d'observateurs flous sous forme descripteur.

Soutenu le 16 Décembre 2003 devant le jury composé de :

S. Delprat	MC., LAMIH-SF	Co-directeur
S. Galichet	Pr., LISTIC, U. de Savoie	Présidente
P. Gorce	Pr., LESP, U. de Toulon	Examineur
T-M Guerra	Pr., LAMIH-SF	Co-directeur
F-X. Lepoutre	Pr., LAMIH-BIO	Co-directeur
N.-K. M'Sirdi	Pr., LRV, U. de Versailles	Rapporteur
J. Ragot	Pr., CRAN, INP Lorraine	Rapporteur

Mention: Très honorable.

2000 : *D.E.A.* d'Automatique des Systèmes Industriels et Humains, LAMIH, UVHC.

Titre : **Contribution à l'évaluation objective de la posture des sujets scoliotiques.**

Encadrement: F. Barbier, A-P. Maquinghen, F-X. Lepoutre.

Mention: Assez bien

2000 : *Diplôme d'ingénieur EIGIP*⁵, Valenciennes.

Spécialité : Maintenance industrielle

Distinction: Tableau d'honneur

1997 : *Classe prépa, Math-sup/spé TA-TSI*, Lycée du Hainaut, Valenciennes.

1994 : *Bac F10a*, Microtechnique Option appareillage, Lycée technique Alfred Kastler, Denain, Mention bien.

³ Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaine

⁴ Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis

⁵ Ecole d'Ingénieurs en Génie Informatique et Productique

3. Positions occupées

3.1. Position actuelle

Depuis février 2005 à ce jour:

Maître de conférences, classe normale (4^{ème} échelon), 61^{ème} section du CNU

Affectation : UFR SEN⁶, Département EEA⁷, URCA.

Laboratoire d'accueil: CReSTIC EA3804, Reims.

3.2. Positions précédemment occupées

De septembre 2004 à janvier 2005:

ATER, temps plein, 61^{ème} section du CNU

Affectation : ISTV⁸, UVHC.

Laboratoire d'accueil: LAMIH UMR CNRS 8530, Valenciennes.

D'octobre 2003 à août 2004:

ATER, temps partiel, 61^{ème} section du CNU

Affectation : ENSIAME⁹, Valenciennes.

Laboratoire d'accueil: LAMIH UMR CNRS 8530, Valenciennes.

D'octobre 2000 à septembre 2003:

Moniteur – Allocataire de recherche, 61^{ème} section du CNU

Affectation : ENSIAME, Valenciennes.

Laboratoire d'accueil: LAMIH UMR CNRS 8530, Valenciennes.

⁶ UFR Sciences Exactes et Naturelles

⁷ Electronique, Electrotechnique et Automatique

⁸ Institut des Sciences et Techniques de Valenciennes

⁹ École Nationale Supérieure d'Ingénieurs en Informatique, Automatique, Mécanique, Energétique, Electronique

II. SYNTHÈSE DES ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES

1. Contexte et parcours d'enseignant

Dans le cadre de ma formation doctorale et de sa préparation aux métiers de l'enseignement supérieur et de la recherche, j'ai débuté ma carrière d'enseignant en septembre 2000 en qualité de **Moniteur** de l'enseignement supérieur à l'**ENSIAME** de Valenciennes. J'ai ensuite bénéficié, à partir d'octobre 2003, d'un poste d'attaché temporaire à l'enseignement et la recherche à l'**UVHC** qui m'a permis d'aborder sereinement la recherche d'une position permanente. C'est alors qu'au profit des postes supplémentaires mis au concours en 2004 sous l'action du mouvement « Sauvons la recherche », j'ai été recruté en qualité de Maître de conférences à l'**URCA** à compter du 1^{er} février 2005.

Notons que ces postes dit SLR, puisqu'inespérés et dont la vocation était le renforcement du potentiel de recherche des universités, n'étaient pas nécessairement associés à des besoins en enseignement clairement identifiés. Durant mes premières années en fonction à Reims, il a donc fallu que je me construisse un service en allant glaner, de-ci de là, des heures d'enseignements relevant de mes compétences. Ceci explique le spectre large des enseignements décrits ci-dessous et qui parfois sembleront quelque peu éloignés, bien que relevant de la 61^{ème} section du Conseil National des Universités, de mon activité de recherche actuelle, c'est-à-dire l'automatique des systèmes non linéaires. Ainsi, outre des enseignements spécifiques à l'automatique, une partie non négligeable de mon activité pédagogique actuelle concerne des enseignements périphériques. Ces derniers, relevant des compétences acquises lors de mes études d'ingénieurs, restent nécessaires aux métiers de cadres techniques des futurs diplômés. Parmi ceux-ci, nous trouverons des disciplines telles que la conduite de projets, le management ou encore la maintenance industrielle.

Dans la suite, je commencerai par présenter les enseignements effectués de 2000 à 2005 à Valenciennes puis les enseignements depuis ma prise de fonctions à Reims.

2. Enseignements dispensés à Valenciennes (2000-2005)

L'initiation et la formation au métier d'enseignant dans l'enseignement supérieur ne sont pas systématiques et ne constituent pas nécessairement un préalable requis pour l'obtention d'un poste de maître de conférences. Néanmoins, j'ai bénéficié d'un poste de moniteur à l'ENSIAME durant mes années de thèse. Celui-ci a été une expérience riche qui m'a permis de développer mes qualités d'enseignant. Ainsi, en 2000/2001, mes premiers enseignements ont concerné l'encadrement de TP de **logique combinatoire et séquentielle**. Ces derniers disparaîtront l'année suivante suite à une refonte des programmes de l'ENSIAME. Puis, l'enseignement de la **vision artificielle et du traitement d'images** a pris une part importante de mon service de 2000 à 2004. En effet, c'est dans cette matière que l'apprentissage du métier d'enseignant a été le plus riche puisque j'ai directement participé à la production des documents pédagogiques [SP1] ainsi qu'à la réalisation d'une maquette à base d'automate de vision de type DVT 600 (Figure 1). J'ai été chargé de l'encadrement des TP de Vision à l'ENSIAME de 2000 à 2004 et des TD et TP à l'**ITII-ISIV**¹⁰ (département de l'ENSIAME dédié à l'alternance) de 2002 à 2004.



Figure 1 : Maquette de TP réalisée dans le cadre de mes enseignements de Vision Artificielle et Traitements d'Images à l'ENSIAME

À partir de 2000, j'ai également encadré les TP relatifs à la mise en œuvre de systèmes automatisés à base d'**automates programmables industriels** proposés aux étudiants de 1ère

année de l'ENSIAME. Par ailleurs, j'ai assuré l'encadrement du module « **projet professionnel et personnel** » de l'ENSIAME dont l'objectif consistait à aider les étudiants à définir ou préciser un projet professionnel et acquérir une démarche active face à l'insertion professionnelle (stages, formation, recherche d'emploi...). Dans ce cadre, le rôle de l'enseignant consistait, au cours de 4 séances de TD, à fixer les objectifs de travail, une méthodologie, animer les débats sans pour autant intervenir sur le contenu de la recherche personnelle des étudiants.

Enfin, durant ma dernière année à Valenciennes (ATER), j'ai mis en place, à l'ISTV, un module d'enseignement de l'**algorithmique et principes de base de la programmation** à base de pseudo langage [SP2]. Celui-ci visait à venir en aide à des étudiants en difficulté dans des cours plus spécifiques à la programmation dans un langage particulier et dont la spécialité n'est pas l'informatique. Ainsi, j'ai proposé de reprendre les bases de l'algorithmique sous la forme de cours-TD en petits groupes afin d'adapter au mieux l'enseignement aux besoins des étudiants. Par ailleurs, cette même année, j'ai également pris en charge l'encadrement des TP d'**automatique continue** à l'ITII-ISIV.

Le tableau suivant (Tableau 1) résume de manière synthétique les enseignements effectués durant mes années de monitorat et d'ATER à l'UVHC et l'ENSIAME.

TABLEAU 1 : ENSEIGNEMENTS DISPENSES A VALENCIENNES (2000-2005).

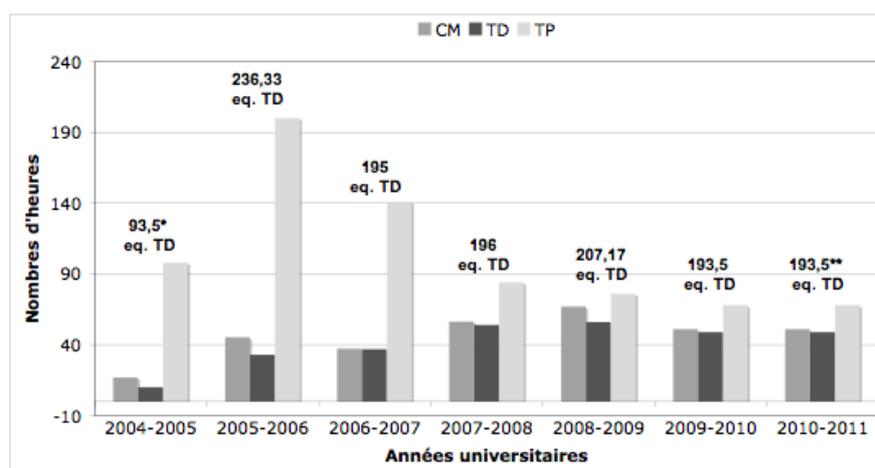
Période et fonctions	Établissement	Étape	Matière	Quota horaire	
				TD	TP
2000-2005 Moniteur puis ATER	ENSIAME	3 ^{ème} année	Vision artificielle et traitements d'images		36 h
2003-2004 ATER	ISIV	3 ^{ème} année	Vision artificielle et traitements d'images	18 h	54 h
2004-2005 ATER	ISIV	2 ^{ème} année	Automatique continue		108 h
2004-2005 ATER	ISTV	L3, Sc. Phys.	C/TD Algorithmique et programmation	18h	
2000-2004 Moniteur	ENSIAME*	1 ^{ère} année	Automates Programmables Industriels		24 h
2000-2002 Moniteur	ENSIAME*	3 ^{ème} année	Projet professionnel et personnel	9 h	
2000-2001 Moniteur	ENSIAME*	1 ^{ère} année	Logique combinatoire et séquentielle		27 h

¹⁰ Institut des Techniques d'Ingénieurs de l'Industrie – Institut Supérieur Industriel de Valenciennes

3. Enseignements dispensés à Reims (depuis 2005)

J'ai été recruté à compter de février 2005 en qualité de maître de Conférences à l'URCA et affecté au département EEA de l'UFR SEN. Depuis ma prise de fonctions, les enseignements que j'ai pu dispenser à Reims ont couvert un large spectre des disciplines relatives à la 61^{ème} section du Conseil National des Universités. Parmi ces enseignements, on retrouve la **logique combinatoire et séquentielle**, la **supervision des systèmes à événements discrets**, la **robotique**, l'**automatique continue**, le **management de projet**, la **maintenance industrielle** ou encore les **risques industriels**. Dans la suite, je commencerai par présenter de manière quantitative l'évolution de ma charge d'enseignement depuis février 2005 à ce jour. Puis, afin de ne pas proposer une description détaillée pouvant s'avérer rébarbative pour le lecteur, je me limiterai à présenter sommairement les enseignements que je considère aujourd'hui pérennes et qui constituent le cœur de mon service actuel.

La figure 2 présente, de manière quantitative, l'évolution de la charge horaire annuelle de mon service d'enseignement depuis 2005. Ayant été recruté lors de la deuxième session 2004, c'est-à-dire pour une prise de fonction en février 2005, je n'ai eu à accomplir qu'un demi-service d'enseignement à Reims au second semestre de l'année 2004-2005. On notera par ailleurs la décroissance du nombre d'heures effectives en présence d'étudiants depuis de 2005-2006. En effet, au cours des années, partant d'un service hétérogène, clairsemé et majoritairement composé de séances de Travaux Pratiques, j'ai eu à cœur de me construire un service pérenne et équilibré en termes d'heures de CM, TD et TP.



*Recruté en Janvier 2005, je n'ai effectué qu'un 1/2 service à l'URCA pour 2004-2005
 ** Service prévisionnel de l'année 2010-2011 calqué sur l'année 2009-2010

Figure 2 : Charge d'enseignement annuelle depuis 2005

Par ailleurs, bien qu'affecté au département EEA de l'UFR SEN de l'URCA, j'interviens également dans d'autres départements et instituts de l'université, notamment au département Chimie, hôte des Master 1 **GEDD**¹¹, Master 2 **SQHE**¹² et **VGDDE**¹³, ainsi qu'à l'**ESIEC**¹⁴. Comme le montre la figure 3, la répartition de mon service actuel est équilibrée entre ces trois composantes de l'université.

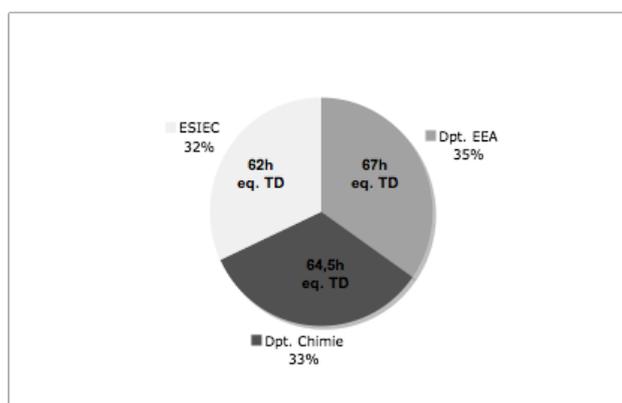


Figure 3 : Répartition de mon service d'enseignement au sein des départements EEA, BCS et de l'ESIEC

Le **management, la gestion et la conduite de projets** ont pris une part importante de mon service d'enseignement. En effet, tirant parti de compétences acquises lors de mes études d'ingénieur, j'ai répondu à un besoin des futurs diplômés des Masters 2 EEA (département EEA), SQHE et VGDDE (Département Chimie) en prenant en charge le montage et l'enseignement de ces disciplines au sein de ces formations **[SP3][SP5]**. Cet enseignement est constitué de CM et de TD traitant des différentes phases d'un projet, allant de l'identification et l'analyse du besoin, l'analyse fonctionnelle, la rédaction d'un cahier des charges, l'évaluation des risques financiers, jusqu'à la planification et le suivi de projet. Par ailleurs, des séances de TP sont assurées par un enseignant extérieur (Frédérique Valentin, MAST) et concernent notamment l'étude d'un cas concret à l'aide du logiciel Microsoft Project.

En 2007, je me suis investi dans le montage d'un module d'enseignement de la **Maintenance Industrielle** au sein d'un nouveau parcours de Master 2 GEII pour l'agro-industrie du département EEA **[SP4]**. Malheureusement, par le jeu des renouvellements de diplômés et la baisse effective du nombre d'étudiants, cet enseignement au sein de cette

¹¹ Génie de l'Environnement et Développement Durable

¹² Sécurité Qualité Hygiène et Environnement

¹³ Valorisation et Gestion des Déchets et de l'Energie

¹⁴ École d'Ingénieurs en Emballage et Conditionnement

formation n'a été dispensé qu'au cours de l'année 2007-2008. C'est alors que, profitant de la création du nouveau Master 1 GEDD, destiné à alimenter le flux d'étudiants des M2 VGDDE et SQHE dans le cadre du LMD, j'ai proposé d'inclure un nouveau module de **Maintenance Industrielle et Sûreté de Fonctionnement [SP6]**. Cet enseignement repose sur des CM et TD. Il traite des grandes familles de la maintenance, des outils de choix des politiques de maintenance, des indicateurs de fiabilité, maintenabilité et disponibilité mais aussi de la gestion des stocks.

Le Master 2 SQHE vise à former des cadres dont l'une des fonctions principales est d'assurer la prévention des risques et la sécurité en milieu industriel (par exemple, chef de service Hygiène et Sécurité). Au sein de cette formation, j'ai pris en charge l'enseignement des **risques mécaniques** traitant essentiellement de la prévention des risques liés à l'évolution d'opérateurs dans un environnement où des corps sont en mouvement [SP7]. Cet enseignement, composé uniquement de CM, permet de sensibiliser les étudiants, à partir de rappels sur la mécanique des corps en mouvements, aux risques de coupure, d'écrasement, de perforations... De plus, les techniques de préventions sont abordées (mise en place de protections fixes ou mobiles, sécurisation de zones de travail, port d'équipements de protections individuels...) mais aussi la mise en place de la **directive machine** pour la conformité des équipements.

Depuis 2005, j'interviens également dans la formation de **L3 Pro MQ2E**¹⁵ (département EEA). Au sein de cette formation, j'enseigne l'**Automatisme et la Supervision**. Cet enseignement forme les étudiants à la programmation par GRAFCET des automates programmables industriels mais aussi à la supervision des systèmes automatisés (Logiciels Wonderware Intouch et Panorama E²). Ce module est composé de CM, TD et TP, dans lesquels des applications à l'automatisation et la supervision de processus industriels sont présentées.

Une autre part importante de mon service, puisqu'elle en représente environ le tiers, concerne l'enseignement de la **logique combinatoire et séquentielle**. Cet enseignement, destiné à un public d'étudiants de première année d'école d'ingénieurs (ESIEC) non-spécialistes des domaines de l'EEA, est composé de CM (assuré par Pascal Vasseur, Maître de conférence à l'ESIEC), de TD et de TP dont j'assume la charge. Les points abordés sont la numération, le codage, l'analyse et la synthèse de systèmes logiques combinatoires et séquentiels.

¹⁵ Maîtrise et Qualité de l'Energie Electrique

Enfin, j'interviens également au sein des formations L3 EEA et M1 EEA (département EEA), pour l'encadrement des TP d'**automatique continue**. Ainsi, en L3, les approches de commande fréquentielles des systèmes linéaires, telles que la commande PID, sont abordées sur maquettes (régulation de température, asservissement de position et vitesse, régulation de niveau d'eau...). En M1, des notions de **commande linéaire dans l'espace d'état** sont traitées (placement de pôles, observabilité, commandabilité...) en simulation sur le logiciel MATLAB SIMULINK.

Le tableau 2 suivant présente de manière synthétique l'ensemble des enseignements dispensés depuis ma prise de fonction en qualité de maître de conférences à l'URCA.

TABLEAU 2 : ENSEIGNEMENTS DISPENSES A REIMS (DEPUIS 2005)

Période	Établissement	Étape	Matière	**Quota horaire (h) / Groupe		
				CM	TD	TP
2005	IUP GEII	2 ^{ème} année (L3)	TP longue durée trans-disciplinaires			50
2005 /2006			Automatique			18
2005 /2006		3 ^{ème} année (Maîtrise)	Étude de cas			12
2005 /2006			Supervision sur réseau d'API			12
2005 /2006			Gestion de projets	8	4	
2005 /2007	IUT de Reims	L3 Pro LIPM	Initiation aux automatismes		2	4
2007 /2008		L3 Pro ST	Initiation à la gestion de projet		4	
2005 /2011	UFR SEN	Lpro MQ2E	*Automatisme et supervision	14	10	18
2005 /2007		L3 EEAI	Systèmes logiques et automatismes	10	11	
2005 /2011			*Automatique continue			18
2005 /2006		M1 EEA	Automate et SED	10	8	
2005 /2007			Automatisation et supervision			18
2005 /2011			*Commande continue dans l'espace d'état			9
2008 /2011		M1 GEDD	*Maintenance et sûreté de fonctionnement	11	6	
2005		DESS EEA	Projet			8
2005 /2011		M2 Pro EEA	*Conduite de projet	8	6	
2005 /2009			Robotique et vision	4	4	
2008 /2009	Commande avancée des systèmes dynamiques		12	6		

2007 /2008		M2 Pro GEII-Agro	Maintenance industrielle	14	6	
2005		M2 Rech. STIC-EEA	Commande floue	7		
2005 /2008		M2 Pro SQHE	Capteurs et instrumentation	2	2	2
2008 /2011			<i>*Conduite et management de projet</i>	8	8	
2008 /2011			<i>*Risques mécaniques et directives machines</i>	8		
2005 /2011	ESIEC	1 ^{ère} année	<i>*Logique combinatoire et séquentielle</i>		8	10

**Enseignements pérennes constituant la majeure partie de mon service actuel (2010-2011).*

***Les quotas horaires sont donnés par groupe de TD-TP, leur charge peut varier d'une année à l'autre selon le nombre d'étudiants inscrits.*

4. Encadrement de stages, projets de fin d'études et d'ingénieurs

4.1. Suivis de stages en entreprise

- A l'URCA : Master Pro EEA (4 de 2005 à 2008), Master Pro SQHE (6 de 2008 à 2010) et M1 GEDD (6 de 2008 à 2010).
- A l'ENSIAME : 11 stagiaires ingénieurs de 2000 à 2004.

4.2. Encadrements de projets universitaires

- A l'URCA : Master PRO SQHE (4 étudiants de 2009 à 2010), DESS EEA (1 projet en 2007), Maîtrise IUP GEII (1 projet en 2006), Licence IUP GEII (3 projets en 2006).
- A l'ISTV-UVHC : M2 Pro TAI, 1 projet en 2004.
- A l'ENSIAME, 4 projets de fin d'études de 2001 à 2004.

III. PARTICIPATIONS A L'ENCADREMENT SCIENTIFIQUE

1. Encadrement de travaux post-doctoraux

- **Madjid Zerar (2006-2008) :**

Titre des travaux: *Suivi de trajectoire par approche H^∞ LFT pour une classe de systèmes non linéaires à entrées exogènes.*

Financement : ATER (recrutement externe, 2006-2007) puis Post-Doc région Champagne-Ardenne (2008),

Encadrement : K. Guelton 50%, N. Manamanni 50%.

Université de Reims Champagne-Ardenne, spécialité Automatique.

Résumé: Les travaux réalisés avec Madjid Zerar ont permis de présenter une nouvelle méthodologie de synthèse de loi commande pour les modèles flous de type Takagi-Sugeno (TS). L'approche proposée permet de déterminer, en utilisant les outils de la synthèse H^∞ et de la représentation LFT (Linear Fractional Transformation), une loi de commande dynamique non linéaire par retour de sortie basée sur la même structure que le modèle non linéaire considéré. Cette loi de commande permet de garantir la stabilité et un niveau de performance acceptable en présence de perturbations et d'erreurs de modélisation. Le problème de synthèse considéré est formulé et résolu en utilisant les outils des Inégalités Matricielles Linéaires (LMIs).

Production scientifiques communes : une revue internationale [RI2], une communication internationale [CI14] et une nationale [CN13].

Origine du candidat : Thèse de l'Université de Bordeaux 1, direction : A. Zolgadri.

Devenir du candidat : Ingénieur Chef de projets R&D, PSA.

2. Encadrements de thèses soutenues

- **Tahar Bouarar (d'octobre 2006 à décembre 2009)**

Titre de la thèse : *Contribution à la synthèse de lois de commande pour les descripteurs de type Takagi-Sugeno incertains et perturbés.*

Financement : Bourse de doctorat du Département des Ardennes,

Encadrement : K. Guelton 50%, N. Manamanni 40%, P. Billaudel 10%.

Thèse de l'Université de Reims Champagne-Ardenne, spécialité Automatique, **soutenue le 8 décembre 2009** devant le jury composé de :

Pr. T.M. Guerra, UVHC-LAMIH, Valenciennes (Rapporteur)

Pr. A. Zolghadri, Université de Bordeaux – IMS (Rapporteur)

Pr. D. Maquin, INPL-CRAN, Nancy (Président du jury)

Pr. F. Delmotte, Université d'Artois – LGI2A, Béthune (Examineur)

Pr. P. Billaudel, URCA-CReSTIC, Reims (Co-directeur)

Dr. K. Guelton, URCA-CReSTIC, Reims (Co-directeur)

Pr. N. Manamanni, URCA-CReSTIC, Reims (Co-directeur)

Résumé: Les travaux de recherche présentés dans cette thèse portent sur la stabilisation des systèmes descripteurs non linéaires représentés par des multi-modèles flous de type Takagi-Sugeno incertains et/ou perturbés. Dans ce cadre, des approches basées sur une fonction candidate quadratique de Lyapunov ont tout d'abord été développées. Celles-ci permettent la synthèse de lois de commande par la résolution d'un ensemble de contraintes LMIs (Inégalités Linéaires Matricielles). Les résultats de ces premières approches restent toutefois pessimistes vis-à-vis de l'ensemble des solutions accessibles au problème de synthèse de lois de commande. Afin de réduire ce conservatisme, de nouvelles approches basées sur une fonction candidate non quadratique de Lyapunov et une loi de commande non PDC (Compensation Parallèle Distribuée) ont été proposées. Une autre source de conservatisme a ensuite été abordée. En effet, l'écriture classique de la dynamique de la boucle fermée introduit des termes croisés entre la commande et le modèle au sein des conditions LMIs à résoudre. L'utilisation de la propriété de redondance des descripteurs a alors permis de palier cette source de conservatisme. En effet, l'écriture redondante de la dynamique de la boucle fermée permet de découpler les matrices du système à piloter de celles des gains de commande par retour d'état. Tirant

parti de cette propriété, des problèmes réputés complexes en termes de formulation LMI ont été traités tels que la synthèse de lois de commande robustes par retour de sortie dynamique et statique pour les systèmes standards de type Takagi-Sugeno incertains et/ou perturbés.

Production scientifique commune : Trois revues internationales [RI10][RI8][RI7], sept communications internationales [CI26][CI24][CI22][CI21][CI20][CI19][CI17] et trois nationales [CN16][CN14][CN12].

Devenir du candidat: ATER URCA (2009-2010) puis **Post-Doc CRAN** (D. Maquin, J. Ragot, 2010-2011).

- **Lynda Seddiki (de février 2005 à octobre 2008)**

Titre de la thèse : *Développement et commande TS d'une machine de rééducation des membres inférieurs en chaîne musculaire fermée.*

Financement : Bourse de doctorat Région Champagne-Ardenne,

Encadrement : K. Guelton 50%, J. Zaytoon 50%.

Thèse de l'Université de Reims Champagne-Ardenne, spécialité Automatique, **soutenue le 28 octobre 2008** devant le jury composé de :

Pr. S. Galichet, EPS-LISTIC, Annecy (Rapporteur)

Pr. P. Poignet, Université de Montpellier-LIRMM (Rapporteur)

Pr. M. Djemai, UVHC-LAMIH, Valenciennes (Président du jury)

Pr. N. Manamanni, URCA-CReSTIC, Reims (Examineur)

Dr. K. Guelton, URCA-CReSTIC, Reims (Co-directeur)

Pr. J. Zaytoon, URCA-CReSTIC, Reims (Directeur)

Mr. J.M. Popot, CRITT-MDTS, Charleville-Mézières (Invité)

Résumé: Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet régional ayant pour objectif la conception et la commande d'une machine de rééducation des membres inférieurs. Le premier chapitre a permis de mettre en évidence les atouts d'une rééducation en chaîne musculaire fermée (CMF). En effet, cette technique de rééducation permet la récupération rapide des fonctions motrices et le renforcement musculaire des membres inférieurs tout en garantissant l'équilibre dynamique des articulations. Le second chapitre présente alors le concept cinématique d'une nouvelle machine de rééducation en CMF ainsi que sa structure de contrôle-commande générique. Le troisième chapitre traite la partie continue

de cette structure de commande afin d'assurer la stabilité en suivi de trajectoire du système robotisé tout en atténuant les efforts de l'utilisateur sur le dispositif. Ainsi, une méthodologie de synthèse de lois de commande non linéaires garantissant la stabilité en suivi de trajectoire pour la classe des multimodèles de type Takagi-Sugeno sous forme descripteur a été proposée. Pour ce faire, des conditions LMIs ont été obtenues sur la base de la théorie de Lyapunov. Le quatrième chapitre traite le générateur de consigne qui permet, quant à lui, la conduite volontaire du dispositif par l'utilisateur via la mesure de ses interactions avec le dispositif de rééducation. La structure de commande est validée en simulation pour le nouveau dispositif Sys-Rééduc et, ce dernier n'étant pas pour l'heure disponible pour des tests en situation réelle, une validation expérimentale a été proposée sur la machine Multi-Iso de rééducation en chaîne musculaire ouverte disponible au CReSTIC.

Production scientifique commune : une revue internationale [RI9], une revue nationale [RN1], un chapitre d'ouvrage [CH1], quatre communications internationales [CI24][CI16][CI12][CI9], deux nationales [CN15][CN11] et deux communications sans actes [AP4][AP3].

Devenir de la candidate : Maître de conférences à l'Université Paris 8 (depuis 2009).

3. Encadrement de thèses en cours

- **Dalel Jabri** (démarée en septembre 2008)

Titre des travaux : *Contributions à la stabilité des modèles de type Takagi Sugeno et/ou hybrides de grandes tailles par approches décentralisés.*

Financement : Bourse CNOUS, Cotutelle ENIGabès (Tunisie) – URCA (France),

Encadrement : K. Guelton 50%, N. Manamanni 45%, M.N. Abdelkrim 5%.

Thèse en cotutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne (France) et de l'ENI Gabès (Tunisie), spécialité Automatique, **soutenance souhaitée fin 2011.**

Résumé des travaux effectués à ce jour: Ces travaux s'intéressent à la classe des systèmes non linéaires de grandes dimensions. Parmi les approches de modélisation des systèmes non linéaires, les modèles flous de type Takagi Sugeno (TS) ont prouvé leur efficacité. Ceux-ci permettent de représenter exactement la dynamique d'un système non linéaire dans un compact de l'espace d'état. Dans un premier temps, on s'intéresse à

l'étude de la stabilisation des systèmes non linéaires flous de type TS de grandes dimensions. Afin de résoudre le problème, le système global est fragmenté en un nombre fini n de sous-systèmes interconnectés. Un ensemble de n contrôleurs non-PDC locaux décentralisés par retour d'état est proposé pour assurer la stabilisation du système global. Les conditions de stabilisation sont données sous forme d'Inégalités Matricielles Linéaires (LMI) par le biais d'une fonction candidate non quadratique de Lyapunov multiple. De plus, afin de minimiser l'effet des interconnexions entre les sous-systèmes, ces conditions sont étendues à l'aide d'un critère H_∞ . Par ailleurs, les approches proposées exigent la mesure en temps réel de toutes les variables d'état. Une extension à la synthèse de contrôleurs décentralisés par retours de sorties statiques est proposée. Pour ce faire, la propriété de redondance des systèmes descripteurs est employée afin d'éviter le couplage entre les matrices d'entrée et les gains de commande à synthétiser. Enfin, parallèlement à l'étude des systèmes TS de grande taille, on s'intéresse à la transposition de ces approches au cas des systèmes linéaires à commutations (SLC) de grande dimension. Ainsi, des travaux préliminaires ont été proposés dans la perspective d'unir les approches TS et SLC pour l'étude des systèmes non linéaires à commutations.

Production scientifique commune : A ce jour, deux revues soumises [RS1][RS5], six communications internationales [CI30][CI29][CI28][CI27][CI25][CI23], trois nationales [CN20][CN18][CN17] et une communications sans acte [AP5].

- **Cuong Duong Chinh (démarée en juin 2010)**

Titre des travaux escomptés : *Approches non quadratiques pour le diagnostic et la commande tolérante aux fautes des systèmes non linéaires et hybrides.*

Financement : Bourse CNOUS, Programme Franco-Vietnamien pour le développement de l'Université de Sciences et Technologies de Hanoï.

Encadrement : K. Guelton 50%, N. Manamanni 50%.

Thèse de l'Université de Reims Champagne-Ardenne, spécialité Automatique, **soutenance souhaitée fin 2013.**

Résumé des travaux effectués à ce jour: L'étudiant étant arrivé en juin 2010 au sein de notre unité, aucun travaux significatifs n'ont pour l'heure été produits. Après une période d'adaptation et de découverte des outils utilisés dans l'équipe, les travaux de Mr Chinh entrent aujourd'hui dans leur phase de recherche bibliographique.

4. Encadrements de Masters recherche et DEA

- **Darius Koumba-Emianiwé (2010)**

Titre : *Approches polynomiales pour l'étude de la stabilité des modèles Takagi-Sugeno.*

Encadrement : K. Guelton 50%, N. Manamanni 50%

Master Modélisation Mathématique pour les Sciences de l'Ingénieur (MMSI), Université de Reims Champagne-Ardenne.

Production scientifique commune : une revue soumise [RS3].

Devenir du candidat : En recherche d'emploi.

- **Abdelhafid Jaadari (2009)**

Titre : *Stabilisation robuste des multi-modèles de type Takagi-Sugeno à commutations.*

Encadrement : K. Guelton 50%, N. Manamanni 50%

Master Recherche STIC-EEA, Université de Reims Champagne-Ardenne.

Production scientifique commune : une revue soumise [RS1] et 2 communications nationales [CI20][CI19].

Devenir du candidat : Thèse de doctorat UVHC en cours, Valenciennes / UPV, Valence (Espagne), Dir. Pr. T.M. Guerra, Pr. A. Sala.

- **Tahar Bouharar (2006)**

Titre : *Stabilité des modèles Takagi-Sugeno incertains sous forme descripteur.*

Encadrement : K. Guelton 50%, N. Manamanni 50%

Master Recherche STIC-EEA, Université de Reims Champagne-Ardenne.

Production scientifique commune : Voir ci-dessus 'Encadrements de thèses'.

Devenir du candidat : Thèse de doctorat URCA puis Post-doc CRAN, Nancy.

- **Aymeric Zingraff (2004)**

Titre : *Réalisation d'un modèle dynamique d'un robot PUMA 560 avec frottements. Mise en œuvre d'un observateur et d'une commande floue sous la forme descripteur.*

Encadrement : K. Guelton 25%, S. Delprat 75%.

D.E.A. d'Automatique et Informatique Industrielle et Humaine, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.

Devenir du candidat : Ingénieur d'essais (Bourges).

- **Ludovic Delporte (2001)**

Titre : *Comparaison de mesures radiographiques et opto-électroniques, vers une évaluation des mobilités du rachis lombaire.*

Encadrement : K. Guelton 33%, A.P. Godillon-Maquinghen 33%, F. Barbier 33%.

D.E.A. de Biomécanique et de Physiologie, Université Paris

Production scientifique commune : une communication internationale [CI4] et deux nationales [CN6][CN5].

Devenir du candidat : Ingénieur biomédical (CHU Lyon).

- **Gaëlle Tessier (2001)**

Titre : *Contribution à la détermination des modes de locomotion chez la jeune fille scoliotique ayant une arthrodèse.*

Encadrement : K. Guelton 33%, A.P. Godillon-Maquinghen 33%, F. Barbier 33%.

Maîtrise de Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives, Université de Valenciennes et D.E.A. de Biomécanique et de Physiologie (Université Paris).

Devenir de la candidate : Professeur des écoles.

IV. ACTIVITES ADMINISTRATIVES ET COLLECTIVES

1. Implications pour la collectivité à l'URCA

- Membre élu du **Conseil Scientifique de l'URCA**, collège maître de conférences, depuis 2009.
- En 2008, participation à la **création d'une liste asyndicale** « Qualité Recherche et Formation » pour les **élections aux conseils centraux de l'URCA**. L'objectif était de défendre le point de vue de la recherche, sans étiquettes politiques ni syndicales, face aux enjeux de la LRU.
- Membre du **Comité Hygiène et Sécurité (CHS)** de l'URCA, depuis 2008.
- Membre élu au **Conseil du département EEA** de l'URCA, représentant du collège B (maître de conférences), pour l'année universitaire 2006-2007.
- Elu **Secrétaire du Conseil du département EEA** de l'URCA, pour l'année universitaire 2006-2007.

2. Implication pour la collectivité hors URCA

- **Membre du comité de sélection (COS)** 61ème section du CNU, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis (UVHC), 2009, 2010.
- **Membre du comité de sélection (COS)** 61ème section du CNU, Université de Picardie Jules Verne (UPJV), Amiens, 2009, 2010.
- **Membre titulaire de la commission de spécialistes (CSE)** 61ème section du CNU, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis (UVHC), de 2006 à 2008.
- **Correspondant du CReSTIC** au **GDR STIC-Santé**, CNRS/INSERM, de 2006 à 2009.

5. Implications et prises de responsabilités pédagogiques à l'URCA

- Depuis 2008, je suis **Co-Responsable** (avec Abdel Chakir, MCF Chimie), du **Master 1 GEDD** (Gestion de l'environnement et développement durable) de l'URCA. Cette première année de master a été créée afin d'harmoniser l'offre de formation de l'URCA dans la mise en place du LMD pour les M2 SQHE et VGDDE (Anciennement DESS SQHE) du département Chimie. Dans ce cadre, j'ai participé à la rédaction de la maquette (**notée A** par l'AERES pour une création en 2008). Mes tâches de gestion de ce master concernent principalement la sélection des nouveaux entrants, le choix et le suivi des intervenants extérieurs, les suivis de stages et l'organisation des jurys.
- **Membre des commissions VAP-VAE** des Master SQHE et VGDDE de l'URCA (depuis 2008)
- **Co-responsable** (avec N. Massai, MCF automatique) de la **salle de TP d'automatique** du **département EEA** de l'URCA (depuis 2006).
- **Responsable** des modules d'enseignement de **risques physiques et applications** et de **conduite et management de projets** des M2 SQHE et VGDDE, URCA (depuis 2008).
- **Responsable** du module d'enseignement de **maintenance et sûreté de fonctionnement** du M1 GEDD, URCA (depuis 2008).
- **Responsable** des modules d'enseignement de **robotique**, de **conduite de projets** et de **Maintenance** du M2 EEA, URCA, (depuis 2005).
- Participation, en 2005, à l'**élaboration d'un projet d'école d'ingénieurs** en systèmes embarqués et génie biomédical, Centre Polytechnique Universitaire de Reims (ce dossier a été classé sans suite).

3. Activités extra-universitaires

La prise de responsabilité collective peut ne pas se limiter au seul milieu universitaire et pour autant constituer une expérience enrichissante. Ainsi, je présente ici mes implications au sein d'associations et actions culturelles. Musicien amateur (Piano, guitare), j'ai participé à plusieurs formations pop/rock et jazz ainsi qu'à quelques actions culturelles auxquelles je suis sensible.

- **Président de la compagnie de théâtre « Arsis-Fabrica »**, Reims (51), depuis 2009.

Cette compagnie, régie par une association loi 1901, est centrée sur le travail d'une comédienne (Nathalie Azam) et d'un musicien (Nicolas Canot). Elle propose des spectacles de lecture-concert. Création 2009 « Emmerger lentement de la chaire », création 2010 « Panique ». <http://www.arsis-fabrica.org>

- **Trésorier et Administrateur du CMA**, Centre des Musiques Actuelles, Valenciennes (59), de 2002 à 2005.

Le CMA est une école de musique gérée par une association loi 1901. Elle assure une formation qualifiante de musicien professionnel dans le domaine des musiques actuelles. <http://www.cma-musique.org>

- **Membre fondateur du BAL**, Barouf Acoustic Light, Lille (59), de 2002 à 2004.

Le BAL était l'occasion d'écouter des jeunes talents de la scène Lilloise simplement accompagné par des instruments acoustiques. Dans le cadre de cette action culturelle, nous avons organisé des concerts-rencontres quasi mensuels de 2002 à 2004. <http://www.baroufacoustic.fr.st>

- **Membre de l'équipe d'organisation du festival « L'été de Vaour »**, Festival de théâtre burlesque à Vaour, Tarn (81), depuis 1992.

Au sein de cette association et pendant le festival (première quinzaine d'août), je participe essentiellement au montage des infrastructures (gradins, scènes...), ainsi qu'à la recherche de mécénats particuliers. <http://www.etedevaour.org>

V. RAYONNEMENT ET AUTRES PARTICIPATIONS A LA RECHERCHE

1. Participations à des contrats et projets de recherche

- Participation au projet du **CPER Sys-Rééduc** (novembre 2004 - février 2007, porteur J. Zaytoon, montant total 421 k€). « *Développement et commande d'un système de rééducation des membres inférieurs et d'aide à l'amélioration de gestes sportifs* ». Dans le cadre de ce projet, j'avais en charge la **coordination des partenaires** (CReSTIC, LACM, CRiTT-MDTS), l'**organisation des réunions** de travail et le **suivi du projet**.
- **Porteur d'un contrat de partenariat scientifique** CReSTIC-URCA / LMS-CNRS (Poitiers) (2007, montant 9 K€). « *Instrumentation d'un dispositif d'évaluation et de rééducation* ». L'objectif de ce contrat était la conception, la réalisation, et l'évaluation de capteurs spécifiques pour la mesure d'efforts articulaires en temps réel. Ce projet s'inscrit en marge et de manière complémentaire au CPER Sys-Rééduc.
- Participation au projet **COSMOS** du **GIS 3SGS** (2008, porteur J. Ragot, montant total 59 k€). « *Conception et Observation de Systèmes à MOdes multiples de fonctionnement Sûrs* ». Projet fédérateur CRAN-UHP (Nancy), CReSTIC-URCA (Reims), LAGIS-USTL (Lille) et ICD-UTT (Troyes).
- Participation au projet **COSMOS II** du **GIS 3SGS** (2009-2010, porteur N. Manamanni, montant total 182 k€). « *Contrôle et Observation des Systèmes à MOdes multiples de fonctionnement Sûrs* ». Projet fédérateur CReSTIC-URCA (Reims), CRAN-UHP (Nancy), LAGIS-USTL (Lille). Ce projet fait suite au projet COSMOS décrit ci-dessus.
- Participation au projet du **CPER MOSYP** (2008-2011, porteur A. Hamzaoui, montant total 300 k€), « *Mesures des performances et Optimisation des SYstèmes de Production* ». Tâches conception/modélisation et diagnostic.

2. Collaborations scientifiques hors CReSTIC

2.1. Collaborations internationales

- **Bosch Rexroth A.G.**, Hydraulics Research division, Elchingen, Allemagne. **Pr Horst Schulte**, *Commande de robots manipulateurs basée sur une modélisation floue Takagi-Sugeno sous forme descripteur*, une revue internationale [RI6] et une conférence internationale [CI14]. (H. Schulte est aujourd'hui Professeur à l'**Université Nouvelle de Berlin**).
- **Universidad de Guadalajara**, Mexique. **Dr Miguel Bernal**, *Commande non quadratique des modèles TS*, une revue internationale [RI8] + une soumise [RS2] et une conférence nationale [CN19].
- **Hopital Sainte-Justine, Ecole Polytechnique de Montréal**, QC, Canada. **Pr Paul Allard**, *Modélisation et analyse de la stabilité posturale*, une revue internationale [RI1], trois conférences internationales [CI3][CI2][CI1], trois conférences nationales [CN5][CN4][CN2].

2.2. Collaborations nationales

- **LAMIH CNRS FRE 3304**, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis. **Pr Thierry-Marie Guerra, Pr Mohamed Djemaï, Dr Sébastien Delprat**, *Modélisation, commande et observation des systèmes TS et hybrides*, quatre revues internationales [RI8][RI5][RI4][RI3], une revue soumise [RS2], plusieurs conférences internationales [CI18][CI15][CI11][CI7][CI6][CI5] et nationales [CN19][CN10][CN8].
- **LAGIS CNRS FRE 3303**, Ecole Centrale de Lille. **Dr. Alexandre Kruszewski**, *Commande des systèmes TS par retour de sortie*, une revue internationale [RI5], une conférence internationale [CI18] et une nationale [CN10].
- **Centre de rééducation « La rougeville »**, Saint-Saulve (59). **Dr Sébastien Leteneur**, *Formalisation technique de besoins en rééducation fonctionnelle*, une conférence internationale [CI16] et deux nationales [CF2][CF11].

- **Centre de l'Arche**, Saint-Saturnin, France. **Dr Yannick Delpierre**, *Analyse du mouvement de l'articulation du genou lors de la marche des enfant Infirmes Moteurs Cérébraux*, un article dans un congrès international [CI9]
- **LACMDTI EA 4302**, Université de Reims Champagne-Ardenne, **Pr Redha Taïar**, *Modélisation dynamique pour l'analyse du mouvement sportif*, une conférence internationale [CI11].
- **CRITT-MDTS**, Charleville-Mézières, **Mathieu Smagghe, Jean-Marc Popot**, *Réalisation d'une machine de rééducation en chaîne musculaire fermée*.

3. Membre de comités internationaux de programme (IPC) dans des conférences

- **ICINCO-2011**, 8th International Conférence on Informatics in Control, Automation and Robotics (IEEE-IFAC), Noordwijkerhout, Netherlands, 28-31 Juillet 2011.
- **IEEE CICA 2011**, Symposium on Computational Intelligence in Control and Automation, Paris, France, 11-15 Avril 2011.
- **NABIC 2010**, World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing, Coimbatore (IEEE), Kitakyushu (Japan), 15-17 Décembre 2010.
- **SoCPaR 2010**, International Conférence on Soft Computing and Pattern Recognition (IEEE), Cergy-Pontoise, France, 7-10 Décembre 2010.
- **ICINCO-2010**, 7th International Conférence on Informatics in Control, Automation and Robotics (IEEE-IFAC), Funchal, Madeira, Portugal, 15-18 Juin 2010.
- **INC-2009**, International Symposium on Innovations In Natural Computing (IEEE), Cochin, India, 12-13 Décembre 2009.
- **NABIC 2009**, World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing, Coimbatore (IEEE), India, 9-11 Décembre 2009.
- **SoCPaR 2009**, International Conférence on Soft Computing and Pattern Recognition (IEEE), Malacca, Malaisia, 4-7 Décembre 2009.
- **IFAC MCBMS'09**, 7th IFAC Symposium on Modelling and Control in Biomedical Systems, Aalborg, Denmark, 12-14 août, 2009.

- **IEEE CICA 2009**, Symposium on Computational Intelligence in Control and Automation, Nashville, Tennessee, USA 30 Mars – 2 Avril 2009.
- **FUZZ-IEEE'08**, International Conference on Fuzzy Systems, Hong-Kong, Chine, 1-7 Juin 2008, **membre du comité « special session »** et **membre du comité technique**.
- **IFAC MCBMS'06**, 6th IFAC Symposium on Modelling and Control in Biomedical Systems, Reims, France, 120-22 septembre 2006.

4. Membre de comités d'organisations (NOC) dans des conférences

- **WS3SGS 2010**, Workshop du GIS Surveillance, Sûreté et Sécurité des Grands Systèmes, Reims, 29-30 septembre 2010.
- **JD-JN-MACS 2007**, 2èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS, Reims, France, 9-11 juillet 2007.
- **IFAC MCBMS'06**, 6th IFAC Symposium on Modelling and Control in Biomedical Systems, Reims, France, 120-22 septembre 2006. **Vice-président du comité d'organisation**.
- **IFAC CHAOS'06**, 1st IFAC Conference on Analysis and Control of Chaotic Systems, Reims, France, 28-30 juin 2006.

5. Organisation, modération de sessions spéciales et journées scientifiques

- **IEEE CICA 2009**, Modérateur de la session « *Fuzzy System Modelling and Control* ».
- **FUZZ-IEEE 2008**, Co-organisateur et modérateur de la session spéciale « *Recent results in control and observation using Takagi-Sugeno models* » (K. Guelton, T.M. Guerra).
- **LFA 2007**, Modérateur de la session « *commande floue* », novembre 2007, Nîmes, France,
- **IEEE CCA'06**, Modérateur de la session « *Human Centered Application II* » (M. Buss, K. Guelton).

- **GDR STIC-Santé**, Organisateur d'une journée d'étude « *Thème E : Méthodes et dispositifs biomédicaux d'entraînement, d'évaluation et de rééducation* », (K. Guelton et L. Afilal), 17 Novembre 2005, Paris, France.

6. Participation à des jurys de thèses

- « **Deputy member** » du jury de thèse de **M. C.V. Arino-Latorre**, 14 janvier 2008, Université Polytechnique de Valence, Espagne, Directeur : Pr. Antonio Sala.
- **Examineur** (Co-encadrant) de la thèse de **Melle L. Seddiki**, 28 Octobre 2008, Université de Reims Champagne-Ardennes.
- **Examineur** (Co-encadrant) de la thèse de **M. T. Bouarar**, 8 Décembre 2009, Université de Reims Champagne-Ardenne.

7. Participation à des communautés scientifiques

- **Représentant Français** au comité technique "TC-8.2. Modelling & Control of Biomedical Systems" de l'**IFAC** "International Federation of Automatic Control" (depuis 2005).
- Membre du "IEEE Haptics technical committee" (depuis 2007).
- Membre du **GDR MACS**, CNRS, "Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes dynamiques".
- Membre du **GDR STIC-Santé**, CNRS INSERM., **Correspondant pour le CReSTIC** de 2005 à 2010.
- Membre du **GDR ISIS**, CNRS, **Correspondant pour le CReSTIC** de 2005 à 2010.
- Membre du **GDR Robotique**.
- Membre du **GRAISyHM** - "Groupement de Recherche en Automatisation Intégrée et Systèmes Homme-Machine" (2000 – 2005).
- Membre de l'**IRRH** - "Institut Régional de Recherche sur le Handicap" (2000 – 2005).

- Membre **IEEE**, Control Systems Society (**CSS**), Computational Intelligence Society (**CIS**) et Systems Man and Cybernetics Society (**SMC**) (depuis 2006).

8. Activités de relecture d'articles (reviewing)

- **Évaluations d'articles pour des revues internationales** : Fuzzy Sets and Systems, Automatica, IEEE Trans. Fuzzy Systems, Control Engineering Practice, Int. J. Robust Nonlinear Control, Int. J. System Sciences, IEEE Trans. BioMed. Eng., Control and Intelligent Systems, IEEE Sensor Journal...
- **Évaluations d'articles pour des conférences internationales et nationales** : IEEE WCCI'10'08, FUZZ-IEEE'07'09, IEEE CDC'08'09, ECC'07, IEEE CCA'07, IFAC MCBMS'09'06, IEEE CIFA'10'08'06, JDMACS'05...

VI. BIBLIOGRAPHIE PERSONNELLE

Bilan quantitatif

Revue internationale (RI)	10 (+ 5 soumissions)
Revue nationale (RN)	1
Chapitre d'ouvrage (CH)	1
Direction d'ouvrage (DO)	1
Conférences internationales (CI)	30
Conférences nationales (CN)	20
Autres participations à la recherche (AP)	5
Rapports et mémoires de recherche (RA)	4
Supports pédagogiques (SP)	7

*Publications antérieures à ma prise de fonction en qualité de MCF à l'URCA

4. Revue Internationale

- RI10 **T. Bouarar, K. Guelton, N. Manamanni**, *Robust Fuzzy Lyapunov Stabilization for uncertain and disturbed Takagi-Sugeno Descriptors*, ISA Transactions, 49(4):447-461, 2010. (IF 2009 : 1.00)
- RI9 **L. Seddiki, K. Guelton, J. Zaytoon**, *Concept and T-S tracking controller design of a CMC lower-limb rehabilitation device*, IET Control Theory & Applications, 4(8) :1407-1420, 2010. (IF 2009 : 1.717)
- RI8 **K. Guelton, T.M. Guerra, M. Bernal, T. Bouarar, N. Manamanni**, *Comments on Fuzzy Control Systems Design via Fuzzy Lyapunov Functions*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics – Part B, Vol. 40, No 3, pp. 970-972, 2010. (IF 2009 : 3.007)
- RI7 **K. Guelton, T. Bouarar, N. Manamanni**, *Robust dynamic output feedback fuzzy Lyapunov stabilization of Takagi-Sugeno systems – A descriptor redundancy approach*, Fuzzy Sets and Systems, 160(19):2796-2811, 2009. (IF 2009: 2.138)
- RI6 **H. Schulte, K. Guelton**, *Descriptor modelling toward control of two links pneumatic robot manipulator: a T-S multimodel approach*, Nonlinear Analysis: hybrid systems, 3(2):124-132, 2009. (IF 2009 : N.C.)
- RI5 **B. Mansouri, N. Manamanni, K. Guelton, A. Kruszewski, T.M. Guerra**, *Output feedback LMI tracking control conditions with H_∞ criterion for uncertain and disturbed TS models*, Information Sciences, 179(4) :446-457, 2009. (IF 2009 : 3.291)
- RI4 **B. Mansouri, N. Manamanni, K. Guelton, M. Djemai**, *Robust pole placement controller design in LMI region for uncertain and disturbed switched systems*, Nonlinear analysis: hybrid systems, 2(4):1136-1143, 2008. (IF 2009 : N.C.)
- RI3 **K. Guelton, S. Delprat, T.M. Guerra**, *An alternative to inverse dynamics joint torques estimation in human stance based on a Takagi-Sugeno unknown inputs observer in the descriptor form*, Control Engineering and Practice, 16(12):1414-1426, 2009. (IF 2010 : 1.943)

RI2 **M. Zerar, K. Guelton, N. Manamanni**, *Linear Fractional Transformation based H-infinity output stabilization for Takagi-Sugeno fuzzy models*, Mediterranean Journal of Measurement and Control, 4(3):111-121, 2008. (IF 2009 : N.C.)

*RI1 **F. Barbier, P. Allard, K. Guelton, B. Colobert, A.P. Godillon-Maquinghen**, *Estimation of the 3D center of mass excursion from force plate data during standing*, IEEE Transactions on Neural Systems & Rehabilitation Engineering, 11(1) :31-37, 2003. (IF 2009 : 2.417)

Revues internationales soumises:

RS5 **D. Jabri, N. Manamanni, K. Guelton**, *Decentralized stabilization of continuous and discrete time large scale switched systems.*

RS4 **T. Bouarar, K. Guelton, N. Manamanni**, *Robust non-quadratic static output feedback controller design for Takagi-Sugeno systems – A redundancy approach*

RS3 **K. Guelton, N. Manamanni, D.L. Koumba-Emianiwe**, *Sum-of-square based stability analysis of polynomial fuzzy systems - A new polynomial fuzzy Lyapunov approach*

RS2 **T.M. Guerra, M. Bernal, K. Guelton, S. Labiod**, *Non-quadratic local stabilization for continuous-time Takagi-Sugeno models.*

RS1 **D. Jabri, K. Guelton, N. Manamanni, A. Jaadari**, *Robust stabilization of nonlinear systems based on a switched fuzzy control law.*

5. Revues Nationales

RN1 **L. Seddiki, K. Guelton, S. Moughamir, B. Mansouri, J. Zaytoon**, *Modélisation T-S et commande H-infinie d'une machine de rééducation des membres inférieurs*, RS-JESA, Journal Européen des Systèmes Automatisés, Vol. 41, pp. 199-219, 2007.

6. Chapitre d'ouvrage

CH1 **L. Seddiki, K. Guelton, J. Zaytoon**, *Suivi de trajectoire d'un dispositif de rééducation des membres inférieurs - approche multimodèles*, Automatique et Informatique Appliquée, éditions de l'Académie Roumaine, sélection CIFA 2008, 2009.

7. Direction d'ouvrage

DO1 **N. Manamanni, M.S. Sayed-Mouchaweh, N. Messaï, K. Guelton**, *Actes du 3^{ème} Workshop du GIS 3SGS, REIMS, W3SGS'10, 29-30 septembre 2010.*

8. Conférences internationales

CI30 **D. Jabri, K. Guelton, N. Manamanni**, *Decentralized Static Output Feedback Control of Interconnected Fuzzy Descriptors*, 2010 IEEE Multi-conference on Systems and Control, Yokohama, Japan, Septembre 8-10, 2010.

- CI29 **K. Guelton, N. Manamanni, D. Jabri**, *Decentralized static output feedback controller design with H_∞ analysis for large scale Takagi-Sugeno systems*, FUZZ-IEEE 2010, International Conference on Fuzzy Systems, Barcelona, Spain, juillet 18-23, 2010.
- CI28 **D. Jabri, K. Guelton, N. Manamanni, M.N. Abdelkrim**, *Decentralized stabilization of discrete-time large scale switched systems*, IEEE MED 2010, 18th Mediterranean Conference on Control and Automation, Marrakech, Maroc, juin 23-25, 2010.
- CI27 **D. Jabri, K. Guelton, N. Manamanni, M.N. Abdelkrim**, *Decentralized stabilization of interconnected Takagi-Sugeno descriptors under external disturbances*, STA'09, 10th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control & Computer Engineering, Hammamet, Tunisia, December 20-22, 2009.
- CI26 **T. Bouarar, K. Guelton, N. Manamanni**, *Static output feedback controller design for Takagi-Sugeno systems – A fuzzy Lyapunov LMI approach*, CDC'09, 48th IEEE Conference on Decision and Control, Shanghai, P.R. China, December 16-18, 2009.
- CI25 **D. Jabri, K. Guelton, N. Manamanni, M.N. Abdelkrim**, *H_∞ based decentralized fuzzy Lyapunov controller design for Takagi-Sugeno interconnected descriptors*, IFAC ICONS 2009, 2nd IFAC International Conference on Intelligent Control Systems and Signal Processing, Istanbul, Turkey, September 21-23, 2009.
- CI24 **L. Seddiki, K. Guelton, T. Bouarar, N. Manamanni, J. Zaytoon**, *T-S Tracking Controller Design for Sys-Reeduc: a Descriptor Approach*, IFAC MCBMS 2009, 7th IFAC Symposium on Modelling and Control in Biomedical Systems, Aalborg, Denmark, August 12-14, 2009.
- CI23 **D. Jabri, K. Guelton, N. Manamanni, M.N. Abdelkrim**, *Stabilization of uncertain Takagi-Sugeno descriptors: a fuzzy Lyapunov approach*, IEEE CICA'2009, IEEE Symposium on Computational Intelligence in Control and Automation, Nashville, Tennessee, USA, March 30 - April 2, 2009.
- CI22 **T. Bouarar, K. Guelton, N. Manamanni**, *Redundancy approach for fuzzy Lyapunov stabilization of Takagi-Sugeno descriptors*, IEEE CICA'2009, IEEE Symposium on Computational Intelligence in Control and Automation, Nashville, Tennessee, USA, March 30 - April 2, 2009.
- CI21 **T. Bouarar, K. Guelton, N. Manamanni**, *Stabilization of uncertain Takagi-Sugeno descriptors: a fuzzy Lyapunov approach*, IEEE MED08, 16th Mediterranean Conference on Control and Automation, Ajaccio, June 25-27, 2008.
- CI20 **K. Guelton, T. Bouarar, N. Manamanni**, *Fuzzy Lyapunov LMI based output feedback stabilization of Takagi Sugeno systems based on descriptor redundancy*, IEEE WCCI 2008 / FUZZ 2008, International Conference on Fuzzy Systems, Hong Kong, June 1-8, 2008.
- CI19 **T. Bouarar, K. Guelton, N. Manamanni**, *LMI based H-infinity controller design for uncertain Takagi-Sugeno descriptors subject to external disturbances*, IFAC AFNC 2007, 3rd IFAC Workshop on Advanced Fuzzy/Neural Control, Valenciennes, France, November 2007.
- CI18 **B. Mansouri, A. Kruszewski, K. Guelton, N. Manamanni, T.M. Guerra**, *Sub-optimal tracking control for uncertain T-S fuzzy models*, IFAC AFNC 2007, 3rd IFAC Workshop on Advanced Fuzzy/Neural Control, Valenciennes, France, November 2007.
- CI17 **T. Bouarar, K. Guelton, B. Mansouri, N. Manamanni**, *LMI Stability Conditions for Takagi-Sugeno Uncertain Descriptors*, FUZZ-IEEE, International Conference on Fuzzy Systems, London, UK, July 23-26 2007.
- CI16 **L. Seddiki, K. Guelton, S. Leteneur, J. Zaytoon**, *Concept and simulation of "Sys-Réeduc": closed muscular chain lower limbs rehabilitation device*, IEEE ICORR'07, 10th International Conference on Rehabilitation Robotics, Noordwijk, Netherlands, 13-15 June 2007

- CI15 **B. Mansouri, N. Manamanni, K. Guelton, M. Djemai**, *LMI approach for robust control of linear uncertain switched system*, CSC'07, Conference on Systems and Control, Marrakech, Morocco , May 16-18, 2007.
- CI14 **Zerar, M., K. Guelton, N. Manamanni**, *Fuzzy T-S model stabilization by LFT approach*, CSC'07, Conference on Systems and Control, Marrakech, Morocco , May 16-18, 2007.
- CI13 **H. Schulte, K. Guelton**, *Modelling and simulation of two-link robot manipulators based on Takagi Sugeno fuzzy descriptor systems*, IEEE ICIT, International Conference on Industrial Technology, Mumbai, India, December 15-17, 2006.
- CI12 **L. Seddiki, K. Guelton, B. Mansouri, J. Zaytoon**, *H^∞ Takagi-Sugeno fuzzy control of a lower limbs rehabilitation device*, IEEE CCA, International Conference on Control Applications, Munich, Germany, October 4-6, 2006.
- CI11 **K. Guelton, S. Delprat, T.M. Guerra**, *Joint torques estimation in standing human by mean of a fuzzy descriptor unknown inputs observer*, 6th IFAC Symposium on Modelling and Control in Biomedical Systems, MCBMS'06, Reims, France, September 20-22 2006.
- CI10 **G. Agnesina, R. Taiar, N. Houel, K. Guelton, P. Hellard, Y. Toshev**, *BRG.LifeMODTM modeling and simulation of swimmers impulse during a grab start*, 9th International Symposium On 3D Analysis Of Human Movement, Valenciennes, France, June 28-30, 2006.
- CI9 **L. Seddiki, K. Guelton, L. Afilal, J. Zaytoon**, *A 6 degrees of freedom kinematical model of the knee for the design of a new rehabilitation device*, 3rd IFMBE European Medical and Biological Engineering Conference EMBEC'05, Prague, Czech Republic, November20-25, 2005.
- CI8 **Y. Delpiere, E. Kolanowski, P. Filipetti, K. Guelton**, *The knee kinematical coordination investigation of an IMC child during gait*, 3rd IFMBE European Medical and Biological Engineering Conference EMBEC'05, Prague, Czech Republic, November20-25, 2005.
- *CI7 **T.M. Guerra, K. Guelton, S. Delprat**, *A class of nonlinear observers in descriptor form: LMI based design with application in biomechanics*, 2nd IFAC Workshop on Advanced Fuzzy/Neural Control, Oulu, Finlande, 16-17 Septembre 2004.
- *CI6 **T.M. Guerra, K. Guelton, S. Delprat**, *LMI based design for a class of nonlinear observers*, IAR-Workshop on Advanced Control and Diagnosis, Duisburg, Germany, p149-154, 26-27 November 2003
- *CI5 **K. Guelton, S. Delprat, F. Barbier, T.M. Guerra, S. Armand, F.X. Lepoutre**, *Global optimization of a double inverted pendulum model for the ankle and hip joint torques Estimation in standing*, 12th ESMAC Congress", European Society of Movement Analysis for Adults and Children. Marseille, France, 10-13 Septembre, Gait & Posture (sous presse) p22., 2003
- *CI4 **Guelton K., A.P. Godillon-Maquinghen, G. Polle, L. Delporte, F. Barbier, F.X. Lepoutre**, *Algorithme d'auto calibrage pour la reconstruction 3D à partir de radiographies orthogonales*, 4th Modelling & Simulation for Computer-aided Medicine and Surgery, INRIA Rocquencourt 12 - 15 Novembre 2002
- *CI3 **F. Barbier, K. Guelton, B. Colobert, S. Armand, C. Gillet, P. Allard**, *Estimation of the center of mass displacement in quiet standing by means of a 3D biomechanical model*, Sixth International Symposium on 3-D Analysis of Human Movement, p5-9, Le Cap, Afrique du Sud, 2000
- *CI2 **B. Colobert, S. Armand, F. Barbier, K. Guelton, C. Gillet, O. Caron, P. Allard**, *A 3D model for the estimation of the center of mass displacement in orthostatique posture*, Proceedings of the Congrès conjoint de la Société de Biomécanique et de la Société Canadienne de Biomécanique. Montréal, Canada, August 2000, Archives of Physiology and Biochemistry, Vol 108 (1-2), p206
- *CI1 **B. Colobert, S. Armand, K. Guelton, P. Allard, F. Barbier**, *Variation de la hauteur du centre de masse et son influence sur les angles caractérisant son déplacement dans l'espace*, ACFAS. Montréal, P.Q., Canada, 2000.

9. Conférences nationales

- CN20 **D. Jabri, A. Jaadari, K. Guelton, N. Manamanni**, *Stabilisation robuste des systèmes Takagi-Sugeno par lois de commande à commutations*, CIFA 2010, 6ème Conférence Internationale Francophone d'Automatique. Nancy, 2-4 juin 2010.
- CN19 **T.M. Guerra, M. Bernal, A., A. Jaadari, K. Guelton**, *Stabilisation non quadratique locale pour des modèles continus de type Takagi-Sugeno*, CIFA 2010, 6ème Conférence Internationale Francophone d'Automatique. Nancy, 2-4 juin 2010.
- CN18 **D. Jabri, K. Guelton, N. Manamanni, M.N. Abdelkrim**, *Synthèse non quadratique H_∞ de contrôleurs décentralisés pour un ensemble de descripteurs flous T-S interconnectés*, LFA 2009, Rencontres francophones sur la Logique Floue et ses Applications, Annecy, Novembre 2009.
- CN17 **D. Jabri, K. Guelton, N. Manamanni**, *Stabilisation des systèmes descripteurs Interconnectés de type Takagi-Sugeno*, Workshop GIS 3SGS 2009, Surveillance, Sécurité et Sécurité des Grands Systèmes, Nancy, 3-4 juin 2009.
- CN16 **T. Bouarar, K. Guelton, N. Manamanni**, *Nouvelles conditions LMI de stabilisation non quadratique pour descripteurs flous de type T-S*, LFA 2008, Rencontres francophones sur la Logique Floue et ses Applications, Lens, 16-17 Octobre 2008.
- CN15 **L. Seddiki, K. Guelton, J. Zaytoon**, *Suivi de trajectoire d'un dispositif de rééducation des membres inférieurs*, CIFA 2008, 5ème Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Bucarest, Roumanie, September 3-5 2008.
- CN14 **T. Bouarar, K. Guelton, N. Manamanni**, *Approches non-quadratiques pour la synthèse de commande robuste des descripteurs flous de type T-S*, CIFA 2008, 5ème Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Bucarest, Roumanie, September 3-5 2008.
- CN13 **M. Zerar, K. Guelton, N. Manamanni**, *Fuzzy T-S model stabilization by LFT approach*, LFA 2007, Rencontres francophones sur la Logique Floue et ses Applications, Nîmes, Octobre 2007.
- CN12 **T. Bouarar, K. Guelton, B. Mansouri, N. Manamanni**, *Conditions de stabilité LMI pour la classe des systèmes descripteurs flous incertains de type T-S*, 2^{èmes} Journées Doctorales / Journées Nationales MACS, Reims, 9-11 Juillet 2007.
- CN11 **L. Seddiki, K. Guelton, B. Mansouri, J. Zaytoon**, *Commande H infinie d'une machine de rééducation des membres inférieurs basée sur une modélisation floue TS*, LFA 2006, Rencontres francophones sur la Logique Floue et ses Applications, Toulouse, 19-20 Octobre 2006.
- CN10 **B. Mansouri, A. Kruszewski, K. Guelton, N. Manamanni, T.M. Guerra**, *Commande sous optimale pour le suivi de trajectoires des modèles flous TS incertains*, LFA 2006, Rencontres francophones sur la Logique Floue et ses Applications, Toulouse, 19-20 Octobre 2006.
- CN9 **L. Afilal, K. Guelton, N. Manamanni, S. Moughamir, J. Zaytoon**, *Systèmes d'évaluations et d'entraînements sportifs embarqués*, 2ème Congrès du Réseau Français d'Ingénieries du Sport, Valenciennes, France, June 23-24 2005.
- *CN8 **K. Guelton, T.M. Guerra, S. Delprat**, *Convergence d'observateurs flous sous formes descripteurs : application à l'homme en station debout*, IEEE Conférence Internationale Francophone d'Automatique CIFA04, Douz, Tunisie, 22-24 Novembre 2004.
- *CN7 **P. Carette, A. Pinti, K. Guelton, P. Hedoux, V. Durlent**, *Evolution of hemiplegics patients' postural stability parameters during functional rehabilitation*, Congrès de la Société de Biomécanique, Poitiers, France, Septembre 2003, Archives of Physiology and Biochemistry, vol. 111: p30.

- *CN6 **K. Guelton, C. Gillet, L. Delporte, F. Barbier, F.X. Lepoutre**, *An easy method to determine the centre of gravity of some lifeless body with a motion analysis system*, Congrès de la Société de Biomécanique". Valenciennes, France, Septembre 2002, Archives of Physiology and Biochemistry, vol. 110: p90.
- *CN5 **C. Gillet, K. Guelton, L. Delporte, F. Barbier, N. Belluye, F.X. Lepoutre, P. Allard**, *Determination of backpack role in locomotion during clearing obstacles*, Congrès de la Société de Biomécanique. Valenciennes, France, Septembre 2002, Archives of Physiology and Biochemistry, vol. 110: p97.
- *CN4 **B. Colobert, P. Allard, F. Barbier, K. Guelton**, *Stratégie à la hanche ou à la cheville calculée par modèle en double pendule inversé*, ACAPS, Valence, France, Novembre 2001
- *CN3 **K. Guelton, C. Gillet**, *Détermination du centre de gravité d'un corps inerte de géométrie irrégulière et de répartition massique quelconque -Application au sac à dos*, Troisième Symposium Etudiant sur la Biomécanique et la Physiologie des APS. Valenciennes Mai 2001
- *CN2 **K. Guelton, F. Barbier, S. Armand, S. Leteneur, P. Allard**, *Proposition d'un modèle permettant la détermination en temps réel de la position du centre de gravité application à la rééducation*, Institut Régional sur le Handicap, Région Nord-Pas-de-Calais, 17 novembre, 2000.
- *CN1 **K. Guelton**, *Modèle dynamique tridimensionnel pour le calcul du centre de gravité de l'homme en posture orthostatique*, Deuxième Symposium Etudiant sur la Biomécanique et la Physiologie des APS, Valenciennes, Mai 2000

10. Autres participations à la recherche

- AP5 **K. Guelton, D. Jabri, N. Manamanni**, *Commande décentralisée par retours de sorties statiques pour systèmes Takagi-Sugeno de grande taille et/ou interconnectés*, Réunion COSMOS2 du GIS 3SGS. Paris, mai 2010.
- AP4 **L. Seddiki, K. Guelton, J. Zaytoon**, *Développement et commande d'une machine de rééducation des membres inférieurs en chaîne musculaire fermée*, Journée conjointe GT1 et GT6 du GDR Robotique: Conception et robotique médicale. Paris, 7 juillet 2008.
- AP3 **L. Seddiki, K. Guelton, L. Afilal, N. Manamanni, S. Moughamir, J. Zaytoon**, *Modélisation et commande d'une machine de rééducation des membres inférieurs en chaîne musculaire fermée*, Journée « Modélisation et Simulation pour le Handicap » de l'IFRATH (Institut Fédératif de Recherche sur les Aides Techniques pour personnes Handicapées). Paris, 18 janvier 2007
- AP2 **L. Afilal, K. Guelton, N. Manamanni, S. Moughamir**, *Conception et Commande de Machines de rééducation et d'entraînement*, Journée « Méthodes et dispositifs biomédicaux d'entraînement, d'évaluation et de rééducation. » du GDR STIC-Santé. Paris, 17 novembre 2005.
- *AP1 **K. Guelton, T.M. Guerra, S. Delprat**, *Observateurs flous de type Takagi-Sugeno sous formes descripteurs – Application au cas de l'homme en station debout*, GRAISyHM, Groupement de Recherche en Automatisation Intégrée et Systèmes Homme-Machine, Ecole Centrale Lille, 16 octobre 2003.

11. Rapports et mémoires de recherche

- RA4 **L. Afilal, K. Guelton, A. Pinti**, *Rapport technique, CNRS/INSERM GdR STIC-Santé « Compte rendu de E :Méthodes et dispositifs biomédicaux d'entraînement, d'évaluation et de rééducation. »*, GDR STIC-Santé, CNRS/INSERM, 2005.
- *RA3 **K. Guelton**, *Estimation des caractéristiques du mouvement humain en station debout. Mise en œuvre d'observateurs flous sous forme descripteur*, Thèse de Doctorat, Spécialité Automatique, UVHC, LAMIH UMR-CNRS 8530 (Equipes Biomécanique et Systèmes flous), Valenciennes, 2003.

*RA2 **K. Guelton**, *Contribution à l'évaluation objective de la posture des sujet scoliotiques*, Mémoire de DEA, Spécialité Automatique des Systèmes Industriels et Humain, UVHC, LAMIH UMR-CNRS 8530 (Equipe Biomécanique), Valenciennes, 2003.

*RA1 **K. Guelton**, *Etude de la stabilométrie en biomécanique*, Mémoire de projet d'Ingénieur, ENSIAME, LAMIH UMR-CNRS 8530 (Equipe Biomécanique), Valenciennes, 1999.

12. Supports pédagogiques

SP7 **K. Guelton**, *Supports de cours et TDs d'analyse des risques industriels : Risques mécanique et risques en environnement automatisé*, Master Pro SQHE, URCA, Reims, 2009.

SP6 **K. Guelton**, *Supports de cours et TDs de maintenance industrielle et sureté de fonctionnement*, Master 1 GEDD, URCA, Reims, 2008.

SP5 **K. Guelton**, *Supports de cours et TDs de conduite et management de projet*, Master Pro SQHEGD, URCA, Reims, 2008.

SP4 **K. Guelton**, *Supports de cours et TDs de maintenance industrielle*, Master Pro EEA, URCA, Reims, 2007.

SP3 **K. Guelton**, *Supports de cours et TDs de conduite de projet*, Master Pro EEA, URCA, Reims, 2006.

*SP2 **K. Guelton**, *Supports de cours et TDs d'Algorithmique et Programmation*, ISTV (L3 Sciences physique), UVHC, Valenciennes, 2004.

*SP1 **K. Guelton**, *Sujets de TPs en Vision et Traitement d'images – Mise en œuvre d'un automate de vision DVT 600*, ENSIAME, Valenciennes, 2001.

VII. SYNTHÈSE DES ACTIVITÉS DE RECHERCHE

Mots-clefs : Modèles Takagi-Sugeno, Commande, Observation, Descripteurs, LMI, Fonction de Lyapunov Non Quadratique, Station Debout, Machines de Rééducation.

1. Parcours scientifique : de la biomécanique à l'automatique

J'ai commencé mes travaux de recherche en 1999 dans le cadre de mon DEA puis d'une thèse débutée sous la direction du Professeur François-Xavier Lepoutre, soutenue en 2003 à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis. Mes travaux s'inscrivaient alors dans les champs disciplinaires de la biomécanique et concernaient plus particulièrement l'étude de la posture humaine en station debout. Ce n'est qu'en fin de thèse que, confronté à des problèmes d'estimation de couples articulaires, je me suis tourné vers le domaine de l'automatique en mettant en oeuvre des observateurs non linéaires à entrées inconnues. Ce premier virage thématique a été rendu possible grâce à une collaboration étroite, démarrée fin 2002, avec le Professeur Thierry-Marie Guerra qui a, de fait, accompagné la fin de ma thèse. J'ai ensuite bénéficié d'un poste d'ATER de 2003 à 2005 à Valenciennes pendant lequel j'ai conforté mes connaissances en automatique.

Fort de cette double expérience en biomécanique et automatique, j'ai été recruté en qualité de maître de conférences à l'Université de Reims Champagne-Ardenne (réalisant ainsi une première mobilité géographique) à compter du 1^{er} février 2005 afin de renforcer le groupe Automatique du CReSTIC dont les activités concernaient, entre autres, le développement et la commande de machines de rééducation. Depuis, mes activités en biomécanique se sont raréfiées au profit de l'intensification de mes activités théoriques en automatique achevant ainsi cette première conversion thématique.

Dans la suite, les travaux de recherche effectués lors de mon DEA et ma thèse de doctorat à Valenciennes sont sommairement présentés. Puis, une synthèse des travaux de recherche entrepris depuis ma prise de fonction en qualité de maître de conférences à Reims est proposée.

2. Travaux antérieurs à ma prise de fonctions à l'URCA (2000-2004)

2.1. Laboratoire et groupes de recherche

De 1999 à 2004, mes activités de recherches se sont déroulées au LAMIH (UMR CNRS 8530) de l'UVHC. Celles-ci s'intégraient alors dans les thématiques de deux équipes : *Biomécanique*, dirigée par le Professeur François-Xavier Lepoutre, et *Systèmes Flous*, dirigée par le Professeur Thierry-Marie Guerra. Ils se situaient à l'intersection des domaines de l'Automatique et de la Biomécanique : l'homme étant perçu comme un système auto-commandé et auto-régulé composé de corps rigides polyarticulés qui lui confèrent un nombre important de degrés de liberté. En conséquence, il possède une grande plasticité vis-à-vis des troubles (pathologies) et des perturbations (contraintes externes) auxquels il peut être soumis.

L'enjeu des études entreprises était d'identifier et de modéliser les régulations (phénomènes compensatoires ou d'adaptation) mises en place en réponse à des troubles ou perturbations du mouvement humain. Les variables directement affectées par ces régulations sont, soit directement mesurées, soit estimées via des traitements numériques associés à des modélisations biomécaniques du corps.

Les variables mesurées sont obtenues à l'aide de systèmes d'analyse gestuelle et de la mesure des sollicitations externes (forces et couples externes). Les variables à estimer correspondent, quant à elles, aux sollicitations articulaires (forces et couples articulaires), aux travaux, à l'énergie mécanique engagée pour réaliser un mouvement et à toutes autres variables permettant une meilleure compréhension des mécanismes adoptés par l'homme dans ses mouvements.

Par ailleurs, les résultats obtenus ont été confrontés à l'expertise des médecins, ergonomes ou entraîneurs. Ceux-ci ont des attentes différentes, utilisent des langages spécifiques et ne partagent pas le même bagage scientifique et culturel. Ces échanges sont riches et bidirectionnels. Ainsi, l'objectif était de mettre à profit l'expertise de ces différents intervenants pour affiner les modélisations et proposer de nouvelles variables explicatives de tel ou tel phénomène.

2.2. Travaux de DEA

L'objectif de mes travaux de DEA était, dans un premier temps, la proposition d'un modèle biomécanique de l'homme en posture orthostatique (debout avec pour consigne de ne pas bouger). Celui-ci permet l'obtention de la position du centre de gravité du corps humain en trois dimensions à partir de la seule mesure de la position du centre de pression (point d'application des forces de réactions au sol) et est basé sur une structure en simple pendule inversé [RI1].

Parallèlement, un algorithme d'autocalibrage de radiographies orthogonales permettant de se libérer de l'utilisation d'objets de calibrage nécessaires aux techniques DLT (Direct Linear Transformation) [Marzan et Karama, 1975][Cheriet et al., 1999] a été proposé en vue de la reconstruction 3D du rachis de sujets scoliotiques [CI4].

La mise en correspondance des estimations de position du centre de gravité et de la reconstruction 3D du rachis scoliotique doit alors permettre aux médecins de visualiser l'organisation du rachis vis-à-vis de la ligne de gravité. Ainsi il est possible d'évaluer l'influence des déformations rachidiennes sur la stabilité posturale du sujet scoliotique.

Bilan de la production scientifique associée au DEA: une revue internationale [RI1], quatre conférences internationales [CI1][CI2][CI3][CI4], deux communications nationales [CN1][CN2] et deux mémoires de recherche [RA1][RA2].

2.3. Travaux de thèse de doctorat

Mes travaux de thèse ont conduit à la proposition d'une classe d'observateurs non linéaires permettant l'estimation des couples articulaires et vitesses angulaires à partir de la mesure des positions segmentaires de l'homme en station debout. Les résultats obtenus avec ces outils doivent venir en aide aux cliniciens dans leur analyse des pathologies posturales.

Généralement, en milieu clinique, l'évaluation de la stabilité de l'homme en station debout repose sur des indicateurs de l'état du système postural construits à partir de mesures de la position du centre de pression [Winter et al., 1996][Allum et al., 1998]. Une approche complémentaire consiste à analyser les oscillations posturales autour des chevilles et de la hanche [Nashner, 1992]. La stratégie d'oscillations employée est détectée par la mesure des sorties du système mécanique (positions angulaires des segments corporels) et l'analyse des

entrées de ce système (couples articulaires). Ces informations doivent permettre une explicitation des phénomènes compensatoires employées [Colobert et al., 2006].

Classiquement, les vitesses et accélérations angulaires sont estimées à partir de la mesure des positions et de techniques de filtrage et dérivation numériques [Nougier, 2001]. Les couples sont, quant à eux, estimés en utilisant des méthodes de dynamique inverse [Hatze, 2000]. Ces dernières présentent une grande sensibilité au bruit et semblent difficilement utilisables dans le cadre d'une application en temps réel.

Une contribution de ce travail est la proposition, dans le cadre de la station debout, d'une méthode alternative à la dynamique inverse basée sur la reconstruction d'état.

Pour cela, un modèle mécanique du corps humain en double pendule inversé a été choisi. Ce dernier permet de représenter, avec une complexité modérée, les principales stratégies d'oscillations posturales de l'homme en station debout [Nashner, 1992]. Les paramètres de ce modèle peuvent être, dans un premier temps, obtenus à l'aide de tables anthropométriques (valeurs standard pour des populations de morphotypes similaires).

Les tables anthropométriques ne sont pas parfaitement adaptées à un individu particulier. Quel que soit le modèle utilisé, l'utilisation de ces tables introduit obligatoirement des incertitudes paramétriques. Néanmoins, un algorithme d'optimisation basé sur un recuit simulé avec cycles de réchauffement a été proposé afin d'adapter les paramètres du modèle à un individu particulier [CI5]. L'objectif est de minimiser l'écart quadratique entre deux estimations du couple articulaire au niveau des chevilles. Celles-ci sont obtenues, d'une part au travers du modèle mécanique et, d'autre part à partir d'observations externes (basées sur la mesure des forces au sol). On obtient ainsi un modèle entrées/sorties reproduisant plus fidèlement le comportement dynamique du corps humain en station debout.

Les couples articulaires ne pouvant être mesurés sans une instrumentation invasive éthiquement proscrite, leur estimation est réalisée à partir de la mesure des positions segmentaires et d'un observateur à entrées inconnues.

Du point de vue de l'Automatique, ce travail apporte une contribution à l'étude d'une classe d'observateurs flous de type Takagi-Sugeno [Takagi et Sugeno, 1985] basés sur une forme descripteur d'état [Taniguchi et al., 2000]. L'objectif est l'obtention de conditions garantissant la convergence de l'erreur de reconstruction. En premier lieu, deux approches ont été proposées. Elles admettent une écriture sous la forme d'un problème LMI (Linear Matrix Inequalities), et donc une résolution aisée à l'aide des outils issus de l'optimisation convexe

[Boyd et al., 1994][Gahinet et al., 1995]. En second lieu, deux autres approches permettant de relâcher les conditions précédentes ont également été proposées, mais aboutissent à des conditions BMI (Bi-linear Matrix Inequalities) qui ne peuvent être résolues directement. Des algorithmes de relaxation utilisant deux problèmes LMI exécutés séquentiellement, ont été mis en place pour obtenir des solutions [CI6][CI7].

La mise en œuvre d'un observateur flou de type Takagi-Sugeno à entrées inconnues, basé sur le modèle non linéaire de l'homme en station debout, permet l'estimation conjointe des vitesses et couples articulaires à partir des seules mesures des positions angulaires [CI7][CI11]. Les résultats obtenus sont comparés avec ceux de trois approches de la dynamique inverse. Deux tests sont réalisés : le premier est un mouvement de flexion-extension autour de la hanche et des chevilles et le second correspond à la posture orthostatique. Il apparaît que l'observateur flou fournit des résultats similaires à ceux de l'approche « globale » de la dynamique inverse. Il semble que la qualité des résultats obtenus repose principalement sur une utilisation globale du modèle [RI3]. En raison du problème de mise en correspondance de données hétérogènes et du report des incertitudes « de proches en proche » lors du calcul des sollicitations articulaires, on conclue que les approches « Bottom-up » et « Top-down » de la dynamique inverse semblent inadaptées pour l'estimation des couples articulaires en station debout.

Bilan de la production scientifique associée à la thèse: une revue internationale [RI3], quatre conférences internationales [CI5][CI6][CI7][CI11], six communications nationales [CN3][CN4][CN5][CN6][CN7][CN8], une communication sans acte [AP1] et un mémoire de recherche [RA3].

3. Laboratoire et groupe de recherche actuels (depuis 2005)

Mes activités de recherches actuelles se déroulent au sein du Centre de Recherche en Sciences et Techniques de l'Information et de la Communication (CReSTIC EA 3804) de l'Université de Reims Champagne-Ardenne.

Le CReSTIC, dirigé par le Professeur Janan Zaytoon, est un laboratoire couvrant un large spectre des domaines scientifiques relevant de la Direction Scientifique de la MSTP (DS 9) et de la section 7 du Comité National de la Recherche Scientifique. Il regroupe, à Reims, les enseignants chercheurs relevant des sections 27, 61 et 63 du Conseil National des

Universités. Fort de ses 84 permanents (25 Pr, 61 MdC et 8 IATOS), le CReSTIC est structuré autour de trois équipes :

- L'équipe Automatique (AUTO), dont les activités concernent l'analyse, la commande, le diagnostic et la supervision des Systèmes à Evènements Discrets, Continus et Hybrides.
- L'équipe Signal Image et Connaissance (SIC), dont les activités concernent la synthèse d'images fixes ou animées, l'intelligence artificielle, la cognition mais aussi le traitement du signal et des images.
- L'équipe Systèmes Communicants (SYSCOM), dont les travaux sont centrés sur l'étude d'Algorithmes Distribués et Parallèles, la Décision et la Communication.

Mes travaux s'intègrent dans les thématiques de l'équipe AUTO, dirigée par le Professeur Bernard Riera (pour le quadriennal 2006-2010), constituée de 8 Professeurs, 11 maîtres de conférences (dont 3 HDR), de 4 personnels techniques (IATOS/ITA) et d'une quinzaine de doctorants. Les travaux de cette équipe peuvent être regroupés en deux thématiques principales, Systèmes à Evènements Discrets (SED) et Systèmes Dynamiques en temps Continus et/ou discrétisés (SDC), avec pour vocations de fédérer les compétences et approches développées pour l'étude des Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH). Au sein de cette équipe, mes travaux s'insèrent dans la thématique SDC et plus particulièrement dans l'axe Commande Avancée des Systèmes Complexes (CASC) auquel je participe avec le Professeur Nouredine Manamanni et le Docteur Nadhir Messaï (MCF). Nos travaux s'intéressent principalement à l'analyse, la synthèse de lois de commande et d'observateurs pour les systèmes non linéaires. Les approches proposées concernent notamment les systèmes polytopiques convexes de type Takagi-Sugeno [Takagi et Sugeno, 1985], encore appelés multi-modèles ou modèles quasi-LPV, mais aussi les SDH et plus particulièrement les SDC à commutations.

4. Contexte initial et intégration au sein de l'équipe AUTO du CReSTIC

Lors de mon arrivée au CReSTIC en février 2005, les membres de l'équipe AUTO étaient investis dans des travaux à caractère théorique. Parmi ceux-ci et à titre d'exemple, les travaux de thèse de Najib Essounbouli, encadrés par Abdelaziz Hamzaoui et Janan Zaytoon, portaient sur la commande adaptative floue robuste des systèmes non linéaires incertains [Essounbouli, 2004]. Par ailleurs, les travaux de thèse de Badr Mansouri, encadrés par

Noureddine Manamanni et Janan Zaytoon, portaient sur la commande en suivi de trajectoires par retour de sortie des modèles de type Takagi-Sugeno [Mansouri, 2005].

Mon arrivée au laboratoire coïncidant avec la dernière année de thèse de M. Mansouri et, ayant moi-même étudié ce type de modèles durant ma dernière année de thèse, je me suis naturellement intéressé à ces travaux auxquels il m'a été permis d'apporter ma contribution. C'est ainsi qu'une collaboration étroite et fructueuse avec Noureddine Manamanni a vu le jour. Celle-ci constituera par la suite la pierre angulaire de mes travaux actuels, c'est-à-dire la synthèse de lois de commande pour les systèmes flous de type Takagi-Sugeno, mais aussi le point de départ d'une nouvelle thématique de notre équipe et, notamment, l'émergence de l'axe CASC.

Par ailleurs, en 2005, l'équipe AUTO venait d'obtenir le financement d'un projet au sein d'un Contrat Plan Etat-Région (CPER) nommé « SYSREEDUC ». L'objectif de ce projet était de concevoir une instrumentation capable d'évaluer et d'aider à la rééducation des membres inférieurs tout en respectant les contraintes physiologiques et biomécaniques de manière personnalisée et adaptée aux différentes pathologies dont peut souffrir un patient. L'obtention du financement de ce projet s'appuyait sur un savoir-faire transversal développé au sein de l'équipe AUTO, reconnue dans le développement de machines d'entraînement et de rééducation. En effet, des travaux antérieurs [Moughamir, 1999] ont abouti au développement de la machine Multi-Iso d'entraînement et de rééducation des membres inférieurs sous l'impulsion d'un partenariat avec la société Myosoft. Par la suite, une nouvelle technique de renforcement musculaire par stimulation mécanique de la boucle neuromusculaire Gamma a été proposée [Cherouali, 2004]. Mon arrivée au CReSTIC coïncidant avec le démarrage du CPER SYSREEDUC et, tirant parti de ma double compétence en biomécanique et automatique, il m'a été proposé de co-encadrer avec Janan Zaytoon une nouvelle thèse (Lynda Seddiki), sur la conception et la commande d'une machine de rééducation, dans laquelle j'ai eu à cœur d'appliquer les techniques de commande développées pour les modèles TS [Seddiki, 2008].

5. Travaux à caractère théorique (depuis 2005)

Depuis leur introduction en 1985, les modèles flous de type Takagi-Sugeno ont suscité un grand intérêt de la part de la communauté automatique internationale [Takagi et Sugeno, 1985]. En effet, sur la base du formalisme flou, ce type de modèles permet de

représenter fidèlement un modèle non linéaire par l'agrégation d'un ensemble de règles floues dont les conclusions correspondent à des systèmes dynamiques linéaires. Il en résulte qu'un modèle Takagi-Sugeno est un système dynamique non linéaire décrit sous forme polytopique convexe, c'est-à-dire qu'il constitue une collection de dynamiques (souvent linéaires) agrégées par des fonctions non linéaires vérifiant les propriétés de sommes convexes [Tanaka et Wang, 2001]. L'obtention d'un tel modèle peut se faire soit par linéarisation autour de points de fonctionnement [Ma et al., 1998], soit par identification ou encore, par le biais de transformations polytopiques convexes d'un modèle de connaissance non linéaire [Morère, 2001][Tanaka et Wang, 2001]. Cette dernière approche, couramment appelée décomposition en secteurs non linéaires, permet lorsqu'un modèle de connaissance non linéaire d'un système est disponible, de représenter celui-ci de manière exacte sur un sous-espace compact de l'espace d'état. Cette particularité présente alors l'intérêt de permettre l'extension de certains résultats de l'analyse des systèmes linéaires au cas des systèmes non linéaires.

L'analyse de la stabilité et, par extension, la synthèse de lois de commande des modèles flous de type Takagi-Sugeno sont généralement abordées par la méthode directe de Lyapunov [Tanaka et Wang, 2001][Sala et al., 2005]. Ainsi, par le choix d'une fonction candidate de Lyapunov appropriée, on obtient un ensemble d'inégalités matricielles qu'il convient de résoudre. Selon les problèmes considérés, les conditions sont alors obtenues sous forme d'Inégalités Linéaires Matricielles (LMI) mais parfois aussi sous forme d'Inégalités Bilinéaires Matricielles (BMI). A l'instar des conditions LMI, qui peuvent être résolues aisément (lorsqu'une solution existe) à l'aide des outils de l'optimisation convexe (algorithme de point intérieur...), les BMI ne peuvent être résolues de manière directe et nécessitent la mise en œuvre d'algorithmes séquentiels (problèmes à valeurs propres généralisées...) qui ne garantissent pas l'existence ou l'absence d'une solution optimale [Boyd et al., 1994]. De ce fait, l'un des enjeux majeurs des travaux entrepris sur la stabilité et la stabilisation des modèles Takagi-Sugeno consiste en l'obtention ou la réécriture de conditions sous forme LMI.

D'autre part, le choix de la fonction candidate de Lyapunov, la prise en compte ou non des informations contenues dans les fonctions d'appartenance, mais aussi les techniques de majorations et transformations matricielles employées pour obtenir des conditions LMI, sont autant de sources de conservatisme [Sala, 2009]. En effet, pour un système non linéaire donné, l'ensemble des solutions admissibles peut ne pas être entièrement atteignable par l'ensemble des solutions aux problèmes LMI obtenus via une modélisation Takagi-Sugeno.

Ainsi, la réduction du conservatisme des conditions de stabilité/stabilisation LMI constitue un autre enjeu majeur des travaux entrepris pour l'analyse des modèles Takagi-Sugeno.

Dans ce contexte, depuis ma nomination à l'URCA, ma contribution à l'étude de la stabilité et à la synthèse de lois de commande pour les systèmes Takagi-Sugeno a concerné principalement les points suivants :

- La formulation de conditions LMI pour des problèmes de commande des systèmes TS (Suivi de trajectoire, Stabilisation des descripteurs TS, Commande décentralisée...).
- La proposition de nouvelles conditions LMI pour la commande en retour de sortie des systèmes TS par l'approche redondante.
- La recherche de solutions, ou plutôt des alternatives, aux problèmes rencontrés par l'utilisation de fonction de Lyapunov non quadratiques.

Afin d'appréhender plus en détail les aspects théoriques de ma contribution, quelques rappels et résultats élémentaires sur la commande des systèmes TS sont proposés à la section suivante.

5.1. Quelques rappels sur les modèles TS et leur stabilisation

5.1.1. Présentation des modèles TS

Issus des concepts de la modélisation floue, les modèles Takagi-Sugeno sont généralement représentés dans l'espace d'état par un ensemble de règles floues de type « Si – Alors » [Takagi et Sugeno, 1985]. Les prémisses de ces règles sont représentatives de l'univers du discours sur lequel le modèle TS est valide et les conclusions correspondent à des modèles dynamiques « locaux » (le plus souvent, des représentations d'état linéaires). Soit r le nombre de règles d'un modèle TS (en temps continu), la $i^{\text{ème}}$ règle floue R^i peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{aligned}
 R^i : \mathbf{SI} \ z_1(t) \text{ est } F_1^i(z_1(t)) \ \mathbf{ET} \ z_2(t) \text{ est } F_2^i(z_2(t)) \ \dots\dots \ z_p(t) \text{ est } F_p^i(z_p(t)) \\
 \mathbf{ALORS} \ \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t)
 \end{aligned} \tag{1}$$

où $z_j(t)$ sont les variables de prémisses (dépendantes de l'entrée et/ou de l'état du système), $F_j^i(z_j(t))$ sont les sous-ensembles flous, $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $y(t) \in \mathbb{R}^q$ et $u(t) \in \mathbb{R}^m$ représentent respectivement le vecteur d'état, le vecteur de sortie et le vecteur de commande. $A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ et $B_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$ sont les matrices décrivant la dynamique des polytopes du système.

À chaque règle R^i est attribuée un poids noté $w_i(z(t))$. Ce poids dépend du degré d'appartenance des variables de prémisses $z_j(t)$ aux sous-ensembles flous $F_j^i(z_j(t))$ et du connecteur « **ET** » choisis tel que :

$$w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p F_j^i(z_j(t)), \text{ pour } i = 1, \dots, r \quad (2)$$

où $F_j^i(z_j(t))$ représente la valeur de la fonction d'appartenance $z_j(t)$ à l'ensemble flou F_j^i et $\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) > 0$ et $w_i(z(t)) \geq 0$.

Une défuzzification barycentrique peut alors être adoptée en considérant :

$$h_i(z(t)) = \frac{w_i(z(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))}, \quad (3)$$

Dans ce cas, $h_i(z(t))$ représente la fonction d'activation de la $i^{\text{ème}}$ règle du modèle TS et, pour $i = 1, \dots, r$, ces fonctions vérifient la propriété d'une somme convexe, c'est-à-dire $\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1$ et $h_i(z(t)) \geq 0$. Finalement, le modèle flou (1) peut être réécrit sous sa forme compacte telle que :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) (A_i x(t) + B_i u(t)) \quad (4)$$

5.1.2. Obtention des modèles flous de type Takagi-Sugeno (TS)

Dans la littérature, trois approches sont couramment décrites pour l'obtention d'un modèle TS :

- *Identification des modèles TS* à partir de mesures acquises des entrées et sorties d'un système physique [Gasso et al., 1999][Gasso et al., 2000]. Dans ce cas, le problème d'identification du modèle non linéaire se réduit à l'identification de modèles locaux autour de points de fonctionnement préalablement choisis d'un système non linéaire. Cette méthode est utilisée dans le cas de systèmes dotés d'une dynamique difficile à décrire à l'aide d'un modèle analytique.
- *Linéarisation d'un modèle non linéaire* autour d'un ensemble fini de points de fonctionnement [Ma et al., 1998][Tanaka et Wang 2001]. Un représentant TS est obtenu par l'interconnexion des dynamiques locales à l'aide de fonctions d'appartenance judicieusement choisies (gaussiennes, triangulaires, trapézoïdales, etc.). Notons que cette approche constitue dans la plupart des cas une approximation du modèle non linéaire considéré.
- *Décomposition en secteurs non linéaires* basée sur des transformations polytopiques convexes des termes non linéaires d'un système dynamique [Kawamoto et al., 1992][Tanaka et Wang, 2001][Morère, 2001]. Cette méthode garantit la construction d'un modèle TS représentant exactement un modèle non linéaire sur un espace compact des variables d'état.

Dans nos travaux, notre intérêt s'est porté sur la troisième méthode dans la mesure où elle présente l'avantage de s'affranchir d'approximations de modélisation lors du passage du modèle analytique non linéaire au modèle TS (hormis une réduction éventuelle de l'espace de validité du modèle TS). Par ailleurs, notons que de manière générale, les transformations polytopiques convexes sont injectives. En effet, une infinité de modèles TS peuvent être associés à un système non linéaire donné. Néanmoins, une approche systématique d'obtention des modèles TS à partir d'un système non linéaire affine en la commande peut être employée. Celle-ci est résumée par le lemme suivant.

Lemme 1 [Morère, 2001][Tanaka, 2001] : Soit $f(x(t)) : \mathbb{R} \rightarrow \Omega$ une fonction bornée avec Ω un sous-espace compact de \mathbb{R} . Il existe toujours deux fonctions $w_1(x(t)) \geq 0$ et $w_2(x(t)) \geq 0$ convexes ($w_1 + w_2 = 1$) ainsi que, deux scalaires α et β tels que $f(x(t)) = \alpha \times w_1(x(t)) + \beta \times w_2(x(t))$.

Preuve : Sous l'hypothèse que la fonction $f(x(t))$ est bornée telle que $\alpha \leq f(x(t)) \leq \beta$, le lemme 1 est vérifié avec, par exemple, $\alpha = \max(f(x(t)))$, $\beta = \min(f(x(t)))$,

$$w_1(x(t)) = \frac{f(x(t)) - \beta}{\alpha - \beta} \text{ et } w_2(x(t)) = \frac{\alpha - f(x(t))}{\alpha - \beta}. \quad \blacksquare$$

Notons enfin que, selon les propriétés des termes non linéaires rencontrés dans le modèle mathématique non linéaire, on distingue deux types de représentants TS. En effet :

- si toutes les non-linéarités du système sont continues et bornées, alors le modèle TS représente de manière exacte le système non linéaire sur l'intégralité de l'espace des variables d'état. Dans ce cas, le découpage en secteur non linéaire est dit « global » (cf. figure 4).

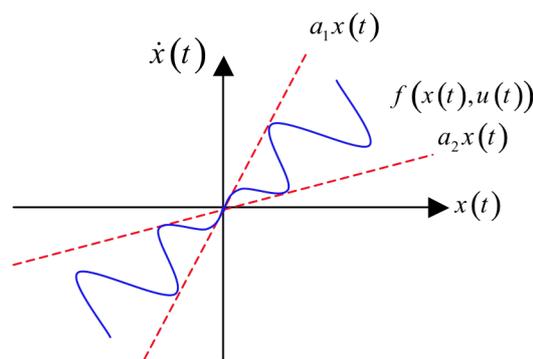


Figure 4 : Secteur non linéaire global.

- si tout ou partie des non-linéarités du système sont continues mais non bornées, alors le modèle TS représente de façon exacte le système non linéaire sur un sous-espace compact de l'espace des variables d'état. Dans ce cas, le découpage en secteur non linéaire est dit « local » (cf. figure 5).

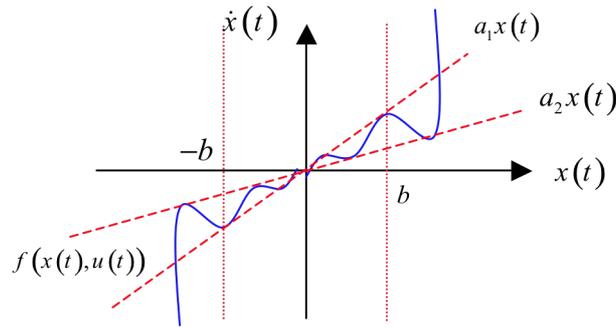


Figure 5 : Secteur non linéaire local.

Exemple 1 : Soit le système non linéaire autonome :

$$\dot{x}(t) = x(t) \cos(x(t)) \quad (5)$$

La fonction $\cos(x(t))$ est continue et bornée sur $[-1,1]$. D'après le lemme 1, on peut

écrire $\cos(x(t)) = \underbrace{\frac{\cos(x(t))+1}{2}}_{h_1(x(t))} \times 1 + \underbrace{\frac{1-\cos(x(t))}{2}}_{h_2(x(t))} \times (-1)$. D'où le représentant TS de (5) :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^2 h_i(x(t)) a_i x(t) \quad (6)$$

avec $a_1 = 1$ et $a_2 = -1$.

Remarque 1: Le nombre de règles des modèles TS obtenus via une transformation polytopique convexe dépend directement du nombre de non-linéarités à découper. Ainsi, lorsque l'on a nl termes non linéaires pour un système dynamique donné, un représentant TS obtenu par décomposition en secteurs non linéaires est constitué de 2^{nl} règles floues.

5.1.3. Stabilité et stabilisation quadratique par retour d'état des modèles TS

L'étude de la stabilité et la synthèse des contrôleurs flous pour les modèles TS (4) sont généralement basées sur la théorie de Lyapunov [Liapounoff, 1907]. Le principe de cette

dernière est inspiré d'une réalité physique. En effet, si l'énergie d'un système est continûment dissipée, alors le système atteint un point d'équilibre.

Dans cette section, afin de permettre au lecteur d'appréhender les résultats proposés dans la suite de ce manuscrit, des résultats significatifs, à l'origine des nombreux travaux sur la stabilité des modèles TS, sont présentés. Ces derniers sont basés sur une fonction candidate quadratique de Lyapunov donnée par :

$$V(x(t)) = x^T(t)Px(t) \quad (7)$$

où $P = P^T > 0$ est une matrice symétrique de $\mathbb{R}_+^{n \times n}$.

La stabilité globale du modèle TS (4) non forcé ($u(t) = 0$) est vérifiée si (7) est décroissante le long des trajectoires du système, c'est-à-dire si:

$$\dot{V}(x(t)) = \dot{x}^T(t)Px(t) + x^T(t)P\dot{x}(t) < 0 \quad (8)$$

que l'on peut réécrire sous la forme:

$$\dot{V}(x(t)) = x^T(t) \left(\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) (A_i^T P + PA_i) \right) x(t) < 0 \quad (9)$$

Puisque les fonctions d'appartenance $h_i(z(t))$ sont positives, l'inégalité (9) est vérifiée s'il existe une solution aux contraintes LMI présentées au théorème suivant.

Théorème 1 [Tanaka et Sugeno, 1992]: *Le modèle TS autonome ($u(t) = 0$) (4) est globalement asymptotiquement stable s'il existe une matrice $P = P^T > 0$ telle que les LMI suivantes sont vérifiées pour tout $i = 1, \dots, r$:*

$$A_i^T P + PA_i < 0 \quad (10)$$

Afin d'assurer la stabilisation d'un modèle TS, plusieurs lois de commande ont été proposées. Les plus répandues se basent sur le principe de compensation parallèle distribuée

(PDC, Parallel Distributed Compensation) [Wang et al., 1996][Tanaka et al., 1998]. Ce type de loi de commande présente l'intérêt de considérer les mêmes fonctions d'appartenance que le modèle TS à stabiliser. Une loi de commande PDC par retour d'état est donnée sous sa forme compacte par :

$$u(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) F_i x(t) \quad (11)$$

avec $F_i \in \mathbb{R}^{m \times n}$ les matrices de gain de retour d'état.

La synthèse d'un correcteur PDC consiste alors à déterminer les matrices F_i . De manière classique, l'expression du modèle TS en boucle fermée s'obtient en substituant la loi de commande (11) dans (4), c'est-à-dire:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) (A_i + B_i F_j) x(t) \quad (12)$$

En considérant la fonction candidate quadratique de Lyapunov (7) et en suivant la même démarche que pour l'obtention du théorème 1, le modèle TS en boucle fermée (12) est stable si:

$$\dot{V}(x(t)) = x^T(t) \left(\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) (A_i^T P + P A_i + F_j^T B_i^T P + P B_i F_j) \right) x(t) < 0 \quad (13)$$

Dès lors, en effectuant les changements de variables bijectifs $X = P^{-1}$ et $M_j = F_j X$, et en séparant les termes croisés des termes nominaux, on obtient les conditions de stabilisation sous forme LMI présentées au théorème suivant.

Théorème 2 [Wang et al., 1996]: *Le modèle TS (4) est globalement asymptotiquement stabilisé via la loi de commande PDC (11) s'il existe des matrices $X^T = X > 0$ et M_j telles que les LMI suivantes soient vérifiées :*

$$Y_{ii} < 0, \text{ pour } i = 1, \dots, r \quad (14)$$

$$\Upsilon_{ij} + \Upsilon_{ji} < 0, \text{ pour } i, j = 1, \dots, r \text{ et } i < j \quad (15)$$

$$\text{avec } \Upsilon_{ij} = A_i X + X A_i^T + B_i M_j + M_j^T B_i^T < 0.$$

Dans ce cas, les gains de la loi de commande (11) sont obtenus en effectuant le changement de variables $F_j = M_j X^{-1}$.

5.1.4. Discussion sur le conservatisme des conditions LMI et la stabilisation non quadratique des modèles TS

Les résultats présentés précédemment sur la stabilité et la stabilisation des systèmes TS sont conservatifs. En effet, ceux-ci ne constituent que des conditions suffisantes mais non nécessaires. Dans cette section, des solutions significatives pour réduire le conservatisme des approches TS sont présentées. Notons que ces solutions dépendent principalement de la source de conservatisme à laquelle elles s'attaquent [Sala et Ariño, 2009][Sala, 2009], par exemple : la non-unicité d'un modèle TS, le choix de la fonction candidate de Lyapunov, l'indépendance des fonctions d'appartenance et structure d'interconnexion des conditions LMI, coût de calcul élevé... Dans la suite, nous expliciterons quelques-unes de ces sources de conservatisme sur lesquelles notre attention s'est portée jusqu'à présent et nous présenterons les principaux résultats de la littérature permettant de les réduire.

En premier lieu, aucune information sur les fonctions d'appartenance $h_i(z(t))$ n'est prise en compte au sein des théorèmes 1 et 2. De ce fait, les conditions de stabilité LMI présentées sont suffisantes (non nécessaires) et par conséquent conservatives. En effet, pour obtenir ces conditions, on cherche une solution à un problème d'optimisation en considérant que, pour qu'une somme soit négative, chacun des termes de cette somme doit être négatif. Or, il est évidemment possible de chercher des solutions qui autoriseraient certains termes des sommes (9) ou (13) à être positifs alors que l'ensemble resterait négatif. Dans ce cas, on obtient des conditions de stabilité dites « relâchées », c'est-à-dire moins conservatives. On parle alors de relaxation des conditions LMI. Plusieurs techniques ont été proposées afin de réduire cette source de conservatisme. Certaines se basent sur l'ajout de variables de décisions libres [Kim et Lee, 2000][Liu et Zhang, 2003], d'autre sur des transformations de sommes [Tanaka et al., 1998][Tuan et al., 2001]. Parmi ces schémas de relaxation, notre attention s'est portée sur l'approche proposée par [Tuan et al., 2001] dans la mesure où elle

constitue un bon compromis entre conservatisme et coût de calcul. Ainsi, la plupart des résultats que nous avons proposés et qui seront présentés dans la suite de ce manuscrit sont basés sur le lemme suivant.

Lemme 2 [Tuan et al., 2001] : La condition $\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j \Upsilon_{ij} < 0$ (avec $h_i \geq 0$ pour tout $i = 1, \dots, r$) est vérifiée si :

$$\Upsilon_{ii} < 0, \text{ pour } i = 1, \dots, r \quad (16)$$

$$\frac{2}{r-1} \Upsilon_{ii} + \Upsilon_{ij} + \Upsilon_{ji} < 0, \text{ pour } i, j = 1, \dots, r \text{ et } i \neq j \quad (17)$$

D'autre part, le choix d'une fonction candidate de Lyapunov quadratique s'avère être également une source de conservatisme. En effet, pour les systèmes TS, ce choix nécessite la recherche d'une matrice commune à un ensemble de contraintes LMI. D'autres approches, qui considèrent des fonctions de Lyapunov continues par morceaux (piecewise Lyapunov functions), ont été proposées par [Johansson, 1999][Johansson et al., 1999][Feng et Wang, 2001][Feng, 2004]. Néanmoins, celles-ci s'avèrent peu efficaces lorsqu'un représentant TS est obtenu par découpage en secteur non linéaire. En effet, ce type de fonctions de Lyapunov ne tient pas compte de la structure d'interconnexion non linéaire entre sous-modèles composant le système global. Une alternative, efficace lorsque le modèle TS est obtenu sur la base d'un modèle de connaissance non linéaire, consiste en l'utilisation des fonctions candidates non quadratiques de Lyapunov [Jadbabaie, 1999][Tanaka et al., 2003][Guerra et Vermeiren, 2004][Rhee et Won, 2006][Feng, 2006]. Parmi ces approches, on distingue celles considérant l'emploi d'une fonction candidate de Lyapunov basée sur la même structure d'interconnexion floue (fonctions d'appartenance) que le système TS étudié [Jadbabaie, 1999][Tanaka et al., 2001][Liu et al., 2004][Tanaka et al., 2003][Feng, 2004][Feng, 2006]. Ainsi, le système, la fonction de Lyapunov non quadratique et la loi de commande PDC, étant basés sur cette même structure, on comprend bien qu'une compensation parallèle entre ces parties facilite la recherche d'une solution aux problèmes LMI et conduit à une réduction du conservatisme.

Afin d'expliciter ce type d'approche, considérons le problème de stabilisation non quadratique du modèle TS (4). Soit la fonction candidate de Lyapunov non quadratique :

$$V(x(t)) = x^T(t) \left(\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) P_i \right)^{-1} x(t) \quad (18)$$

avec $P_i = P_i^T > 0$,

et la loi de commande non-PDC donnée par :

$$u(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) F_i \left(\sum_{j=1}^r h_j(z(t)) P_j \right)^{-1} x(t) \quad (19)$$

Le système en boucle fermée s'écrit alors :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) \left(A_i + B_i F_j \left(\sum_{k=1}^r h_k(z(t)) P_k \right)^{-1} \right) x(t) \quad (20)$$

Celui-ci est stable si et seulement si [Tanaka et al. 2003] :

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) \left(P_j A_i^T + A_i P_j + F_j^T B_i^T + B_i F_j - \sum_{k=1}^r h_k(z(t)) P_k \right) < 0 \quad (21)$$

Sachant que $\sum_{k=1}^r h_k(z(t)) = 1$, $\forall R_{ij} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, on peut écrire :

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) h_k(z(t)) R_{ij} = 0 \quad (22)$$

d'où (21) devient :

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) \left(P_j A_i^T + A_i P_j + F_j^T B_i^T + B_i F_j - \sum_{k=1}^r \dot{h}_k(z(t)) (P_k + R_{ij}) \right) < 0 \quad (23)$$

Dès lors, en supposant que $\forall t, \dot{h}_k(z(t)) \geq \phi_k$ et en considérant le lemme 2, le modèle en boucle fermée (20) est stabilisé si les conditions LMI présentées au théorème suivant sont vérifiées.

Théorème 3: *Le modèle TS (4) est globalement asymptotiquement stabilisé via la loi de commande non-PDC (19) s'il existe des matrices $X^T = X > 0$ et M_j telles que les LMI suivantes soient vérifiées.*

$$\Upsilon_{ii} < 0, \text{ pour } i = 1, \dots, r \quad (24)$$

$$\frac{2}{r-1} \Upsilon_{ii} + \Upsilon_{ij} + \Upsilon_{ji} < 0, \text{ pour } i, j = 1, \dots, r \text{ et } i \neq j \quad (25)$$

$$P_k + R_{ij} \geq 0, \text{ pour } i, j, k = 1, \dots, r$$

$$\text{avec } \Upsilon_{ij} = P_j A_i^T + A_i P_j + F_j^T B_i^T + B_i F_j - \sum_{k=1}^r \phi_k (P_k + R_{ij}) < 0.$$

Remarque 2 : Par l'introduction des matrices de décision libres R_{ij} (équation (22)), les conditions LMI proposées au théorème 3 constituent une extension triviale (moins conservative) des conditions présentées dans [Mozelli et al., 2009]. Ces dernières peuvent être retrouvées directement en considérant $R_{ij} = R$ commune. Par ailleurs, ces conditions incluent également celles proposées dans [Tanaka et al. 2003] en fixant $R_{ij} = P_r$ ou encore les conditions quadratiques du théorème 2 avec $P_k = P$ commune et $R_{ij} = -P$.

Poursuivant l'objectif de fournir des conditions LMI de moindre conservatisme, des extensions de l'approche non quadratique (théorème 3) à certains problèmes de commande plus complexes ont été proposées (stabilisation non quadratique des descripteurs, retours de sortie statique et dynamique...). Celles-ci seront présentées dans la suite de ce manuscrit, notamment aux sections 5.3 et 5.4. Toutefois, ces approches font par ailleurs l'objet de certaines critiques. En effet, celles-ci nécessitent la connaissance a priori de paramètres (bornes inférieures des dérivées des fonctions d'appartenance) qui s'avèrent difficiles à évaluer en amont de la résolution du problème LMI. Ce point, sur lequel nous ne nous sommes penchés que récemment, fait l'objet des travaux présentés à la section 5.4.

5.2. Problèmes de commande des modèles TS traités sous forme LMI

Comme il a été mentionné précédemment, de nombreux travaux ont été entrepris pour la mise sous forme LMI de conditions de stabilité ou de synthèse de contrôleurs spécifiques pour les systèmes TS. Citons, par exemple, la synthèse de contrôleurs PDC par retour de sortie [Chadli et al., 2002], la commande des systèmes descripteurs TS [Taniguchi et al., 2001] ou encore la synthèse de lois de commande robustes [Leung et al., 1998][Yoneyama, 2006].

Avec la profusion de travaux visant à étendre les conditions de stabilité quadratiques à des problèmes de commande complexes, l'apport de nouveaux travaux dans ce domaine tend, aujourd'hui, à être perçu comme une $n^{\text{ième}}$ extension produisant des problèmes LMI de dimensions grandissantes et dont les difficultés reposent sur des lemmes de transformations matricielles bien connus (Complément de Schur, lemme de Finsler, etc.) [Boyd et al., 1994]. Néanmoins, si l'intérêt de ces travaux tend à diminuer avec le temps, ils constituent une approche efficace pour appréhender les techniques de mise sous forme LMI, mais aussi permettent de soulever de nouveaux problèmes, lorsque l'on souhaite s'investir dans un tel domaine.

Ainsi, hormis mes travaux préalablement réalisés avec T.M. Guerra sur la synthèse d'observateur TS sous forme descripteur [CI6][CI7][RI3], j'ai commencé par m'intéresser aux travaux en cours au CReSTIC sur la synthèse quadratique de lois de commande robustes en suivi de trajectoire [CI8][RI5]. Puis, tirant parti de ces nouvelles connaissances acquises et de mes travaux de thèse, la synthèse non quadratique de lois de commande robuste pour les descripteurs TS a été abordée, voir par exemple [CI7][CI9][RI10]. Enfin, sur la base d'une

réécriture redondante (sous forme descripteur) de la boucle fermée, j'ai proposé de nouvelles conditions LMI permettant de lever quelques verrous structurels (hypothèses de modélisation, cadre non quadratique) pour la commande robuste en retour de sortie statique et dynamique des systèmes TS incertains et perturbés [CI20][CI26][RI7][RS4]. Une synthèse de ces travaux est proposée aux points suivants.

5.2.1. Commande robuste par retour de sortie pour le suivi de trajectoire des systèmes TS

Le suivi de trajectoire est un problème de commande d'actualité. En effet, la majorité des travaux existant traitent de la stabilité ou de la stabilisation des systèmes TS. Cependant, ceux-ci permettent uniquement de garantir le retour du système non linéaire en un point d'équilibre à partir de conditions initiales non nulles. Le suivi de trajectoire, comme son nom l'indique, permet quant à lui de réaliser des tâches complexes, pouvant s'éloigner des points d'équilibre du système, tout en garantissant la convergence de l'erreur de suivi de l'état du système vis-à-vis d'une trajectoire de référence.

En dépit d'une abondante littérature sur la stabilité des systèmes TS, peu de travaux avaient été entrepris sur la convergence en suivi de trajectoire. Parmi ceux-ci, le suivi de trajectoire par retour d'état a été abordé dans [Tseng et Chen, 2001]. Néanmoins, en présence de perturbations externes, les résultats proposés jusqu'alors n'étaient pas donnés sous forme de LMI [Tseng et al. 2001]. Dans le cas plus général du suivi de trajectoire par retour de sortie, les résultats existants étaient basés sur une structure de commande variable [Zheng et al., 2002] ou encore sur une loi de commande à commutation [Lam et al., 2003]. Les seuls résultats alors disponibles avec une structure de commande PDC étaient écrits sous forme BMI [Manamanni et al. 2007][Tseng et Chen, 2001]. Par ailleurs, la synthèse d'une commande PDC en suivi de trajectoire robuste aux incertitudes paramétriques a été proposée également sous forme BMI dans [Tong et al., 2002]. Néanmoins, ces conditions ont été obtenues aux dépens d'une confusion entre l'erreur de reconstruction de l'état et l'erreur de suivi de trajectoire rendant ainsi cette approche inapplicable [Chadli et El Hajjaji, 2006].

Afin de répondre aux problèmes susmentionnés, l'objectif des travaux de thèse de Badr Mansouri était la formulation de conditions de stabilisation par retour de sortie en suivi de trajectoire des modèles TS incertains et perturbés [Mansouri, 2005]. Dans ce dessein, la structure de contrôle présentée à la figure 6 a été adoptée avec les notations suivantes :

- $x(t) \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état,
- $u(t) \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur d'entrée,
- $y(t) \in \mathbb{R}^q$ est le vecteur de sortie,
- $\hat{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état reconstruit à partir de l'entrée et de la sortie,
- $x_r(t) \in \mathbb{R}^n$ est l'état du modèle de référence,
- $r(t) \in \mathbb{R}^n$ est la trajectoire de référence,
- $e_p(t) = x(t) - x_r(t)$ est l'erreur de poursuite,
- $e_o(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ est l'erreur de convergence de l'observateur,
- $\varphi(t) \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur des perturbations externes.

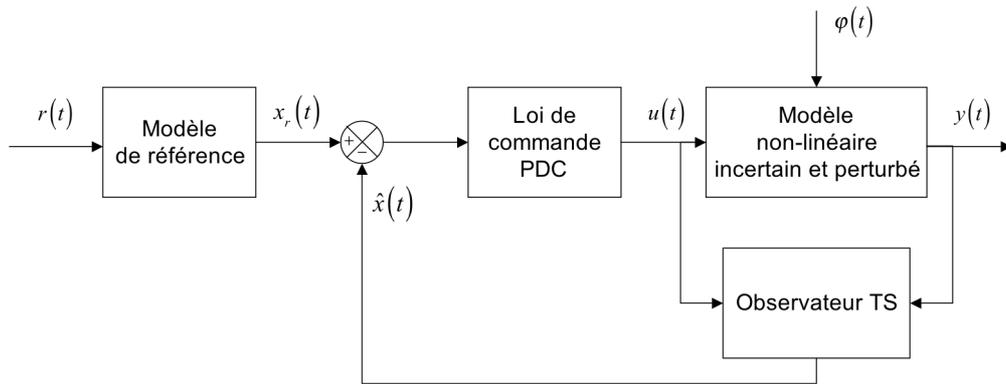


Figure 6 : Structure de commande en suivi de trajectoire par retour de sortie.

La classe des modèles TS incertains et perturbés considérée est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \left[(A_i + \Delta A_i(t))x(t) + (B_i + \Delta B_i(t))u(t) \right] + \varphi(t) \\ y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i x(t) \end{cases} \quad (26)$$

où $A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$ et $C_i \in \mathbb{R}^{p \times n}$ sont les matrices nominales du système, $\Delta A_i(t) = H_i \Delta a(t) E_{ai}$, $\Delta B_i(t) = H_i \Delta b(t) E_{bi}$ sont des matrices d'incertitudes paramétriques

(Lebesgue mesurables) où les H_i , E_{a_i} et E_{b_i} sont des matrices constantes et où les fonctions $\Delta a(t)$, $\Delta b(t)$ satisfont les propriétés $\Delta a^T(t)\Delta a(t) \leq I$ et $\Delta b^T(t)\Delta b(t) \leq I$.

De manière à permettre la commande par retour de sortie, un observateur est introduit. Celui-ci est basé sur le modèle nominal (26) sans incertitudes et est donné sous sa forme usuelle par [Ma et al., 1998][Yoneyama et al., 2000] :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + L_i (y(t) - \hat{y}(t))] \\ \hat{y}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i \hat{x}(t) \end{cases} \quad (27)$$

où L_i sont les gains de l'observateur et $\hat{y} \in \mathbb{R}^q$ est le vecteur de sortie estimé.

Afin de spécifier la trajectoire désirée, on considère le modèle de référence suivant [Tseng et al., 2001] :

$$\dot{x}_r(t) = A_r x_r(t) + r(t) \quad (28)$$

où A_r est une matrice Hurwitz choisie de manière à fixer la dynamique du suivi de trajectoire désiré.

Enfin, la loi de commande utilisée relève du concept de Compensation Parallèle Distribuée (PDC) [Wang et al., 1996], dans le cadre du suivi de trajectoire par :

$$u(t) = - \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) K_i [x_r(t) - \hat{x}(t)] \quad (29)$$

Une méthodologie de synthèse du contrôleur robuste (29) est proposée. Celle-ci est basée sur des techniques classiques de majorations des incertitudes paramétriques [Zhou et Khargonekar, 1988] et considère également un critère H_∞ afin de réduire l'influence des perturbations externes sur l'erreur de poursuite du système dynamique considéré. Ce dernier est donné par [Tseng et al., 2001] :

$$\int_0^{t_f} [x_r(t) - x(t)]^T Q [x_r(t) - x(t)] dt \leq \eta^2 \int_0^{t_f} (r^T(t)r(t) + \varphi^T(t)\varphi(t)) dt \quad (30)$$

où t_f dénote le temps final, Q est une matrice de pondération et η le taux d'atténuation.

Notons que lors de mon arrivée au CRESTIC, ces travaux étaient déjà avancés. Néanmoins les résultats obtenus étaient écrits sous forme BMI [Manamanni et al., 2007]. J'ai alors pris part à ces travaux en participant à la réécriture de ces conditions de stabilité sous forme LMI. Celles-ci sont résumées au théorème suivant.

Théorème 4 [RI5] : *S'il existe les matrices $P_1 = P_1^T > 0$, $P_3 = P_3^T > 0$, $N = N^T > 0$, Y_i , Z_i , et les constantes positives μ_1 , μ_2 , μ_3 , μ_4 , μ_5 , μ_6 , μ_7 , μ_8 et η telles que les conditions LMI suivantes sont vérifiées, sous la contrainte de minimiser η ,*

$$\Upsilon_{ii} < 0, \text{ pour } i = 1, \dots, r \quad (31)$$

$$\frac{2}{r-1} \Upsilon_{ii} + \Upsilon_{ij} + \Upsilon_{ji} < 0, \text{ pour } i, j = 1, \dots, r \text{ et } i \neq j \quad (32)$$

$$\text{avec } \Upsilon_{ij} = \left[\begin{array}{c|c} \Gamma_{ij} & (*) \\ \hline \left[\begin{array}{c|c} -B_i Y_j & N \\ \hline 0_{8 \times 2} & 0_{8 \times 8} \end{array} \right] & \Psi_{ij} \end{array} \right],$$

$$\Psi_{ij} = \left[\begin{array}{cccccccccc} \Psi_{ij}(1,1) & (*) & (*) & (*) & (*) & (*) & (*) & 0 & (*) \\ N & -Q^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ E_{bi} Y_j & 0 & -\mu_2^{-1} I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ E_{bi} Y_j & 0 & 0 & -\mu_7^{-1} I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ E_{ai} N & 0 & 0 & 0 & -\mu_3^{-1} I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ E_{ai} N & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_6^{-1} I & 0 & 0 & 0 \\ A_i^T - A_r^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_r^T P_3 + P_3 A_r + \mu_4 E_{ai}^T E_{ai} & (*) & (*) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E_{ai} & -\mu_8^{-1} & 0 \\ -I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_3 & 0 & -\eta^2 I \end{array} \right],$$

$$\Psi_{ij}(1,1) = A_i N + B_i Y_j + N^T A_i^T + Y_j^T B_i^T + (\mu_5^{-1} + \mu_6^{-1} + \mu_7^{-1} + \mu_8^{-1}) H_i H_i^T,$$

et

$$\Gamma_{ij} = \begin{bmatrix} -2\alpha N & 0 & (*) & (*) & (*) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2\alpha N & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (*) \\ E_{bi}Y_j & 0 & -\mu_1^{-1}I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ E_{bi}Y_j & 0 & 0 & -\mu_5^{-1}I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha I & 0 & 0 & 0 & P_1A_i - Z_iC_j + A_i^T P_1 - C_j^T Z_i^T & (*) & (*) & P_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_i^T P_1 & -(\mu_1^{-1} + \mu_2^{-1} + \mu_3^{-1})^{-1}I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_i^T P_1 & 0 & -\mu_4 I & 0 \\ 0 & \alpha I & 0 & 0 & P_1 & 0 & 0 & -\eta^2 I \end{bmatrix}$$

alors la stabilisation en suivi de trajectoire du système (26) est assurée par la loi de commande PDC (29) en retour de sortie sous la contrainte H_∞ (30) garantissant le taux d'atténuation η des perturbations externes. De plus, les gains K_i et L_i sont obtenus via les changements de variables bijectifs $K_i = Y_i N^{-1}$ et $L_i = P_i^{-1} Z_i$.

Pour plus de détail sur la preuve du théorème 4, le lecteur pourra se référer à l'article **[R15]**, fourni en annexe, dans lequel la pertinence de ces résultats est illustrée au travers d'un exemple de suivi de trajectoire d'un pendule inversé.

Notons que ces conditions ont été étendues à la synthèse sous-optimale de loi de commande robuste en suivi de trajectoires pour les modèles TS incertains par l'application du concept d'ISS¹⁶ [Sontag et Wang, 1995][CI8][CN10]. Par ailleurs, ces travaux ont été l'occasion de mettre en place une collaboration entre le CReSTIC et le LAMIH (équipe de T.M. Guerra) dont j'ai été l'instigateur.

5.2.2. Synthèse de lois de commande pour les descripteurs TS

Fort de ma première expérience de travail avec Nouredine Manamanni et, étant donné le climat amical qui entourait notre collaboration, nous avons décidé de poursuivre l'aventure en nous intéressant à d'autres problèmes relatifs à la commande des systèmes TS. Ayant travaillé auparavant sur la synthèse d'observateur pour la classe des systèmes TS écrits sous forme descripteur, j'ai proposé dans un premier temps de nous orienter vers la synthèse de lois de commande robustes pour cette classe de systèmes.

Rappelons que les descripteurs, encore appelés systèmes implicites, décrits par des systèmes d'équations algébro-différentielles (ADE), permettent de représenter une plus large classe de systèmes dynamiques que les représentations d'états standards, décrites quant à elles par des systèmes d'équations différentielles ordinaires (ODE) [Luenberger, 1977]. On associe souvent la notion de descripteurs aux systèmes singuliers [Campbell, 1982][Dai, 1989]. Néanmoins, ils permettent aussi de modéliser des systèmes faisant intervenir simultanément des dynamiques lentes et des dynamiques rapides [Fridman et Shaked, 2002], d'y associer des contraintes statiques, et constituent une écriture naturelle de certains systèmes physiques comme les systèmes mécaniques à inertie variable [RI3][RI6].

Dans le cadre TS, des premiers résultats quadratiques sur la stabilité et la stabilisation des descripteurs ont été proposés dans [Taniguchi et al., 2001]. Des conditions quadratiques relâchées ont ensuite été obtenues par l'adjonction de variables de décisions libres [Guerra et al., 2007]. D'autre part, on trouve des conditions BMI permettant la synthèse de lois de commande robustes aux incertitudes paramétriques [MA et Sun, 2004]. Cette absence de résultats LMI pour la commande robuste des descripteurs a motivé nos premiers travaux dans ce domaine. Ainsi, nous nous sommes intéressés à la stabilisation quadratique robuste des descripteurs TS incertains et perturbés donnés par :

$$\sum_{k=1}^e \nu_k(z(t)) [E_k + \Delta E_k] \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [(A_i + \Delta A_i)x(t) + (B_i + \Delta B_i)u(t) + W_i \varphi(t)] \quad (33)$$

où $\nu_k(z(t))$ représentent les fonctions d'appartenance de la partie gauche du descripteur, $E_k \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$ et $W_i \in \mathbb{R}^{n \times p}$ sont des matrices réelles décrivant la partie nominale du système, $\Delta E_k \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\Delta A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ et $\Delta B_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$ sont des matrices Lebesgue d'incertitudes paramétriques.

Avec l'arrivée de Tahar Bouarar en 2006 au CReSTIC pour son stage de DEA, des résultats LMI, basés sur l'utilisation d'une fonction de Lyapunov quadratique, ont été proposés. Ceux-ci constituent une extension à l'étude des systèmes descripteurs des techniques que nous avons utilisé auparavant pour traiter les incertitudes paramétriques ainsi que les perturbations externes dans le cadre du retour de sortie. Ils ont conduit à la publication de trois articles dans des conférences internationales [CI17][CI19][CI12].

De plus, afin de réduire le conservatisme des conditions LMI proposées, nous nous sommes attachés à étendre ces résultats dans le contexte non quadratique. Dans ce dessein, le choix s'est porté sur l'utilisation d'une fonction candidate de Lyapunov non quadratique donnée par :

$$V(x(t)) = \tilde{x}^T(t) \tilde{E} \left(\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^e h_i(z(t)) h_j(z(t)) v_k(z(t)) \tilde{X}_{ijk} \right)^{-1} \tilde{x}(t) \quad (34)$$

$$\text{où } \tilde{x}(t), \tilde{E} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ et } \tilde{X}_{ijk} = \begin{bmatrix} X_{jk}^1 & 0 \\ X_{ij}^3 & X_{ij}^4 \end{bmatrix},$$

ainsi que la loi de commande non-PDC donnée par :

$$u(t) = - \left(\sum_{i=1}^r \sum_{k=1}^e h_i(z(t)) v_k(z(t)) F_{ik} \right) \left(\sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^e h_j(z(t)) v_k(z(t)) X_{ik} \right)^{-1} x(t), \quad (35)$$

L'écriture de la dynamique en boucle fermée s'obtient alors de manière classique pour les descripteurs en substituant (35) dans (33) et en considérant le vecteur d'état augmenté

$$\tilde{x}(t) = \begin{bmatrix} x^T(t) & \dot{x}^T(t) \end{bmatrix}^T \text{ [Taniguchi et al. 2001]. Celle-ci est donnée par :}$$

$$\tilde{E} \dot{\tilde{x}}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^e h_i(z(t)) h_j(z(t)) v_k(z(t)) \left((\tilde{A}_{ik} - \tilde{B}_i \tilde{K}_{jk}) \tilde{x}(t) + \tilde{W}_i \varphi(t) \right) \quad (36)$$

$$\text{avec } \tilde{A}_{ik} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ A_i + \Delta A_i(t) & -E_k - \Delta E_k(t) \end{bmatrix}, \quad \tilde{B}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ B_i + \Delta B_h(t) \end{bmatrix}, \quad \tilde{W}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ W_i \end{bmatrix} \text{ et}$$

$$\tilde{K}_{jk} = \begin{bmatrix} F_{jk} \left(\sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^e h_j(z(t)) v_k(z(t)) X_{ik} \right)^{-1} & 0 \end{bmatrix}.$$

Dès lors, des conditions LMI permettant la synthèse non quadratique de (35), robuste aux incertitudes paramétriques et perturbations externes, ont été proposées en considérant le critère H_∞ :

$$\int_{t_0}^{t_f} x^T(t) Q x(t) dt \leq \eta^2 \int_{t_0}^{t_f} \phi^T(t) \phi(t) dt, \quad (37)$$

Ces conditions sont résumées par le théorème suivant.

Théorème 5 [RI10] : Soit, $\forall z(t)$, $\xi = 1, \dots, r$, $\dot{h}_\xi(z(t)) \geq \phi_\xi$ et $\psi = 1, \dots, l$, $\dot{v}_\psi(z(t)) \geq \theta_\psi$. Le descripteur incertain et perturbé (33) est globalement asymptotiquement stabilisé via la loi de commande non-PDC (35), avec un taux d'atténuation des perturbations externes η , s'il existe les matrices $X_{jk}^1 = X_{jk}^T > 0$, X_{ij}^3 , $X_{ij}^4 > 0$ (ou < 0), $R_1 = R_1^T$, $R_2 = R_2^T$ et F_{jk} ainsi que les scalaires positifs $\varepsilon = \eta^2$, τ_{ijk}^1 , τ_{ijk}^2 , τ_{ijk}^3 , τ_{ijk}^4 vérifiant les LMI suivantes pour tout $i, j = 1, \dots, r$ et $k = 1, \dots, e$ sous la contrainte: minimiser ε tq,

$$\left[\begin{array}{c|cc} \Phi_{ijk} & & (*) \\ \hline X_{jk}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Q^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & W_i^T & 0 & 0 & -\varepsilon I \end{array} \right] < 0 \quad (38)$$

$$X_{jk}^1 + R_1 \geq 0 \quad (39)$$

$$X_{jk}^1 + R_2 \geq 0 \quad (40)$$

$$\text{avec } \Phi_{ijk} = \left[\begin{array}{cccccc} \Omega_{ijk}^{(1,1)} & (*) & (*) & (*) & (*) & 0 \\ N_a^i X_{jk}^1 & -\tau_{ijk}^1 I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ N_b^i F_{jk} & 0 & -\tau_{ijk}^2 I & 0 & 0 & 0 \\ N_e^k X_{ij}^3 & 0 & 0 & -\tau_{ijk}^3 I & 0 & 0 \\ (X_{ij}^4)^T + A_i X_{jk}^1 - E_k X_{ij}^3 - B_i F_{jk} & 0 & 0 & 0 & \Omega_{ijk}^{(5,5)} & (*) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N_{ek} X_{ij}^4 & -\tau_{ijk}^4 I \end{array} \right],$$

$$\Omega_{ijk}^{(1,1)} = X_{ij}^3 + (X_{ij}^3)^T - \left(\sum_{\xi=1}^r \phi_\xi (X_{\xi k}^1 + R_1) + \sum_{\psi=1}^l \theta_\psi (X_{i\psi}^1 + R_2) \right)$$

$$\text{et } \Omega_{ijk}^{(5,5)} = -(X_{ij}^4)^T E_k^T - E_k X_{ij}^4 + \tau_{ijk}^1 H_a^i (H_a^i)^T + \tau_{ijk}^2 H_b^i (H_b^i)^T + \tau_{ijk}^3 H_e^k (H_e^k)^T + \tau_{ijk}^4 H_e^k (H_e^k)^T.$$

La preuve de ce théorème peut être consultée dans l'article [RI10] fourni en annexe de ce document.

Notons qu'afin d'aboutir au résultat présenté par le théorème 5, des travaux préliminaires dans le cadre non quadratique ont fait l'objet d'un article dans une conférence internationale [CI21] et de deux autres dans des conférences nationales [CN14][CN16].

Par ailleurs, de nouvelles conditions de stabilité non quadratiques sont apparues pour les systèmes TS standards [Tanaka et al., 2007]. Celles-ci sont basées sur une propriété de redondance analytique des descripteurs [Peaucelle, 2007]. Dans ce cas, le principe consiste à réécrire la dynamique de la boucle fermée d'un système dynamique explicite sous forme descripteur. Ceci conduit à des conditions LMI moins conservatives et réduit leur coût de calcul. Suivant cette idée, nous nous sommes intéressés à étendre ces conditions à la stabilisation non quadratique « redondante » des descripteurs incertains et perturbés. Ainsi, l'écriture redondante d'une dynamique en boucle fermée repose sur la particularité suivante des descripteurs :

Outre leur capacité à décrire des systèmes singuliers, les descripteurs permettent d'associer au sein d'un même système des équations dynamiques (sous forme différentielles) et des équations statiques.

Or, si l'on s'intéresse à la commande d'un système dynamique, on constate que ce problème fait intervenir des équations dynamiques, dans notre cas le descripteur en boucle ouverte (33), et des équations statiques, ici la loi de commande non-PDC (35). L'astuce consiste alors à introduire une dynamique virtuelle au sein des équations statiques. Ainsi, la loi de commande (35) peut être réécrite sous la forme :

$$0_{m \times m} \dot{u}(t) = u(t) + \left(\sum_{i=1}^r \sum_{k=1}^e h_i(z(t)) v_k(z(t)) F_{ik} \right) \left(\sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^e h_j(z(t)) v_k(z(t)) X_{jk} \right)^{-1} x(t), \quad (41)$$

Dès lors, en considérant le vecteur d'état augmenté $\bar{x}(t) = \begin{bmatrix} x^T(t) & \dot{x}^T(t) & u^T(t) \end{bmatrix}$, la dynamique de la boucle fermée peut-être réécrite sous la forme :

$$\bar{E} \dot{\bar{x}}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{k=1}^e h_i(z(t)) v_k(z(t)) (\bar{G}_{ik} \bar{x}(t) + \bar{W}_i \varphi(t)) \quad (42)$$

$$\text{où } \bar{G}_{ik} = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 \\ A_i + \Delta A_i(t) & -E_k - \Delta E_k(t) & B_i + \Delta B_i(t) \\ F_{jk} \left(\sum_{j=1}^r \sum_{p=1}^e h_j(z(t)) v_p(z(t)) X_{jp} \right)^{-1} & 0 & I \end{bmatrix}, \bar{W}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ W_i \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{et } \bar{E} = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Par conséquent, s'il peut être établi que le descripteur (42) est stable, c'est-à-dire que $x(t)$ et $u(t)$ convergent vers zéro, alors les gains F_{jk} et X_{jp} existent et le descripteur incertain et perturbé (33) est stabilisé par la loi de commande non-PDC (35).

Notons par ailleurs qu'à l'instar de la boucle fermée classique (35), la boucle fermée redondante (42) permet de découpler les matrices d'entrée B_i et $\Delta B_i(t)$ des matrices de gains

du contrôleur non-PDC $F_{jk} \left(\sum_{j=1}^r \sum_{p=1}^e h_j(z(t)) v_p(z(t)) X_{jp} \right)^{-1}$. Ce couplage constitue une source

de conservatisme bien connue dans la majorité des travaux sur la commande des systèmes TS [Sala, 2009]. L'approche redondante proposée permet donc de palier ce problème. Des conditions LMI sont proposées au théorème suivant en considérant la fonction de Lyapunov non quadratique :

$$V(x(t)) = \bar{x}^T(t) \bar{E} \left(\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^e h_i(z(t)) h_j(z(t)) v_k(z(t)) \bar{X}_{ijk} \right)^{-1} \bar{x}(t) \quad (43)$$

$$\text{où } \bar{X}_{ijk} = \begin{bmatrix} X_{jk}^1 & 0 & 0 \\ X_{ij}^4 & X_{ij}^5 & X_{ij}^6 \\ X_{jk}^7 & X_{jk}^8 & X_{jk}^9 \end{bmatrix}.$$

Théorème 6 [RI10]: Soit, $\forall z(t)$, $\xi = 1, \dots, r$, $\dot{h}_\xi(z(t)) \geq \phi_\xi$ et $\psi = 1, \dots, l$, $\dot{v}_\psi(z(t)) \geq \theta_\psi$. Le descripteur incertain et perturbé (33) est globalement asymptotiquement stabilisé via la loi de commande non-PDC (35), avec un taux d'atténuation des perturbations externes η , s'il existe les matrices $X_{jk}^1 = (X_{jk}^1)^T > 0$, X_{ij}^4 , $X_{ij}^5 > 0$ (ou < 0), X_{ij}^6 , X_{jk}^7 , X_{jk}^8 , $X_{jk}^9 > 0$ (ou < 0), $R_1 = R_1^T$, $R_2 = R_2^T$ et F_{ik} ainsi que les scalaires positifs $\varepsilon = \mu^2$, λ_{ijk}^1 , λ_{ijk}^2 , λ_{ijk}^3 , λ_{ijk}^4 , λ_{ijk}^5 , λ_{ijk}^6 et λ_{ijk}^7 vérifiant les LMI suivantes, pour tout $i, j = 1, \dots, r$ et $k = 1, \dots, e$, sous la contrainte de minimiser ε tq,

$$\left[\begin{array}{c|c} \Upsilon_{ijk} & (*) \\ \hline X_{jk}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Q^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & W_i^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon I \end{array} \right] < 0 \quad (44)$$

$$X_{jk}^1 + R_1 \geq 0 \quad (45)$$

$$X_{jk}^1 + R_2 \geq 0 \quad (46)$$

avec

$$\Upsilon_{ijk} = \left[\begin{array}{cccccccccc} \Xi_{ijk}^{(1,1)} & (*) & (*) & (*) & (*) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ N_a^i X_{jk}^1 & -\lambda_{ijk}^1 I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ N_e^k X_{ij}^4 & 0 & -\lambda_{ijk}^2 I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ N_b^i X_{jk}^7 & 0 & 0 & -\lambda_{ijk}^3 I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Xi_{ijk}^{(5,1)} & 0 & 0 & 0 & \Xi_{ijk}^{(5,5)} & (*) & (*) & (*) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N_e^k X_{ij}^5 & -\lambda_{ijk}^4 I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N_b^i X_{jk}^8 & 0 & -\lambda_{ijk}^5 I & 0 & 0 & 0 \\ \Xi_{ijk}^{(8,1)} & 0 & 0 & 0 & \Xi_{ijk}^{(8,5)} & 0 & 0 & X_{jk}^9 + (X_{jk}^9)^T & (*) & (*) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_e^k X_{ij}^6 & -\lambda_{ijk}^6 I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_b^i X_{jk}^9 & 0 & -\lambda_{ijk}^7 I \end{array} \right]$$

$$\Xi_{ijk}^{(1,1)} = X_{ij}^4 + (X_{ij}^4)^T - \left(\sum_{\xi=1}^r \phi_{\xi} (X_{\xi k}^1 + R_1) + \sum_{\psi=1}^l \theta_{\psi} (X_{j\psi}^1 + R_2) \right), \quad \Xi_{ijk}^{(8,1)} = (X_{ij}^6)^T + F_{ik} + X_{jk}^7,$$

$$\Xi_{ijk}^{(5,1)} = A_i X_{jk}^1 - E_k X_{ij}^4 + (X_{ij}^5)^T + B_i X_{jk}^7, \quad \Xi_{ijk}^{(8,5)} = -(X_{ij}^6)^T E_k^T + (X_{jk}^9)^T B_i^T + X_{jk}^8 \text{ et}$$

$$\begin{aligned} \Xi_{ijk}^{(5,5)} = & -E_k X_{ij}^5 - (X_{ij}^5)^T E_k^T + B_i X_{jk}^8 + (X_{jk}^8)^T B_i^T + \lambda_{ijk}^1 H_a^i (H_a^i)^T + (\lambda_{ijk}^2 + \lambda_{ijk}^4) H_e^k (H_e^k)^T \\ & + (\lambda_{ijk}^3 + \lambda_{ijk}^5) H_b^i (H_b^i)^T + \lambda_{ijk}^6 (H_e^k)^T H_e^k + \lambda_{ijk}^7 (H_b^i)^T H_b^i \end{aligned}$$

La preuve de ce théorème peut être consultée dans l'article [RI10] fourni en annexe de ce document.

Remarque 3: Les conditions LMI proposées au théorème 5 sont un cas particulier de celles proposées au théorème 6, qui sont donc moins conservatives. En effet, en considérant la fonction candidate de Lyapunov non quadratique (43), on constate que seules les matrices X_{jk}^1 sont nécessaires, les autres matrices sont par conséquent des variables de décisions libres. Ainsi, en remplaçant X_{ij}^4 , X_{ij}^5 et X_{jk}^7 respectivement par X_{ij}^3 , X_{ij}^4 et $-F_{jk}$ et en considérant $X_{ij}^6 = 0$, $X_{jk}^8 = 0$ et $X_{jk}^9 = 0$, on retrouve la fonction candidate non quadratique de Lyapunov (34) et, à partir des LMI (44) on peut retrouver les LMI (38).

Ce point a été illustré au travers d'un exemple académique dans [RI10]. Pour cet exemple la figure 7 montre les domaines de faisabilité des conditions LMI proposées aux théorèmes 5 et 6 tandis que la figure 8 présente l'évolution des taux de performances H_{∞} obtenus pour différentes valeurs d'un paramètre du modèle étudié.

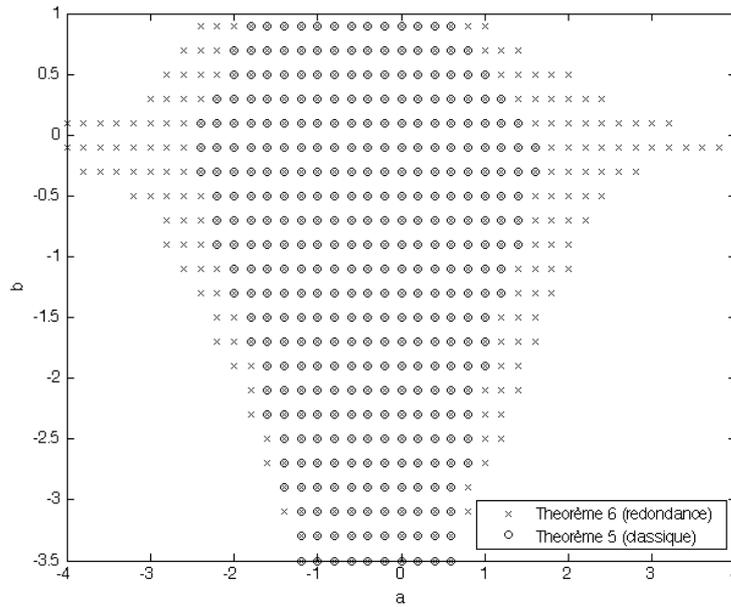


Figure 7 : Domaines de faisabilité obtenus au travers d'un exemple académique [RI10].

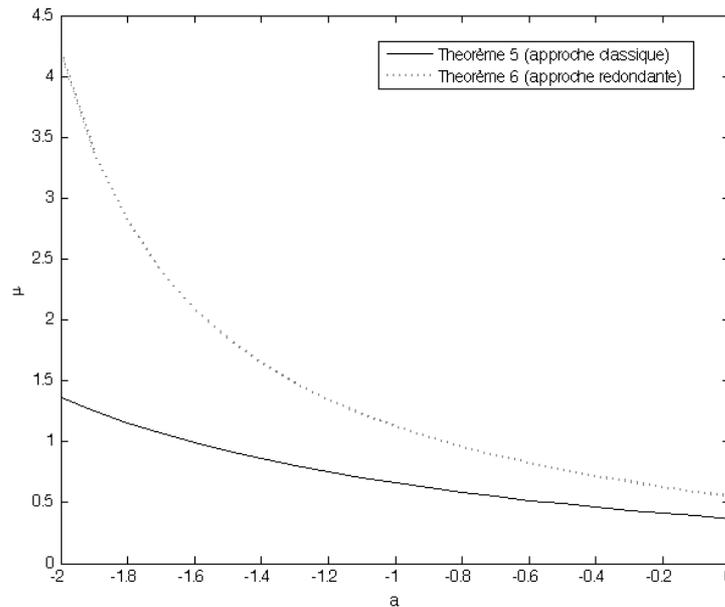


Figure 8 : Comparaison des taux d'atténuation des perturbations externes obtenus au travers d'un exemple académique [RI10].

L'approche redondante pour la stabilisation des descripteurs a fait l'objet d'un article de conférence internationale [CI22] puis d'un article dans une revue internationale proposant une synthèse comparative des approches de stabilisations non quadratiques classiques et redondantes pour les descripteurs TS incertains et perturbés [RI10].

Parallèlement aux travaux de thèse de Tahar Bouarar sur la stabilisation non quadratique des descripteurs TS, une thèse était en cours sur la conception et la commande d'une machine de rééducation des membres inférieurs (Lynda Seddiki). Ces travaux à caractère applicatif seront décrits dans la section 6.1. Néanmoins, dans le cadre de cette thèse, une extension des travaux sur la stabilisation des descripteurs TS mais sur le suivi de trajectoire a été proposée. En effet, des conditions de stabilisation en suivi de trajectoires des descripteurs TS, tenant compte de perturbations externes, ont été proposées et ont donné lieu à publications dans une revue internationale [RI9], un chapitre d'ouvrage [CH1], une conférence internationale [CI24] et une nationale [CN8].

Enfin, poursuivant nos travaux sur la stabilisation des descripteurs TS, nous nous intéressons actuellement, dans le cadre de nos travaux au sein du **GIS 3SGS**¹⁷ et d'une thèse en cotutelle démarrée en 2008 (Dalel Jabri), à la stabilisation des systèmes non linéaires de grandes dimensions [Tseng et Chen, 2001]. Ainsi, par le biais de l'approche de découpage en secteurs non linéaires, ce type de systèmes peut-être représenté par un ensemble de n descripteurs TS interconnectés décrits par :

$$\sum_{j=1}^{e_i} v_i^j(z(t)) E_i^j \dot{x}_i(t) = \sum_{k=1}^{r_i} h_i^k(z(t)) \left[A_i^k x_i(t) + B_i^k u_i(t) + \sum_{\substack{\alpha=1 \\ \alpha \neq i}}^n F_{i\alpha}^k x_\alpha(t) \right], \quad i = 1, \dots, n \quad (47)$$

où $x_i(t)$ correspond à la $i^{\text{ème}}$ portion du vecteur d'état

$$x(t) = \left[x_1^T(t) \quad \dots \quad x_i^T(t) \quad \dots \quad x_n^T(t) \right]^T \quad \text{et} \quad \sum_{\substack{\alpha=1 \\ \alpha \neq i}}^n F_{i\alpha}^k x_\alpha(t) \quad \text{décrit l'influence des } n-1$$

descripteurs sur le $i^{\text{ème}}$.

L'approche de commande proposée relève du concept de commande décentralisée. Celle-ci permet d'associer à chaque sous-système i un contrôleur non-PDC indépendant donné par :

$$u_i(t) = - \left(\sum_{j=1}^{r_i} \sum_{k=1}^{e_i} h_i^k(z(t)) v_i^j(z(t)) F_i^{jk} \right) \left(\sum_{j=1}^{r_i} \sum_{k=1}^{e_i} h_i^k(z(t)) v_i^j(z(t)) X_{ik} \right)^{-1} x_i(t), \quad i = 1, \dots, n \quad (48)$$

¹⁷ Groupement d'Intérêt Scientifique « Surveillance, Sûreté et Sécurité des Grands Systèmes ».

L'objectif consiste donc à proposer la synthèse de chacun des n contrôleurs locaux tout en garantissant la stabilité du système en boucle fermée dans son ensemble. La figure 9 présente, de manière schématique, la structure de commande décentralisée retenue. Afin de proposer une méthodologie de synthèse de lois commandes décentralisées (48), une nouvelle fonction candidate non quadratique de Lyapunov multiple est considérée :

$$V(x(t)) = \sum_{i=1}^n v_i(x(t)) \quad (49)$$

$$\text{avec } v_i(x(t)) = \tilde{x}_i^T(t) \tilde{E}_i \left(\sum_{g=1}^{r_i} \sum_{j=1}^{r_i} \sum_{k=1}^{e_i} h_i^g(z(t)) h_i^j(z(t)) v_i^k(z(t)) \tilde{X}_{gjk} \right)^{-1} \tilde{x}_i(t),$$

$$\tilde{x}_i(t) = \begin{bmatrix} x_i(t) & \dot{x}_i(t) \end{bmatrix}^T, \quad \tilde{E}_i = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ et } \tilde{X}_{gjk} = \begin{bmatrix} X_{jk}^1 & 0 \\ X_{gj}^3 & X_{gj}^4 \end{bmatrix}.$$

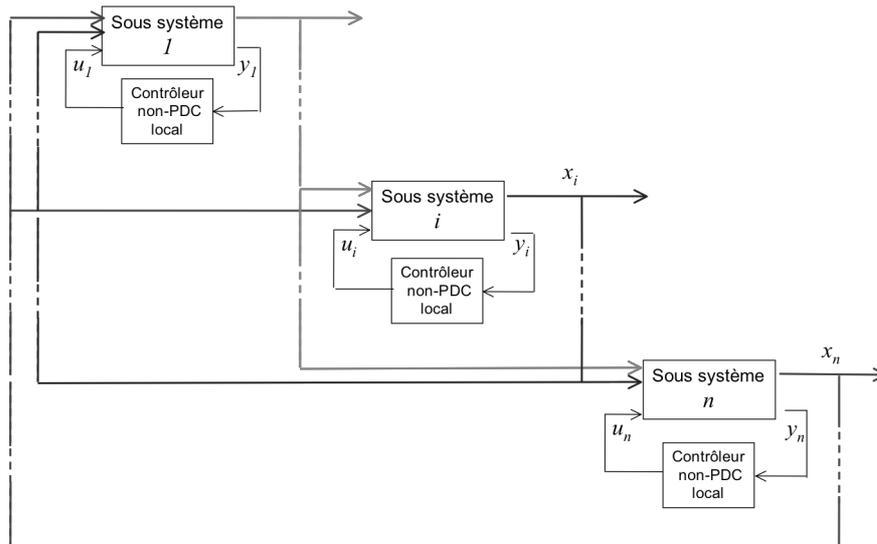


Figure 9 : Structure de commande décentralisée adoptée pour les systèmes TS de grande dimension.

À ce stade et dans le cadre de ces travaux, de nouvelles conditions LMI ont été proposées permettant la synthèse de correcteurs décentralisés garantissant un niveau de performance H_∞ relatif à la minimisation de l'influence des interconnexions entre systèmes locaux. Trois articles dans des conférences internationales [CI27][CI25][CI23] et deux autres dans des conférences nationales [CN18][CN17] ont été publiés.

Remarque 4: L'objectif recherché dans les approches descripteurs précédentes n'est pas de traiter la question de la non-impulsivité des systèmes singuliers [Dai, 1989] qui reste ouverte dans le cadre TS. En effet, l'emploi du vecteur d'état étendu $\tilde{x}(t) = \begin{bmatrix} x^T(t) & \dot{x}^T(t) \end{bmatrix}^T$ ne permet pas de garantir la non-impulsivité du descripteur TS (33) [Marx et Ragot, 2006][Marx et Ragot, 2008]. Néanmoins, l'écriture sous forme descripteur d'un système dynamique, même lorsque celui-ci est non singulier, permet d'introduire des variables de décisions libres qui confèrent aux conditions LMI un plus grand nombre de degrés de liberté et donc un conservatisme réduit.

5.2.3. Stabilisation non quadratique par retour de sortie des systèmes TS

En parallèle des travaux sur la stabilisation des systèmes descripteurs, une autre voie que nous avons souhaité emprunter concerne la stabilisation robuste des systèmes TS par retour de sortie. Ainsi, ayant déjà étudié le cas du retour de sortie avec observateur [RI5], l'idée était dans un premier temps de s'intéresser à la commande par retour de sortie dynamique.

Tirant profit de l'arrivée de Madjid Zerar à Reims dans le cadre d'un poste d'ATER en 2006 et, ayant lui-même travaillé sur la commande robuste des systèmes LPV¹⁸ au cours de sa thèse à l'Université de Bordeaux 1, nous avons développé une méthodologie de synthèse de lois de commande robustes en retour de sortie dynamique pour les systèmes TS basée sur l'approche LFT¹⁹ [Redheffer, 1960]. Ce type d'approches, souvent basé sur un problème d'optimisation H_∞ a largement été utilisé pour les systèmes LPV [Zhou et al. 1996][Apkarian et al. 1993][Doll, 2001]. Néanmoins, en ce qui concerne la commande des systèmes TS, celle-ci est assez peu étendue. En effet, quelques travaux ont traité de la synthèse quadratique de contrôleurs dynamiques [Li et al., 2000][Nguang et Shi, 2006]. Ceux-ci conduisent à des conditions BMI ou, dans le meilleur des cas, LMI au prix de restrictions de modélisations (équations de sortie linéaires...). Ainsi, similairement aux approches robustes proposées dans le cadre LPV, le diagramme de commande retenu sous forme de LFT basse est présenté figure 10.

La classe des systèmes non linéaires considérés est représentée par les modèles TS :

¹⁸ Systèmes Linéaires à Paramètres Variants.

¹⁹ Linear Fractional Transformation.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) (A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i x(t) \end{cases} \quad (50)$$

Le contrôleur dynamique par retour de sortie proposé repose sur le concept PDC. Celui-ci est donné par :

$$\begin{cases} \dot{x}^c(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) h_k(z(t)) (A_{ijk}^c x^c(t) + B_{jk}^c y(t)) \\ u(t) = \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r h_j(z(t)) h_k(z(t)) (C_{jk}^c x^c(t) + D_k^c y(t)) \end{cases} \quad (51)$$

où $x^c(t)$ est le vecteur d'état du contrôleur dynamique, A_{ijk}^c , B_{jk}^c , C_{jk}^c et D_k^c sont les matrices de gains du contrôleur à synthétiser.

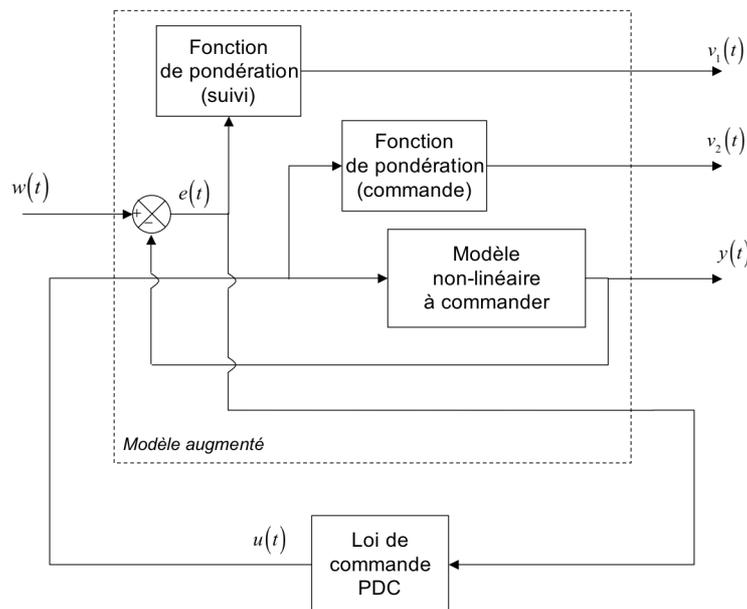


Figure 10 : Diagramme de commande, LFT basse [RI2].

Deux fonctions de pondérations linéaires permettent de spécifier les dynamiques du suivi de consigne et de commande. Celles-ci sont données respectivement par :

$$\begin{cases} \dot{x}_e(t) = A_e x_e(t) + B_e e(t) \\ v_1(t) = C_e x_e(t) + D_e e(t) \end{cases} \quad (52)$$

et

$$\begin{cases} \dot{x}_u(t) = A_u x_u(t) + B_u u(t) \\ v_2(t) = C_u x_u(t) + D_u u(t) \end{cases} \quad (53)$$

où $e(t)$ est l'erreur de poursuite entre le vecteur de sortie $y(t)$ et l'entrée exogène (consigne) $w(t)$, $x_e(t)$ est un vecteur d'état relatif à la dynamique souhaitée de l'erreur de poursuite, $x_u(t)$ est un vecteur d'état relatif à la dynamique souhaitée de la commande, $v_1(t)$ et $v_2(t)$ sont les vecteurs de sorties contrôlées, A_e , B_e , C_e , D_e , A_u , B_u , C_u et D_u sont des matrices de dimensions appropriées permettant de spécifier les dynamiques souhaitées de (52) et (53).

Dès lors, par le biais du produit de Redheffer [Redheffer, 1960], la dynamique en boucle fermée est exprimée par **[RI2]**:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) h_k(z(t)) \tilde{A}_{ijk} \tilde{x}(t) + \tilde{B} w(t) \\ v(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) h_k(z(t)) \tilde{C}_{ijk} \tilde{x}(t) + \tilde{D} w(t) \end{cases} \quad (54)$$

où $\tilde{x}(t) = \begin{bmatrix} x_e^T(t) & x_u^T(t) & x^T(t) \end{bmatrix}^T$ est le vecteur d'état augmenté,

$v(t) = \begin{bmatrix} v_1^T(t) & v_2^T(t) \end{bmatrix}^T$ est le vecteur des sorties contrôlées

et $\tilde{A}_{ijk} = \begin{bmatrix} \bar{A}_i + \bar{B}_{2j} D_k^c \bar{C}_{2i} & \bar{B}_{2j} C_i \\ B_{jk}^c \bar{C}_{2j} & A_{ijk}^c \end{bmatrix}$, $\tilde{B} = \begin{bmatrix} \bar{B}_1 \\ 0 \end{bmatrix}$, $\tilde{C}_{ijk} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{1i} + \bar{D}_{12} D_k^c \bar{C}_{2i} & \bar{D}_{12} C_{jk}^c \end{bmatrix}$,

$\tilde{D} = \begin{bmatrix} D_e \\ 0 \end{bmatrix}$ avec $\bar{A}_i = \begin{bmatrix} A_e & 0 & -B_e C_i \\ 0 & A_u & 0 \\ 0 & 0 & A_i \end{bmatrix}$, $\bar{B}_1 = \begin{bmatrix} B_e \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, $\bar{B}_{2i} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_u \\ B_i \end{bmatrix}$, $\bar{D}_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ D_u \end{bmatrix}$,

$$\bar{C}_{1i} = \begin{bmatrix} C_e & 0 & -D_e C_i \\ 0 & C_u & 0 \end{bmatrix} \text{ et } \bar{C}_{2i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & C_i \end{bmatrix}.$$

Enfin, sur la base de la dynamique exprimée de la boucle fermée (54), la synthèse d'un contrôleur PDC robuste (51) peut être réalisée en minimisant le critère H_∞ :

$$\int_{t_0}^{t_f} v^T(t) Q v(t) dt \leq \eta^2 \int_{t_0}^{t_f} w^T(t) w(t) dt, \quad (55)$$

visant à atténuer l'effet de l'entrée exogène $w(t)$ sur la sortie contrôlée $v(t)$. Des conditions LMI ont été proposées par le biais d'une décomposition en valeurs singulières et sur la base d'une fonction candidate de Lyapunov quadratique. Pour plus de détails sur celle-ci, le lecteur pourra se reporter à l'article [RI2] fourni en annexe de ce manuscrit. Par ailleurs, ces travaux ont également donné lieu à une conférence internationale [CI14] et une nationale [CN13].

Remarque 5: Ces premiers résultats obtenus pour un retour de sortie dynamique, basés sur une fonction candidate de Lyapunov quadratique, s'avèrent très conservatifs. En effet, l'apparition du grand nombre de termes couplés (entre la loi de commande et le système à commander) lors de l'écriture de la dynamique en boucle fermée (54) rend assez difficile la mise sous forme LMI des conditions de stabilité et infructueuse nos tentatives d'extension dans le contexte non quadratique.

Face à ce constat, la question suivante se pose pour proposer des conditions LMI moins conservatives pour la synthèse de contrôleurs dynamiques par retour de sortie :

Ne peut-on pas réécrire la dynamique de la boucle fermée d'un problème de commande dynamique en retour de sortie de manière à réduire le nombre de termes croisés entre la commande et les matrices du système?

Tirant parti des connaissances acquises sur les systèmes descripteurs et en particulier de leurs capacités à associer des équations dynamiques et statiques au sein d'un même système, nous avons proposé de traiter ce problème par une réécriture redondante de la dynamique de

la boucle fermée sous forme descripteur. De cette manière, une méthodologie de synthèse de lois de commande robustes par retour de sortie dynamique des systèmes TS incertains et perturbés a pu être proposée en termes de LMI [RI7]. Dans ce cas, la classe des systèmes étudiés est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [(A_i + \Delta A_i)x(t) + (B_i + \Delta B_i)u(t) + F_i\varphi(t)] \\ y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [(C_i + \Delta C_i)x(t) + (D_i + \Delta D_i)u(t) + G_i\varphi(t)] \end{cases} \quad (56)$$

Afin d'aboutir à des conditions non quadratiques, on propose la loi de commande dynamique non-PDC par retour de sortie suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}^*(t) = \left(\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) A_i^* \right) \left(\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) W_6^i \right)^{-1} x^*(t) + \left(\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) B_i^* \right) \left(\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) W_{11}^i \right)^{-1} y(t) \\ u(t) = \left(\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i^* \right) \left(\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) W_6^i \right)^{-1} x^*(t) + \left(\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) D_i^* \right) \left(\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) W_{11}^i \right)^{-1} y(t) \end{cases} \quad (57)$$

où $x^*(t) \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état du contrôleur dynamique, $A_i^* \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_i^* \in \mathbb{R}^{n \times q}$, $C_i^* \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $D_i^* \in \mathbb{R}^{m \times q}$, $W_6^i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ et $W_{11}^i \in \mathbb{R}^{q \times q}$ sont les matrices du contrôleur à synthétiser.

On constate que les systèmes (56) et (57) font intervenir deux équations statiques (équations de sortie). En tenant compte du principe de redondance, il est possible d'introduire deux dynamiques virtuelles au sein de ces équations. Celles-ci s'écrivent alors sous la forme :

$$\begin{aligned} 0_{m \times m} \dot{u}(t) = & -u(t) + \left(\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i^* \right) \left(\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) W_6^i \right)^{-1} x^*(t) \\ & + \left(\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) D_i^* \right) \left(\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) W_{11}^i \right)^{-1} y(t) \end{aligned} \quad (58)$$

$$\text{et } 0_{q \times q} \dot{y}(t) = -y(t) + \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [(C_i + \Delta C_i)x(t) + (D_i + \Delta D_i)u(t) + G_i\varphi(t)] \quad (59)$$

Par conséquent, en considérant le vecteur d'état augmenté $\tilde{x}(t) = \begin{bmatrix} x^T(t) & x^{*T}(t) & y^T(t) & u^T(t) \end{bmatrix}^T$, la dynamique de la boucle fermée peut être exprimée sous une forme descripteur par :

$$\tilde{E}\dot{\tilde{x}}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \left((\tilde{A}_i + \Delta\tilde{A}_i) \tilde{x}(t) + \tilde{F}_i \varphi(t) \right) \quad (60)$$

$$\text{avec } \tilde{A}_i = \begin{bmatrix} A_i + \Delta A_i(t) & 0 & 0 & B_i + \Delta B_i(t) \\ 0 & A_i^* \left(\sum_{j=1}^r h_j(z(t)) W_6^j \right)^{-1} & B_i^* \left(\sum_{j=1}^r h_j(z(t)) W_{11}^j \right)^{-1} & 0 \\ C_i + \Delta C_i(t) & 0 & -I & D_i + \Delta D_i(t) \\ 0 & C_i^* \left(\sum_{j=1}^r h_j(z(t)) W_6^j \right)^{-1} & D_i^* \left(\sum_{j=1}^r h_j(z(t)) W_{11}^j \right)^{-1} & -I \end{bmatrix},$$

$$\tilde{E} = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ et } \tilde{F}_h = \begin{bmatrix} F_i \\ 0 \\ G_i \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Dès lors, s'il peut être établi que le descripteur (60) est stable, alors le système TS incertain et perturbé (56) est stabilisé par le contrôleur dynamique non-PDC par retour de sortie (57). Les matrices de la loi de commande et du système étant ainsi découplées au sein de la nouvelle écriture de la dynamique de la boucle fermée (60), l'obtention de conditions LMI dans le cadre non quadratique a été facilitée en utilisant les techniques d'analyse dévolues aux descripteurs (voir l'article **[RI7]** fourni en annexe pour plus de détails sur l'obtention des conditions LMI). Ces conditions ont été obtenues en considérant la fonction candidate non quadratique de Lyapunov:

$$v(x(t), x^*(t)) = \tilde{x}^T(t) \tilde{E} \left(\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \tilde{W}_i \right)^{-1} \tilde{x}(t) \quad (61)$$

$$\text{avec } \tilde{W}_h = \begin{bmatrix} W_1^i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_6^i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W_{11}^i & 0 \\ W_{13}^i & W_{14}^i & W_{15}^i & W_{16}^i \end{bmatrix},$$

ainsi qu'un critère H_∞ permettant de minimiser l'influence des perturbations externes $\varphi(t)$.

Notons par ailleurs que le conservatisme de l'approche proposée a été évalué en comparaison des travaux de [Li et al. 2000] sur la synthèse quadratique de contrôleur dynamique en retour de sortie au travers d'un exemple numérique, c.f. figure 11.

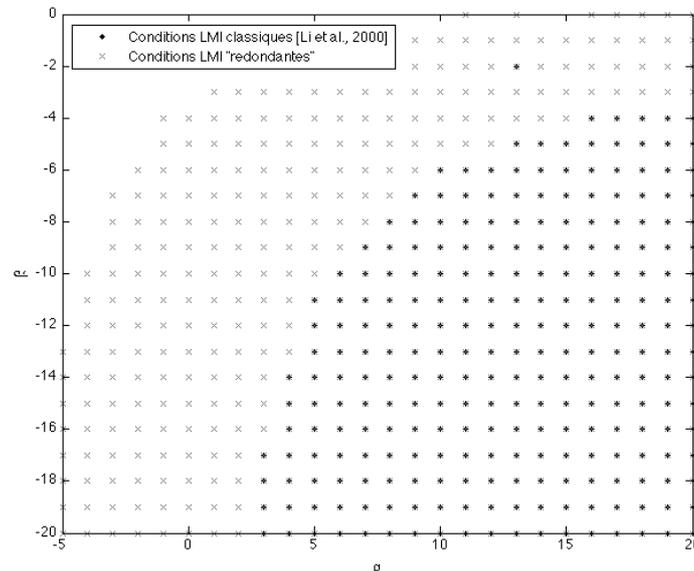


Figure 11 : Comparaison du conservatisme de l'approche redondante en retour de sortie dynamique vis-à-vis de travaux antérieurs [R17].

Suite à ces travaux et afin de compléter nos contributions à la synthèse de contrôleurs par retour de sortie, nous nous sommes penchés sur le cas des lois de commande par retour de sortie statique. Ces dernières suscitent un certain intérêt pour la communauté automatique, en particulier dans le cadre d'applications [Syrmos et al., 1997]. En effet, à l'instar des approches de commande dynamiques présentées précédemment (contrôleurs dynamiques, ajout d'un observateur), la commande par retour de sortie statique ne nécessite aucune résolution d'ODE en ligne. Il en résulte une plus grande facilité d'implémentation et de mise en œuvre pour un coût de calcul en ligne fortement réduit. Des travaux existent sur la commande par retour de sortie statique des systèmes TS et conduisent à des conditions LMI

[Chadli et al., 2002] ou BMI [Huang et Nguang, 2006][Huang et Nguang, 2007]. Néanmoins, le caractère quadratique de ces approches reste source de conservatisme. De plus, ces conditions sont obtenues au prix d'hypothèses restrictives de modélisation ($C_i = C$ commune et de rang plein en ligne, $D_i = 0 \dots$) et de changements de variables rendant difficile (voir impossible?) leur extension au cadre non quadratique. Ce dernier point constituait jusqu'alors un verrou communément admis des problèmes de commande par retour de sortie. Cela dit, ayant montré que ces verrous pouvaient être levés dans le cas de contrôleurs dynamiques, il est possible de transposer l'approche redondante au cas de la synthèse non quadratique de contrôleurs robustes par retour de sortie statique pour les systèmes TS incertains et perturbés (56).

Ainsi, la loi de commande non-PDC par retour de sortie statique proposée est donnée sous sa forme redondante par :

$$0_{m \times m} u(t) = -u(t) + \left(\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) L_i \right) \left(\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) W_i^s \right)^{-1} y(t) \quad (62)$$

où $L_i \in \mathbb{R}^{m \times q}$ et $W_i^s \in \mathbb{R}^{q \times q}$ sont les matrices de gains à synthétiser.

Considérant (56), (59), (62) et le vecteur d'état augmenté $\tilde{x}(t) = \begin{bmatrix} x^T(t) & y^T(t) & u^T(t) \end{bmatrix}^T$, la dynamique de la boucle fermée est décrite par le descripteur :

$$\tilde{E} \dot{\tilde{x}}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) (\tilde{A}_i \tilde{x}(t) + \tilde{F}_i \varphi(t)) \quad (63)$$

$$\text{avec } \tilde{E} = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tilde{A}_i = \begin{bmatrix} A_i + \Delta A_i(t) & 0 & B_i + \Delta B_i(t) \\ C_i + \Delta C_i(t) & -I & D_i + \Delta D_i(t) \\ 0 & L_i \left(\sum_{j=1}^r h_j(z(t)) W_j^s \right)^{-1} & -I \end{bmatrix}$$

$$\text{et } \tilde{F}_i = \begin{bmatrix} F_i \\ G_i \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Dès lors, s'il peut être établi que le descripteur (63) est stable, alors le système TS incertain et perturbé (56) est stabilisé par la loi de commande non-PDC par retour de sortie statique (62).

Une fois de plus, les matrices de la loi de commande et du système sont découplées au sein de la nouvelle écriture de la dynamique de la boucle fermée (63). L'obtention de conditions LMI dans le cadre non quadratique est donc facilitée en appliquant les techniques d'analyse dévolues aux descripteurs. Ces conditions sont obtenues par le biais de la fonction candidate non quadratique de Lyapunov :

$$v(x(t), x^*(t)) = \tilde{x}^T(t) \tilde{E} \left(\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \tilde{W}_i \right)^{-1} \tilde{x}(t) \quad (64)$$

$$\text{avec } \tilde{W}_i = \begin{bmatrix} W_1^i & 0 & 0 \\ 0 & W_5^i & 0 \\ W_6^i & W_7^i & W_8^i \end{bmatrix},$$

ainsi que d'un critère H_∞ minimisant l'influence des perturbations externes $\varphi(t)$.

Cette approche a été publiée dans une conférence internationale [CI26] (fournie en annexe), pour le cas de la stabilisation de (56) sans incertitudes paramétriques. De plus, l'extension à la stabilisation robuste des systèmes incertains et perturbés fait l'objet d'un article soumis dans une revue internationale [RS4].

Remarque 6 : Notons qu'à notre connaissance, ces travaux constituent les premiers résultats disponibles pour la synthèse de loi de commande par retour de sortie (statique ou dynamique) dans le contexte non quadratique. De plus, très récemment, ces travaux ont été étendus à la commande non quadratique décentralisée par retours de sorties statiques des systèmes TS interconnectés (47) (de grande dimension) et ont conduit à la publication de deux articles dans des conférences internationales [CI30][CI29].

5.3. Alternatives aux problèmes rencontrés dans le cadre non quadratique

Les travaux présentés ci-dessus traitent principalement de problèmes liés à la nature des systèmes étudiés (descripteurs TS...) ainsi que de l'obtention de conditions LMI au regard des structures de commande employées (suivi de trajectoire, retour de sortie...). Tenant compte de techniques récentes de réduction du conservatisme, ces approches ont été proposées dans le cadre non quadratique. Toutefois, le but de ces études n'était pas de répondre aux problèmes inhérents au contexte non quadratique et, en particulier à l'utilisation d'une fonction floue de Lyapunov. En effet, bien que moins conservatives, les conditions de stabilité des modèles TS basées sur l'utilisation de ce type de fonction de Lyapunov font intervenir les dérivées temporelles des fonctions d'appartenance. Celles-ci apparaissent lors de l'application de la méthode directe de Lyapunov qui, si l'on en restait là, conduiraient à des conditions non-convexes que nous ne pourrions résoudre avec les algorithmes d'optimisation actuels. Afin de contourner ce problème, la majorité des travaux (dont ceux présentés précédemment) propose de borner les dérivées des fonctions d'appartenance. Néanmoins, l'emploi de ces approches suppose que l'on puisse connaître ces bornes avant de résoudre le problème LMI d'analyse de stabilité (ou de synthèse de lois de commande). Cette hypothèse est somme toute difficile à garantir (voir souvent impossible), en particulier en stabilisation, puisque cela supposerait que l'on connaisse les limites variationnelles de la dynamique de la boucle fermée avant même que celle-ci ne soit synthétisée. Ce point ayant longtemps constitué un verrou, il nous a semblé plus judicieux de l'aborder, dans un premier temps, sur des problèmes simples d'analyse de stabilité et de stabilisation des modèles TS (sans incertitudes ni perturbations externes).

5.3.1. Utilisation d'une fonction de Lyapunov sous forme d'intégrale curviligne

Afin de palier le problème décrit ci-dessus, nous nous sommes dans un premier temps intéressés à des travaux récents faisant intervenir un autre type de fonctions non quadratiques de Lyapunov donné sous la forme d'une intégrale curviligne (*Line integral Lyapunov functions*). Dans le cadre de la stabilisation des modèles TS, celle-ci est donnée par [Rhee et Won, 2006]:

$$v(x(t)) = 2 \int_{\Gamma(0,x(t))} f(\theta) d\theta \quad (65)$$

où $\Gamma(0,x(t))$ est un chemin quelconque allant de l'origine du système à son état courant et où $f(x(t)) \in \mathbb{R}^n$ est une fonction vectorielle de l'état similaire à la notion physique de vecteur force.

Ainsi, (65) peut être interprétée comme le travail d'une force, c'est-à-dire comme l'énergie fournie par cette force lorsque son point d'application se déplace le long de $\Gamma(0,x(t))$. Néanmoins, pour que (65) puisse être une fonction candidate de Lyapunov, une condition nécessaire d'indépendance du chemin doit être vérifiée [Zill et Gullen, 2000].

Celle-ci est traduite, en considérant $f(x(t)) = \begin{bmatrix} f_1(x(t)) & \cdots & f_n(x(t)) \end{bmatrix}^T$, par :

$$\frac{\partial f_i(x)}{\partial x_j} = \frac{\partial f_j(x)}{\partial x_i}, \text{ pour tout } i, j = 1, \dots, n \quad (66)$$

Basés sur cette approche, des résultats LMI (stabilité) et BMI (stabilisation) ont été proposés [Rhee et Won, 2006]. Une tentative d'extension de ces travaux à des conditions LMI en stabilisation a été proposée dans [Li et al., 2008]. Cependant, dans cette dernière étude, les conditions ne vérifient pas (66) et ne sont, par conséquent, pas valables. Dans le cadre de notre collaboration avec le LAMIH, nous nous sommes penchés sur ce point et nous avons montré que, pour aboutir à des conditions LMI en stabilisation, la contrainte (66) conduit à des conditions extrêmement contraignantes et restrictives qui réduisent considérablement l'intérêt et l'applicabilité de telles fonctions de Lyapunov. Ce constat, peu encourageant pour ce type d'approche, a fait l'objet d'une correspondance publiée dans une revue internationale [RI8].

5.3.2. Stabilisation non quadratique locale des systèmes TS

Après avoir constaté les difficultés relatives à l'utilisation de fonctions de Lyapunov non quadratiques sous forme d'intégrales curvilignes [Rhee et Won, 2006][RI8], et en poursuivant notre collaboration avec le Professeur T.M. Guerra du LAMIH, nous nous

sommes tournés vers une autre piste. Celle-ci se base sur la redéfinition des objectifs d'analyse des modèles TS qui, jusque-là, consistaient majoritairement à proposer des conditions de stabilité globales. Cependant, une approche locale pour l'analyse des systèmes TS peut souvent être justifiée. En effet, lorsque l'approche de décomposition en secteurs non linéaires est employée, le représentant TS n'est souvent valable que sur un sous-espace compact de l'espace d'état (sauf si toutes les non-linéarités du modèle initial sont bornées). De plus, puisque nous parlons de systèmes non linéaires, il n'est pas improbable que leurs espaces d'état contiennent plusieurs points d'attractions.

Dans [Guerra et al., 2009], les auteurs ont montré qu'il est possible d'obtenir des conditions LMI garantissant la stabilité locale des systèmes TS tout en estimant un bassin d'attraction garanti. Nous avons alors étendu cette approche pour la stabilisation non quadratique locale des modèles TS (4). Pour ce faire, une nouvelle loi de commande non quadratique a été proposée, celle-ci est donnée par [CN19]:

$$u(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j (F_i + \delta_{ij}(z(t))) \left(\sum_{l=1}^r h_l P_l \right)^{-1} x(t) \quad (67)$$

où $\delta_{ij}(z(t)) = \sum_{k=1}^p \frac{\partial w_1^k}{\partial z_k} \left(\frac{\partial z_k(t)}{\partial x(t)} A_i x(t) \right) G_i^k$, F_i et $G_i^k \in \mathbb{R}^{m \times n}$ sont les gains du contrôleur,

$P_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $P_i = P_i^T > 0$ et où w_1^k correspondent aux fonctions de pondération obtenues par découpage en secteurs non linéaires d'un système non linéaire (cf. Lemme 1, page 56).

Dans ce cas, la dynamique en boucle fermée s'exprime sous la forme :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) h_l(z(t)) \left(A_i + B_i (F_j + \delta_{jl}(z(t))) \left(\sum_{l=1}^r h_l P_l \right)^{-1} \right) x(t). \quad (68)$$

En considérant la fonction candidate non quadratique de Lyapunov (18), on montre que (4) est globalement stabilisé par (67) si, $\forall x(t)$, on a :

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) h_l(z(t)) \left(A_i P_j + B_i (F_j + \delta_{jl}(z(t))) \left(\sum_{l=1}^r h_l P_l \right)^{-1} \right) \left(A_i P_j + B_i (F_j + \delta_{jl}(z(t))) \left(\sum_{l=1}^r h_l P_l \right)^{-1} \right)^T - \sum_{j=1}^r h_j P_j < 0 \quad (69)$$

Néanmoins, la condition (69) conduirait, telle quelle, à des conditions non convexes qui resteraient difficilement applicables, dans le cadre de la stabilisation globale, dans la mesure où elle dépend des dérivées des fonctions d'appartenance. Or, une condition suffisante garantissant la stabilisabilité locale de (4) est donnée par :

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) h_l(z(t)) \left(A_i P_j + B_i (F_j + \delta_{jl}(z(t))) + (A_i P_j + B_i (F_j + \delta_{jl}(z)))^T \right) < 0 \quad (70)$$

En effet, si (70) est vérifiée, alors il existe toujours un scalaire positif $\lambda > 0$ suffisamment petit pour que l'inégalité (69) soit vérifiée dans un domaine

$$D = \left\{ x : x \in \Omega, \left\| \sum_{j=1}^r \dot{h}_j P_j \right\| < \lambda \right\}.$$

En nous basant sur cette constatation et, par le biais d'une réécriture adéquate du terme $\sum_{j=1}^r \dot{h}_j P_j$, des conditions LMI ont été proposées permettant la

synthèse d'une loi de commande non-PDC (67) toute en maximisant l'estimation du domaine d'attraction D . Notons par ailleurs que ces résultats (bien que parfois jugés complexes) conduisent toujours à une solution avec une région d'attraction estimée aussi large que possible (mais aussi parfois réduite), quand des approches globales n'admettent aucune solution. Ces travaux sur la stabilisation non quadratique locale ont fait l'objet d'une communication dans une conférence nationale [CN19], fournie en annexe, ainsi que d'un article soumis dans une revue internationale [RS3]. Des extensions à des problèmes de commande avancés (retour de sortie, robustesse...) sont en cours.

5.3.3. Vers un changement de point de vue : approches polynomiales

Enfin, très récemment, et face aux difficultés rencontrées pour la mise sous forme LMI des conditions de stabilité non quadratiques, nous nous sommes attachés à considérer ce problème en utilisant d'autres outils de l'optimisation convexe. En effet, ces dernières années, de nouvelles techniques d'analyse des systèmes dynamiques ont vu le jour. Celles-ci, basées sur des problèmes d'optimisation polynomiale, constituent une approche alternative à l'optimisation de contraintes LMI. Ces techniques se basent sur les propriétés polynomiales suivantes [Choi et al., 1995][Powers et Wormann, 1998].

Définition 1 [Powers et Wormann, 1998]: Soit $x \in \mathbb{R}^n$, $p(x)$ un polynôme de degré pair ($\deg(p(x)) = 2d$), $\hat{x}(x)$ un vecteur de monômes de degrés $\leq d$ de x , les propositions suivantes sont équivalentes :

- $p(x)$ est SOS²⁰,
- il existe une matrice Q semi-définie positive telle que, $\forall x \in \mathbb{R}^n$, $p(x) = \hat{x}^T(x)Q\hat{x}(x)$,

En d'autres termes, si le polynôme $p(x)$ peut être réécrit sous la forme d'une somme de carrés monomiaux, d'où l'appellation SOS, alors $\forall x \in \mathbb{R}^n$, $p(x) \geq 0$.

Compte tenu de la définition 1, de nombreux problèmes de commande peuvent être reconsidérés sous la forme de problèmes d'optimisation basés sur la réécriture des conditions de Lyapunov sous forme de somme de carrés polynomiaux (SOS) [Henrion et Garulli, 2005]. Ainsi, sur la base de ces techniques, de nouvelles approches d'analyse pour les systèmes TS ont récemment vu le jour [Tanaka et al., 2007][Tanaka et al., 2009][Narimi et Lam, 2010]. Néanmoins, pour l'heure, l'analyse de la stabilité ou la stabilisation des systèmes TS est considérée via une fonction de Lyapunov polynomiale commune à un ensemble de contraintes SOS. De fait, et similairement à l'amélioration proposée par les fonctions de Lyapunov non quadratiques au regard des fonctions quadratiques, nous proposons l'emploi d'une fonction polynomiale floue de Lyapunov pour l'analyse des systèmes TS **[RS3]**.

Afin de mieux appréhender l'approche proposée, considérons la classe des modèles TS polynomiaux non forcés données par [Tanaka et al., 2009]:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) A_i(x(t)) \hat{x}(x(t)) \quad (71)$$

où $\hat{x}(x(t)) = \begin{bmatrix} \hat{x}_1(x(t)) & \cdots & \hat{x}_N(x(t)) \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^N$ est un vecteur de monômes de $x(t)$ et

$A_i(x(t))$ sont des matrices polynomiales de $x(t)$.

²⁰ Sum-Of-Square

Remarque 7 : Tanaka et ses collaborateurs ont montré qu'un système non linéaire affine peut-être réécrit sous la forme TS polynomiale (71) globalement (ou semi-globalement) par le biais d'une décomposition en secteur non linéaire [Tanaka et al., 2009]. De plus, la classe des systèmes TS polynomiaux (71) contient les systèmes TS usuels en considérant les matrices $A_i(x(t)) = A_i$ (polynomiales d'ordre 0) et $\hat{x}(x(t)) = x(t)$ le vecteur de monômes d'ordre 1.

Dans [Tanaka et al., 2009], une fonction candidate de Lyapunov polynomiale $V(x(t)) = \hat{x}^T(x(t))P(x(t))\hat{x}(x(t))$ a été employée pour étudier la stabilité des systèmes (71). Néanmoins, celle-ci conduit à des conditions conservatives dans la mesure où elle requiert l'existence d'une unique matrice polynomiale positive $P(x(t)) \in \mathfrak{R}^{N \times N}$ pour un ensemble de contraintes SOS. De ce fait, afin de proposer des conditions de stabilité moins conservatives pour la classe des systèmes (71), nous proposons la fonction candidate floue de Lyapunov polynomiale suivante:

$$v(x(t)) = \hat{x}^T(x(t)) \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) P_i(x(t)) \hat{x}(x(t)) \quad (72)$$

où, pour $i = 1, \dots, r$, $P_i(x(t)) \in \mathfrak{R}^{N \times N}$ sont des matrices polynomiales symétriques et positives de $x(t)$.

Sur la base de (72), des conditions SOS pour l'analyse de la stabilité globale des systèmes TS polynomiaux sont résumées par le théorème suivant.

Théorème 7 [RS3]: *Le modèle TS polynomial non forcé (71) est globalement asymptotiquement stable s'il existe, pour toutes les combinaisons de $i = 1, \dots, r$, $j = 1, \dots, r$, $j \neq i$, $p = 1, \dots, r$, $q = 1, \dots, n$ et $s = 1, 2$, les matrices symétriques polynomiales $P_i(x) \in \mathfrak{R}^{N \times N}$*

et $R_i(x) \in \mathfrak{R}^{N \times N}$ telles que les contraintes SOS (73), (74) et (75) soient satisfaites avec les polynomes $\varepsilon_{1i}(x) > 0$ pour $x \neq 0$, $\varepsilon_{2i}(x) \geq 0$ et $\varepsilon_{3ij}(x) \geq 0$ pour tout x .

$$\hat{x}^T(x) \left(P_i(x) - \varepsilon_{1i}(x) I \right) \hat{x}(x) \text{ est SOS} \quad (73)$$

$$-\hat{x}^T(x) \left(\Upsilon_{iips}^q(x) + \varepsilon_{2i}(x) I \right) \hat{x}(x) \text{ est SOS} \quad (74)$$

$$-\hat{x}^T(x) \left(\frac{1}{r-1} \Upsilon_{iips}^q(x) + \frac{1}{2} \left(\Upsilon_{iips}^q(x) + \Upsilon_{jips}^q(x) \right) + \varepsilon_{3ij}(x) I \right) \hat{x}(x) \text{ est SOS} \quad (75)$$

$$\text{où } \Upsilon_{iips}^q(x) = \frac{1}{nr} \left(A_i^T(x) T^T(x) P_j(x) + P_j(x) T(x) A_i(x) + \sum_{k=1}^n \frac{\partial P_j(x(t))}{\partial x_k(t)} A_i^k(x) \hat{x}(x) \right) + \alpha_{ps}^q A_i^q(x) \hat{x}(x) \left(P_p(x) + R_j(x) \right)$$

$T(x) \in \mathfrak{R}^{N \times n}$ est définie telle que $T_{(i,j)}(x) = \frac{\partial \hat{x}_i(x)}{\partial x_j}$ et les scalaires α_{ps}^q sont les bornes

(accessibles) des fonctions $\frac{\partial h_i(z)}{\partial x_k} \in [\alpha_{i1}^k, \alpha_{i2}^k]$.

Pour plus de détails sur la preuve du théorème 7, le lecteur pourra se référer à l'article [RS3] donné en annexe de ce manuscrit.

Remarque 7: soulignons le fait que les conditions du théorème 7 sont globales et ne nécessitent aucune hypothèse sur la dynamique du système considéré. De plus, il est intéressant de noter que les fonctions de Lyapunov non quadratiques (18) sont un cas particulier des fonctions polynomiales floues de Lyapunov (72). En effet, en considérant les matrices $P_i(x(t)) = P_i$ (polynomiales d'ordre 0) et $\hat{x}(x(t)) = x(t)$ le vecteur de monômes d'ordre 1, la fonction (72) est une fonction candidate non quadratique de Lyapunov. De ce fait, l'approche SOS proposée au théorème 7 constitue une alternative aux approches LMI dans le cadre non quadratique et, à l'instar de ces dernières, permet une analyse globale de la

stabilité d'un système TS sans aucune hypothèse préalable sur la dynamique de celui-ci (bornes inférieures des dérivées des fonctions d'appartenance). L'utilisation de l'approche SOS proposée permet donc, dans ce cas particulier, de traiter un problème qui restait jusqu'ici ouvert en employant les techniques classiques à bases de LMI.

Ces premiers résultats en stabilité des modèles TS polynomiaux ont fait l'objet d'articles soumis dans une revue internationale [RS3] (c.f. annexe) et une conférence internationale [CIS1].

5.4. Quelques travaux d'ouverture sur la commande des SDH

L'une des ambitions affichée du groupe AUTO du CReSTIC vise à rapprocher les travaux réalisés sur les SED avec ceux traitant des systèmes continus autour d'une thématique commune d'analyse des SDH. Afin de tendre vers cet objectif commun, nous nous sommes intéressés à la commande des systèmes à commutations. Dans ce dessein, des techniques LMI sont employées et les travaux ci-dessous constituent une ouverture vers d'autres classes de systèmes dynamiques vis-à-vis des techniques acquises lors de mes travaux sur la commande des systèmes TS.

Les systèmes à commutations sont constitués d'un ensemble de dynamiques continues (linéaires ou non linéaires) commutant les une après les autres via une loi de commutation [Branicky, 1998][Liberzon et Morse, 1999]. On peut alors représenter cette classe de SDH par un ensemble de modes discrets au sein desquels évoluent des variables d'état continues, cf. figure 12.

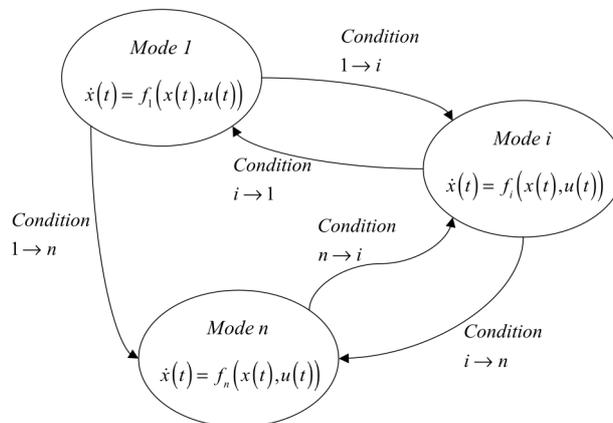


Figure 12 : Schéma de principe des SDH à commutations.

On distingue deux types d'approches permettant l'analyse de la stabilité des systèmes à commutations. Le premier tient compte d'hypothèses sur l'évolution des états discrets. Dans ce cas, les conditions LMI font intervenir la notion de temps de séjour dans chacun des modes [Liberzon et Morse, 2009][Cheng et Hu, 2008]. Néanmoins, ce type d'approches ne permet pas de garantir à coup sûr la stabilité pour des séquences aléatoires de commutations. Ainsi, le second type d'approches s'intéresse à l'obtention de conditions garantissant la stabilité asymptotique pour des séquences aléatoires de commutations. Pour ce faire, il a été montré qu'une condition nécessaire (mais non suffisante) était que chacun des sous-systèmes devait être asymptotiquement stable [Schaft et Shumacher, 2000] et que l'existence d'une fonction de Lyapunov commune entre sous-systèmes constituait une condition nécessaire et suffisante [Lin et al., 1996][Shorten et al., 1997]. Ce point particulier nous a interpellé dans la mesure où, dans ce cadre, il devient possible d'effectuer un parallélisme entre les approches quadratiques développées pour les systèmes TS et l'analyse des systèmes à commutations.

5.4.1. Synthèse de contrôleur pour les systèmes linéaires à commutations

Tirant parti des travaux réalisés sur la stabilisation des systèmes TS incertains et perturbés, nous nous sommes dans un premier temps intéressés à leur transposition au cas de la commande robuste des systèmes linéaires à commutations. Dans [Montagner et al., 2006], des conditions BMI permettant la synthèse de contrôleurs robustes aux incertitudes externes ont été proposées. Notre objectif premier a consisté à étendre ces travaux au cas incertain tout en proposant des conditions LMI. La classe des systèmes à commutation considérée est représentée par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \left(A_{\sigma(t)} + \Delta A_{\sigma(t)} \right) x(t) + \left(B_{1\sigma(t)} + \Delta B_{1\sigma(t)} \right) \varphi(t) + \left(B_{2\sigma(t)} + \Delta B_{2\sigma(t)} \right) u(t) \\ y(t) = \left(C_{\sigma(t)} + \Delta C_{\sigma(t)} \right) x(t) + \left(D_{1\sigma(t)} + \Delta D_{1\sigma(t)} \right) \varphi(t) + \left(D_{2\sigma(t)} + \Delta D_{2\sigma(t)} \right) u(t) \end{cases} \quad (76)$$

où pour un nombre N de sous-systèmes et $i = 1, \dots, N$, la loi de commutation $\sigma(t) : \mathbb{R}^+ \rightarrow \{1, 2, \dots, N\}$ permet de sélectionner le mode actif i défini par $(A_i, \Delta A_i, B_{1i}, \Delta B_{1i}, B_{2i}, \Delta B_{2i}, C_i, \Delta C_i, D_{1i}, \Delta D_{1i}, D_{2i}, \Delta D_{2i})$.

En supposant que la loi de commutation $\sigma(t)$ n'est pas connue a priori mais disponible en temps réel, la loi de commande à commutation par retour d'état suivante peut être considérée :

$$u(t) = K_{\sigma(t)}x(t) \quad (77)$$

Sous l'hypothèse que la continuité de l'état est assurée lors des commutations, des conditions LMI permettant la synthèse robuste de (77) ont été proposées [CI15][RI4]. Celles-ci tiennent compte d'un critère H_∞ permettant d'atténuer l'effet des perturbations externes sur la dynamique du système, mais aussi d'un critère permettant de spécifier les performances en boucle fermée par le placement des pôles de chaque sous-système [Haddad et Bernstein, 1992]. Pour plus de détail sur cette étude, le lecteur pourra consulter l'article [RI4] fourni en annexe.

Par ailleurs, dans le cadre de la thèse de Dalel Jabri, ce type d'approches est étendu à la commande décentralisée des systèmes linéaires à commutations de grandes dimensions. Par le biais d'une réécriture du système sous la forme de systèmes à commutations interconnectés, des conditions LMI pour la stabilisation décentralisée sont proposées aussi bien en temps continu qu'en temps discret. Ces travaux ont fait l'objet d'un article soumis dans une revue internationale [RS5] et d'une conférence internationale [CI28].

5.4.2. Commande robuste des systèmes non linéaires à commutations

Les travaux présentés aux paragraphes précédents concernent la classe des systèmes linéaires à commutations. Dans le but d'étendre ces études à une plus large classe de SDH, nous nous sommes intéressés au cas des systèmes non linéaires à commutations. Dans ce cadre, on considère que chacun des modes du SDH fait intervenir des dynamiques non linéaires (cf. figure 12). Par le biais d'une transformation polytopique convexe, il est possible de représenter chacun des modes par un modèle TS. Ainsi, le modèle TS à commutations obtenu conserve les propriétés essentielles des SDH tout en maintenant la capacité du formalisme flou à représenter des dynamiques non linéaires. Des conditions de stabilité, basées sur des fonctions de Lyapunov quadratiques (communes), ont fait l'objet de quelques études [Yang et al., 2008][Lam, 2009]. Afin de réduire le conservatisme des conditions LMI, l'utilisation d'une fonction de Lyapunov à commutations a été proposée dans [Ohtake et al.,

2002][Othake et al., 2006]. Par ailleurs, en ce qui concerne la stabilisation robuste des modèles TS incertains à commutations, seule une approche quadratique (commune) a été proposée [Yang et Zhao, 2007]. Cette absence de résultats basés sur une fonction de Lyapunov à commutation pour la synthèse de lois de commande robustes à commutations a par conséquent motivé notre étude. Ainsi, nous nous sommes intéressés à la classe des systèmes TS incertains et perturbés à commutation représentée par :

$$\dot{x}(t) = \sum_{q=1}^Q \sum_{i=1}^{r_q} v_q(x(t)) h_{qi}(x(t)) \left((A_{qi} + \Delta A_{qi}(t))x(t) + (B_{qi} + \Delta B_{qi}(t))u(t) + G_{qi}\varphi(t) \right) \quad (78)$$

où Q est le nombre de modes, r_q est le nombre de règles floues dans chaque mode, $A_{qi} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_{qi} \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $G_{qi} \in \mathbb{R}^{n \times p}$ sont les matrices nominales, $\Delta A_{qi}(t) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\Delta B_{qi}(t) \in \mathbb{R}^{n \times m}$ les matrices d'incertitudes paramétriques et $v_q(x(t))$ la loi de commutation définie telle que :

$$v_q(x(t)) = \begin{cases} 1 & \text{si } x(t) \in R_q(s_{1q}, s_{2q}, \dots, s_{nq}) \\ 0 & \text{si } x(t) \notin R_q(s_{1q}, s_{2q}, \dots, s_{nq}) \end{cases} \quad (79)$$

où $R_q(s_{1q}, s_{2q}, \dots, s_{nq})$ sont les régions définissant le partitionnement de l'espace d'état tel que,

en considérant $x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) & \dots & x_n(t) \end{bmatrix}^T$, on a :

$$s_{kq} = \begin{cases} 1 & \text{si } x_k(t) \geq 0 \\ 0 & \text{si } x_k(t) < 0 \end{cases}, \quad k = 1, \dots, n \quad (80)$$

Afin de stabiliser (78), on considère la loi de commande PDC à commutations donnée par [Othake et al., 2006] :

$$u(t) = \sum_{q=1}^Q \sum_{i=1}^{r_q} v_q(x(t)) h_{qi}(x(t)) K_{qi} E_q \tilde{x}(t) \quad (81)$$

où $K_{qi} \in R^{m \times 2n}$ sont les gains de commande et $E_q \in R^{2n \times 2n}$ sont des matrices non singulières destinées à assurer la continuité du signal de commande. Celles-ci sont définies par :

$$E_q = \begin{bmatrix} s_{1q} & 0 & \dots & 0 & 0 & 1-s_{1q} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & s_{2q} & \dots & 0 & 0 & 0 & 1-s_{2q} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & s_{(r-1)q} & 0 & 0 & 0 & \dots & 1-s_{(r-1)q} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & s_{rq} & 0 & 0 & \dots & 0 & 1-s_{rq} \\ 1-s_{1q} & 0 & \dots & 0 & 0 & s_{1q} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1-s_{2q} & \dots & 0 & 0 & 0 & s_{2q} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1-s_{(r-1)q} & 0 & 0 & 0 & \dots & s_{(r-1)q} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1-s_{rq} & 0 & 0 & \dots & 0 & s_{rq} \end{bmatrix} \quad (82)$$

Sur la base des techniques de majoration des incertitudes paramétriques et par le biais de l'utilisation d'un critère H_∞ , des conditions LMI permettant la synthèse de contrôleurs robustes PDC à commutations (81) sont proposées en considérant la fonction candidate de Lyapunov à commutations :

$$V(\tilde{x}(t)) = \tilde{x}^T(t) \sum_{q=1}^Q E_q^T P E_q \tilde{x}(t) \quad (83)$$

Ces travaux ont été soumis dans une revue internationale [RS1] et ont donné lieu à une communication dans une conférence nationale [CN20].

Remarque 8 : Outre leurs capacités à représenter des systèmes faisant intervenir à la fois des dynamiques non linéaires continues et discrètes, les modèles TS à commutations (78) peuvent être utilisés pour représenter des systèmes non linéaires continus par le biais d'un partitionnement adéquat de l'espace d'état [Othake et al., 2002]. Dans ce cas, les méthodologies de synthèse de contrôleurs à commutations proposées permettent de réduire le conservatisme par rapport aux techniques classiques (quadratiques) d'analyse des modèles TS [Othake et al., 2006].

6. Travaux à caractère applicatif

6.1. Conception et commande de machines de rééducation

La robotique de rééducation et d'entraînement a connu un essor considérable ces dernières années. Des dispositifs motorisés ont été conçus et sont généralement basés sur des architectures proches de celles des machines à poids rencontrées dans les salles de musculation. Par exemple, parmi les plus répandues en milieu clinique, les machines « isocinétiques » permettent la réalisation d'exercices d'entraînement et/ou de rééducation au cours desquels l'étirement musculaire se fait à vitesse constante. Ces machines sont généralement dotées d'une architecture cinématique simple à un ou deux degrés de liberté centrés sur l'articulation à mettre en mouvement. Du point de vue de la robotique, le développement de tels dispositifs d'entraînement consiste en la définition de nouvelles architectures mécaniques permettant la réalisation de mouvements complexes respectant les contraintes physiologiques et biomécaniques de l'utilisateur. Ainsi, la définition des trajectoires de référence, du domaine atteignable ou encore la prise en compte de la biomécanique articulaire nécessite un travail collaboratif entre les experts du domaine médical et les concepteurs du système robotisé. D'un point de vue de l'automatique, l'objectif est de garantir un fonctionnement sécuritaire pour l'utilisateur tout en assurant la réalisation des mouvements selon les performances souhaitées par le corps médical. L'automatique permet alors la définition de structures de commande assurant la stabilité du système régulé au cours des mouvements réalisés mais aussi la prise en compte les interactions de l'utilisateur avec le dispositif de rééducation pour générer des trajectoires physiologiquement cohérentes. C'est dans cet esprit que des travaux antérieurs ont conduit, au sein du CReSTIC, au développement d'une machine de rééducation et d'entraînement des membres inférieurs en chaîne musculaire ouverte [Moughamir, 1999], nommé Multi-Iso et, plus récemment, au prototypage d'un dispositif de rééducation des membres supérieurs [Denève, 2007].

Mon arrivée au CReSTIC en 2005 coïncidait avec le lancement d'un nouveau projet régional (CPER SYSREEDUC) dont l'objectif était la conception et le développement d'un nouveau système capable d'évaluer et d'aider à la rééducation des membres inférieurs. Celui-ci devait respecter les contraintes physiologiques et biomécaniques des membres inférieurs de manière personnalisée et adaptée aux différentes pathologies dont peut souffrir un patient. Ce projet régional impliquait alors plusieurs laboratoires et groupes de recherche :

- le **LACM**²¹ pour l'analyse et la modélisation biomécanique de l'articulation du genou,
- l'équipe **SIC** du CReSTIC pour la réalisation d'un simulateur virtuel de l'articulation du genou,
- l'équipe **AUTO** du CReSTIC pour la définition du cahier des charges, la conception du système robotisé, ainsi que pour la réalisation d'une architecture de commande adaptée,
- le **CRITT-MDTS**²² pour la réalisation mécanique de la machine de rééducation.

Dans ce cadre, et ayant acquis des compétences en biomécanique lors de mes travaux antérieurs, je me suis naturellement impliqué dans ce nouveau projet. L'objectif de ce travail de recherche était donc, pour ce qui nous concernait, la conception et la commande d'un nouveau dispositif de rééducation des membres inférieurs. Plus précisément, ma contribution, associée au travail de thèse de Lynda Seddiki (dont j'ai assuré l'encadrement sous la direction de Janan Zaytoon), a porté sur les points suivants :

- Etude de l'existant et définition des objectifs en termes de rééducation et d'entraînement du nouveau dispositif,
- Conception de l'architecture mécanique et dimensionnement des capteurs et actionneurs du dispositif robotisé,
- Proposition d'une nouvelle structure de commande pour les machines de rééducation.

6.1.1. Définition des objectifs du dispositif Sys-Réeduc en termes de rééducation

Un premier travail de documentation a permis de nous familiariser avec le vocabulaire anatomique relatif aux membres inférieurs et aux principales chaînes musculaires le constituant. Puis, un état de l'art sur les différentes techniques de rééducation et de renforcement musculaire ainsi que sur les différents dispositifs de rééducation les plus utilisés en milieu clinique a été réalisé. Il apparaît que deux techniques de rééducation sont couramment employées :

- La rééducation en chaîne musculaire ouverte (CMO) permet de renforcer des groupes musculaires isolés. Les machines de rééducation en CMO sont largement utilisées en milieu clinique, car elles permettent un renforcement musculaire rapide. Cependant, elles

²¹ Laboratoire d'Analyse des Contraintes Mécaniques, Université de Reims Champagne-Ardenne.

²² Centre Régional d'innovation et de Transfert de Technologies – Matériaux Dépôts et Traitement de Surface, Charleville-Mézières

provoquent des contraintes au niveau du complexe ligamentaire (Ligaments croisés antérieurs) pouvant engendrer des douleurs importantes (essentiellement rotuliennes) lors d'une utilisation intensive [Lutz et al., 1993][Bynum et Barrack, 1995]. De plus, cette technique crée, lors d'une utilisation prolongée, un déséquilibre dû à une mise en tension asymétrique du complexe articulaire ciblé.

- La rééducation en chaîne musculaire fermée vise le recrutement des groupes musculaires agonistes et antagonistes contribuant à la réalisation d'un mouvement complet des membres inférieurs. Cette technique fait l'objet d'attentions particulières pour son aptitude à stabiliser les articulations tout en assurant des exercices proches de ceux utilisés dans la vie courante (marche, levé de chaise etc...). La mise en tension des groupes musculaires se fait de manière symétrique et contribue à l'augmentation de la stabilité articulaire. Par conséquent, il a été constaté une diminution des douleurs antérieures du genou (douleurs rotuliennes) lors d'une rééducation en CMF par rapport à la CMO [Steinkamp et al., 1993][O'Connor, 1993]. Néanmoins, le bénéfice de la rééducation en CMF est obtenu, à l'inverse de la rééducation en CMO, sur une durée relativement longue.

Notons que, pour des raisons purement techniques, il n'est pas possible de réaliser un dispositif capable de reproduire simultanément ces deux méthodes de rééducation. D'autre part, la complémentarité des techniques de rééducation dites en chaîne musculaire ouverte et en chaîne musculaire fermée a été mise en évidence pour la rééducation des membres inférieurs.

Les machines de rééducation en CMO ont fait l'objet de nombreux développements et sont maintenant très utilisées en milieu clinique. A contrario, le développement des machines en CMF est plus récent et leur utilisation en milieu clinique reste à ce jour très confidentielle. De ce fait, notre choix s'est porté sur la réalisation d'une nouvelle machine de rééducation en CMF avec pour objectif de garantir une rééducation fine du membre inférieur dans son ensemble tout en garantissant la sécurité au patient.

6.1.2. Conception et réalisation d'un premier prototype de la machine Sys-Rééduc

De manière usuelle, une définition des exercices en CMF est communément admise par les cliniciens : un exercice des membres inférieurs est considéré en CMF si les extrémités du membre inférieur (hanche et pieds) sont fixées ou suffisamment résistantes pour que le mouvement s'opère entre celles-ci [Viel et Esnault, 2003]. Tenant compte de cette définition,

nous avons proposé la structure cinématique de la machine Sys-Rééduc présentée à la figure 13 dans le plan sagittal pour un seul des deux membres inférieurs. Les mouvements de chacun des membres inférieurs pouvant être indépendants, cette structure est dédoublée pour chacun de ceux-ci.

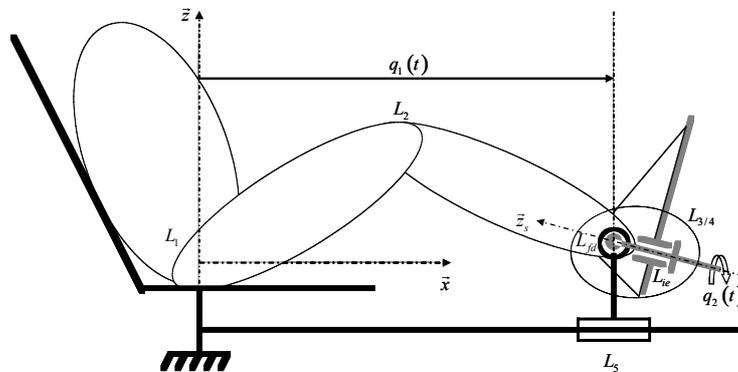


Figure 13 : *Concept cinématique du dispositif Sys-Rééduc dans le plan sagittal [Seddiki 2008][R19].*

Le dimensionnement de la machine Sys-Rééduc a été réalisé en tenant compte des contraintes biomécaniques et physiologiques des membres inférieurs [Kapanji, 1985]. La réalisation d'un premier prototype de la machine Sys-Rééduc, présenté à la figure 14, a été prise en charge par le CRITT-MDTS de Charleville-Mézières.



Figure 14 : *Premier prototype du dispositif Sys-Rééduc réalisé en partenariat avec le CRITT-MDTS [Seddiki 2008].*

Par ailleurs, notons que Sys-Rééduc est doté de capteurs de force tridimensionnels spécifiques placés sous les pieds pour recueillir les intentions et efforts de l'utilisateur lors

d'un mouvement de rééducation. Le développement et la réalisation de ces capteurs ont fait l'objet d'un contrat de partenariat scientifique avec le LMS²³ de Poitiers.

Pour plus de détails sur les choix de conceptions de la machine Sys-Rééduc, le lecteur pourra se reporter sur la première partie de l'article [RI9] donné en annexe de ce manuscrit ainsi que sur les deux premiers chapitres de la thèse de Lynda Seddiki [Seddiki, 2008]. Ces travaux de conception de la machine Sys-Rééduc ont fait l'objet d'une publication dans une revue internationale [RI9], de deux communications dans des conférences internationales [CI16][CI9], une conférence nationale [CN9] et trois présentations dans des séminaires ou groupes de recherche [AP4][AP3][AP2].

6.1.3. Architecture de commande proposée pour les machines de rééducation

Comme il a été montré précédemment, un dispositif de rééducation actif constitue un système robotisé. Aussi, les machines présentes dans le milieu clinique sont généralement asservies par des lois de commandes classiques en force, position et vitesse [ANAES, 2001]. Ces dernières ont l'avantage de permettre une réalisation facile de certains mouvements de rééducation tels que les mouvements isocinétiques (à vitesse constante), isotoniques (à force constante), etc. Notons que les protocoles de rééducation évoluent en fonction des besoins cliniques exprimés pour répondre à de nombreuses pathologies. Un contrôleur séquentiel (hybride) a été proposé pour la machine Multi-Iso [Moughamir et al., 2001]. Cette structure de commande permet la commutation successive de lois de commande en force, position et vitesse afin de répondre à des objectifs précis en termes de suivi de trajectoires physiologiques. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que l'utilisateur constitue un système autorégulé dont les mouvements, parfois imprévisibles et involontaires, entrent en interaction avec ceux réalisés artificiellement par le système robotisé.

Ainsi, la principale contrainte que nous nous sommes imposée pour la commande de machines de rééducation est de garantir la sécurité de l'utilisateur. Or, de manière générale, la commutation entre plusieurs contrôleurs continus pose certains problèmes vis-à-vis de la continuité du signal de commande. De ce fait, des à-coups peuvent être ressentis par l'utilisateur lors des commutations entre ceux-ci. De plus, bien que fonctionnelles, ces lois de commande, synthétisées à l'aide d'outils de l'automatique linéaire, ne permettent pas de garantir la stabilité de la machine de rééducation, ni la robustesse en présence de perturbations externes, sur l'ensemble de l'espace opérationnel [CI12][RN1].

²³ Laboratoire de Mécanique du Solide UMR CNRS 66107 Université de Poitiers.

Dans cette optique, nous avons proposé une nouvelle structure de contrôle-commande pour machines de rééducation. Celle-ci permet, d'une part, de garantir de manière systématique la stabilité de la machine soumise à des perturbations externes afin d'assurer une utilisation sécuritaire sur l'ensemble de son espace de fonctionnement et, d'autre part, de permettre une conduite volontaire de la machine par l'utilisateur. Cette structure de contrôle-commande, présentée figure 15, est basée sur deux étages :

- un étage de génération de consignes qui, par le biais de la mesure de l'effort de l'utilisateur sur la machine ainsi que la prise en compte des caractéristiques environnementale (position, vitesse...), doit permettre la génération de trajectoires de rééducation à faire suivre par le système robotisé. Cet étage est paramétrable par le clinicien en fonction du protocole de rééducation souhaité (isocinétique, isotonique, etc...), voir [Seddiki, 2008] pour plus de détail sur ces protocoles.
- un étage continu, constitué de la machine de rééducation en boucle fermée, c'est-à-dire du dispositif de rééducation en interaction avec l'utilisateur et d'un contrôleur continu devant permettre le suivi de trajectoire (émanant du générateur de consigne) en temps réel.

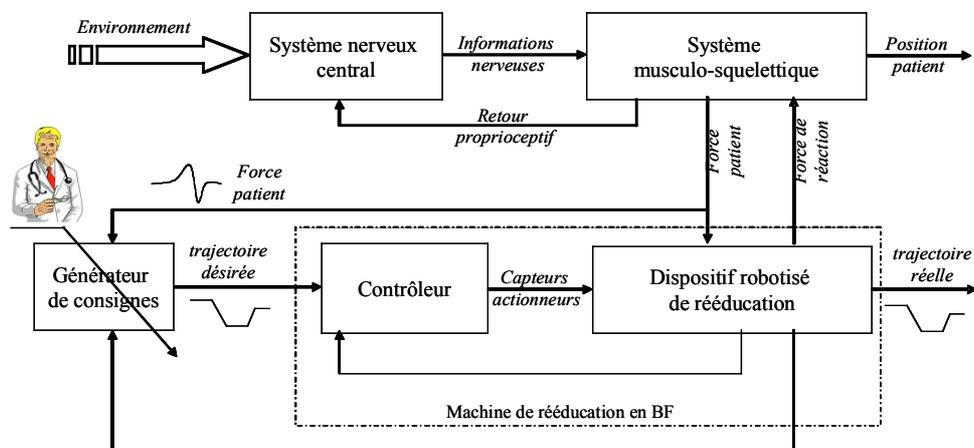


Figure 15 : Structure de contrôle-commande proposé pour les machines de rééducation [Seddiki 08].

Le générateur de consignes repose sur une machine à états discrets qui, selon le mode dans lequel se trouve le système, déclenche une trajectoire de mouvement désiré et que doit effectuer le système robotisé. Le passage d'un mode à un autre s'effectue par dépassement de seuils selon le protocole de rééducation sélectionné. Par exemple, si l'utilisateur applique une

force supérieure à un seuil donné alors une trajectoire isocinétique est déclenchée, cf. figure 16. Il incombe ensuite au contrôleur continu d'assurer le suivi des trajectoires désirées.

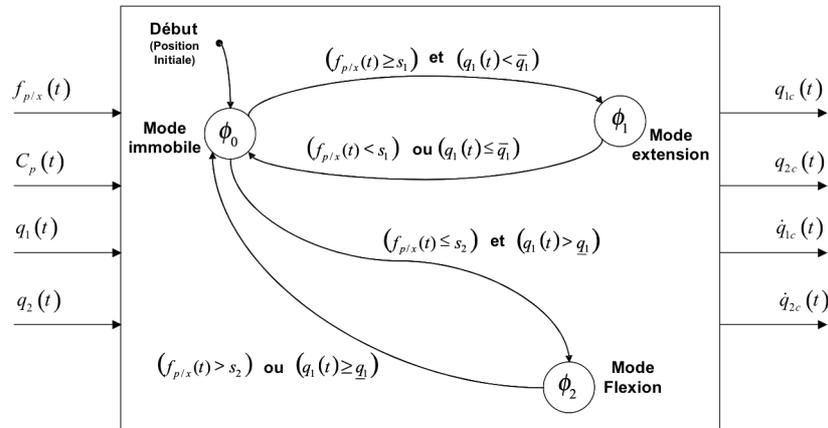


Figure 16 : Générateur de consigne pour des trajectoires de flexion-extension de Sys-Réeduc.

Concernant la partie continue, rappelons que la machine Sys-Réeduc constitue un système mécanique. Un modèle dynamique de celle-ci est donc constitué de ses équations du mouvement. Celui-ci est obtenu par le biais du formalisme de Lagrange et peut s'écrire sous la forme :

$$M(q(t))\ddot{q}(t) + C(q(t))\dot{q}(t) + G(q(t))q(t) = Ru(t) + S\varphi(t) \quad (2.84)$$

où $q(t)$ est le vecteur contenant les coordonnées généralisées du système constitué d'une translation (flexion-extension du membre inférieur) et d'une rotation (rotation interne externe de la cheville), $u(t)$ est le vecteur d'entrée contenant les couples moteurs, $M(q(t))$ la matrice d'inertie, $\varphi(t)$ est le vecteur des forces et couples appliqués par l'utilisateur sur la machine, $C(q(t))$ est la matrice de Coriolis, $G(q(t))$ est la matrice de gravitation, R est la matrice de transformation des couples moteurs en forces généralisées et, S est la matrice de transfert des perturbations externes.

Pour une description détaillée du modèle dynamique de Sys-Rééduc et de ses paramètres, le lecteur pourra consulter l'article [RI9] ou le second chapitre de la thèse de Lynda Seddiki [Seddiki, 2008].

Rappelons qu'une représentation d'état d'un système mécanique peut-être naturellement écrite sous forme descripteur telle que :

$$E(x(t))\dot{x}(t) = A(x(t))x(t) + B(x(t))u(t) + H(x(t))\varphi(t) \quad (85)$$

$$\text{où } x(t) = \begin{bmatrix} q(t) & \dot{q}(t) \end{bmatrix}^T, \quad E(x(t)) = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & M(q(t)) \end{bmatrix},$$

$$A(x(t)) = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -G(q(t)) & -C(q(t)) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ R \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 0 \\ S \end{bmatrix}.$$

L'écriture sous forme descripteur (85) permet, contrairement aux représentations d'état classique, de s'affranchir de l'inversion de la matrice d'inertie et, par conséquent, permet de limiter les problèmes de conditionnement de la matrice d'état. Sur la base du descripteur (85), par le biais d'une décomposition en secteurs non linéaires, un représentant TS est obtenu et la synthèse d'un contrôleur robuste non-PDC assurant le suivi des trajectoires de consigne désirées a été réalisée selon des techniques LMI similaires à celles présentées dans la partie précédente. Pour plus de détails sur la synthèse de ce contrôleur, le lecteur pourra consulter l'article [RI9] fourni en annexe.

Notons enfin que, le dispositif Sys-Rééduc n'est, pour l'heure, pas encore opérationnel. En effet, le développement et la mise en œuvre de sa partie puissance restent encore à finaliser. Néanmoins, la structure de commande proposée pour les machines de rééducation a été validée expérimentalement sur la machine Multi-Iso [RN1].

Ces travaux sur la commande des machines de rééducation ont donné lieu à la publication d'articles dans une revue internationale [RI9], une revue nationale [RN1], un chapitre d'ouvrage [CH1], deux communications internationales [CI12][CI24] et deux nationales [CN11][CN15].

6.2. Autres travaux à caractère applicatif

6.2.1. Modélisation TS en vue de la commande d'un robot pneumatique à deux degrés de liberté

Dans le cadre d'une collaboration démarrée en 2005 avec le Professeur Horst Schulte²⁴, qui travaillait alors au sein de la division Hydraulics Research de Bosch Rexroth AG²⁵ en Allemagne, nous nous sommes intéressés à la commande d'un robot pneumatique à deux degrés de liberté. L'objectif était de tirer parti d'une modélisation sous forme descripteur pour la synthèse d'une loi de commande robuste. Le robot de type SCARA à deux degrés de liberté est présenté schématiquement par la figure 17. Celui-ci est actionné par deux vérins pneumatiques couplés à un moteur électrique. Il présente par conséquent une dynamique complexe (fortement non linéaire) que nous souhaitons établir en benchmark pour de futures investigations en commande mais aussi en diagnostic.

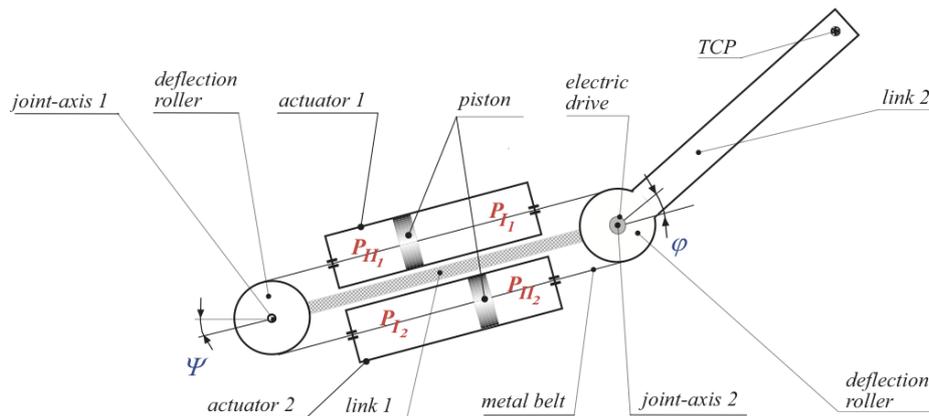


Figure 17 : Schéma du robot pneumatique à deux degrés de liberté [R16].

L'enjeu de cette étude était donc, dans un premier temps, l'obtention d'un modèle non linéaire représentant fidèlement la dynamique de ce système avec une complexité modérée en vue de sa commande. Ainsi, un modèle dynamique, constitué des équations du mouvement (Newton-Euler) de la structure mécanique du robot à deux degrés de liberté, complété par un modèle des actionneurs pneumatiques, a été proposé. Ensuite, pour la synthèse d'une loi de commande, notre choix s'est porté sur une modélisation TS sous forme descripteur. En effet, ce type d'approche permet de réduire le nombre de règles du représentant TS tout en

²⁴ Université des Sciences appliquées, HTW Berlin, Wilhelminenhofstraße 75A, 12459 Berlin, Allemagne.

réduisant le conservatisme de la synthèse de lois de commande à base de LMI. De plus, rappelons que la structure d'un descripteur se prête naturellement aux systèmes mécaniques à géométrie variable dans la mesure où des termes non linéaires sont contenus dans leurs matrices d'inertie. Une loi de commande PDC a donc été synthétisée via une approche LMI inspirée de [CI9] et une première comparaison des résultats obtenus en simulation par rapport à un jeu de données expérimentales a permis de conclure sur l'efficacité de l'approche de commande proposée.

Ces premiers travaux ont conduit à la publication d'un article dans une revue internationale [RI6] et d'une communication internationale [CI13].

6.2.2. Participations épisodiques à des travaux d'analyse du mouvement en biomécanique

De manière épisodique, depuis ma nomination en qualité de maître de Conférences à l'URCA, j'ai également pris part à quelques travaux en Biomécanique. Ceux-ci concernent l'analyse du mouvement humain et constituent une approche descriptive (à base d'observations expérimentales qualitatives) des phénomènes biomécaniques plutôt qu'une approche purement analytique (à base de modèles et simulation). Par conséquent, ces travaux ont été réalisés en collaboration avec des médecins ou biomécaniciens proches du milieu médical et de l'entraînement sportif.

Tout d'abord, dans le cadre du CPER Sys-Rééduc et afin de mieux appréhender la biomécanique des mouvements des membres inférieurs, nous nous sommes intéressés à la modélisation cinématique du genou. Cette étude a été réalisée en préambule à la conception de la machine de rééducation Sys-Rééduc présentée précédemment et a conduit à une communication internationale [CI9].

Par ailleurs, dans le cadre d'une collaboration avec le Dr Yannick Delpierre²⁶, nous nous sommes intéressés à l'analyse de la marche des enfants Infirmes Moteur Cérébraux (IMC). Lors de cette étude, une comparaison des « patterns » de marche d'une population de sujets sains et d'une population de sujets pathologiques a permis, par le biais d'acquisitions vidéo et de l'analyse des phases relatives du mouvement, de dégager des indicateurs cliniques permettant aux médecins rééducateurs d'affiner les protocoles de rééducation mis en place. Cette étude a fait l'objet d'une communication internationale [CI8].

²⁵ Bosch Rexroth AG, Hydraulics, Glockeraustr. 4. D-89275 Elchingen, Allemagne.

Enfin, dans le cadre d'une collaboration avec le professeur Redha Taïar²⁷, une analyse du mouvement de la phase d'impulsion des nageurs lors du plongeon a été réalisée. Sur la base d'acquisition vidéo et d'une modélisation cinématique sous le logiciel LifeModeller²⁸, des paramètres biomécaniques ont été extraits dont l'objectif est de permettre aux entraîneurs d'améliorer les performances de leurs athlètes. Cette étude a fait l'objet d'une communication internationale **[CI10]**.

²⁶ Centre de l'arche, 1 bd Maule, 72560 Saint Saturnin.

²⁷ LACM, URCA, Reims

²⁸ <http://www.lifemodeler.com/>

BILAN ET PERSPECTIVES

Au long de ce manuscrit, mes activités d'enseignant-chercheur ont été présentées. Sept ans après l'obtention de mon doctorat, la rédaction de cet HDR a été l'occasion de faire le point sur mon parcours aussi bien en termes d'enseignement, de recherche, qu'en termes de prises de responsabilités collectives et autres tâches administratives.

Bien que l'HDR permette d'évaluer la maturité scientifique du candidat, elle n'est pas moins une étape importante vers plus de responsabilités, aussi bien scientifiques que pédagogiques. Aussi, outre la qualité scientifique du candidat, il est important qu'elle conduise à juger de sa capacité à animer une équipe, encadrer des travaux de recherche, porter de nouveaux projets, proposer de nouvelles formations ainsi qu'à prendre part à la vie de la collectivité à laquelle il appartient. C'est dans cet esprit que j'ai souhaité rendre compte de mon parcours, au cours duquel j'ai tenté d'équilibrer au mieux les différents aspects des missions qui incombent à la fonction d'un maître de conférences.

En effet, dès mon arrivée à l'Université de Reims Champagne-Ardenne, je me suis impliqué dans la vie de mon laboratoire d'accueil en participant à son conseil mais aussi en prenant une part active dans ses projets en cours, notamment le CPER Sys-Rééduc et COSMOS 1 et 2 du GIS 3SGS..

J'ai également pris part à la collectivité d'un point de vue pédagogique en participant en 2006-2007 au conseil de département EEA puis en m'impliquant davantage au sein d'autres départements de l'UFR Sciences Exactes et Naturelles. Dans ce cadre, j'ai notamment contribué à la **création** en 2008 du **Master 1 GEDD**, destiné à assurer la cohérence de l'offre de formation en termes de LMD des Masters pro SQHE et VGDDE, dont j'ai pris la **responsabilité** partagée avec un collègue du département Chimie.

D'autre part, je me suis impliqué dans la vie politique de l'université en participant à la création d'une liste asyndicale (Qualité-Recherche-Formation) en vue des élections aux conseils centraux. Grâce à cela, j'ai été **élu au conseil scientifique** de l'URCA en 2009. Cela m'a permis d'appréhender, au cœur de l'un de ses organes de décision les plus influents, les

rouages du fonctionnement d'une université mais aussi d'acquérir une vision globale et d'exprimer mon avis sur l'ensemble des aspects et outils de politique scientifique de l'URCA.

Concernant mon intégration au sein de l'équipe AUTO du CReSTIC, je me suis employé à développer des relations aussi bien amicales que professionnelles avec mes collègues en établissant avec certains des collaborations effectives. Il en est de même avec les doctorants et masters recherches que j'ai pu encadrer, en essayant de favoriser le travail d'équipe. D'ailleurs, ce n'est pas sans fierté qu'il me semble jusqu'ici avoir rempli mon rôle puisque ma première thésarde est actuellement maître de conférence à l'Université Paris 8, le second est qualifié (CNU 61) et actuellement en post-doc au CRAN (Nancy) avec un dossier qui me semble tout à fait correct, et la troisième semble bien partie pour soutenir en 2011 avec une production scientifique tout aussi respectable.

Par ailleurs, conscient de l'importance de ce que l'on appelle couramment le rayonnement d'un enseignant chercheur, je me suis appliqué à maintenir et développer un réseau de relations hors de l'URCA. Dans ce dessein, je participe à des réunions de groupes de travail, notamment au sein des GDR MACS et STIC-Santé. J'ai d'ailleurs organisé en 2005 une journée scientifique pour le GDR STIC-Santé sur les dispositifs d'entraînement et de rééducation. Je participe à de nombreuses conférences, sources de rencontres enrichissantes et parfois fructueuses en termes de collaborations scientifiques. Celles-ci ont par exemple débouché sur une collaboration internationale avec le Professeur Horst Schulte de l'Université Nouvelle de Berlin. J'ai co-organisé une session spéciale à IEEE-Fuzz 2007 qui m'a ouvert des portes pour de nombreux comités de programmes de conférences internationales. De plus, je suis membre du TC 8.2 (BIOMED) de l'IFAC mais aussi du TC Haptics de l'IEEE. Enfin, mes nombreuses invitations pour des évaluations d'articles dans des revues scientifiques de bon niveau mais aussi ma participation aux comités de sélections (CoS) de l'UVHC et de l'UPJV attestent également de mon rôle d'expert au sein de la communauté scientifique.

Sur le plan scientifique, partant de travaux en biomécanique de la posture humaine, je me suis intéressé en fin de thèse à des problématiques de l'automatique telles que la **commande** et l'**observation** des **systèmes non linéaires**. Ces thématiques à caractère théorique sont devenues, par la suite et depuis ma nomination en qualité de maître de conférences, le cœur de mon activité de recherche. Coïncidence somme toute heureuse dans la mesure où ce n'était pas nécessairement ce type de compétences qui se dégagait le plus de

mon profil lors de mon recrutement et que j'avais une réelle envie de m'investir dans des travaux plus théoriques. Ainsi, je me suis particulièrement intéressé aux **modèles de type Takagi-Sugeno**. Notons que le choix de cette thématique tient aussi bien de « l'héritage » transmis par Thierry-Marie Guerra (puisque'il m'a accompagné pour la finalisation de mes travaux de thèse au LAMIH) que du contexte scientifique et des travaux en cours lors de mon arrivée au CReSTIC en 2005.

Ma contribution théorique concerne donc essentiellement l'obtention de **conditions de stabilité** et la **synthèse de contrôleurs** pour les modèles TS. Par le choix d'une fonction candidate de Lyapunov appropriée, un ensemble d'inégalités matricielles est obtenu selon le problème considéré. A l'instar des Inégalités Matricielles Linéaires (LMI), qui peuvent être résolues lorsqu'une solution existe à l'aide des outils de l'optimisation convexe, les BMI ne peuvent être résolues de manière directe et nécessitent la mise en œuvre d'algorithmes séquentiels qui ne garantissent pas l'existence ou l'absence de solution. De plus, le choix de la fonction candidate de Lyapunov, la prise en compte ou non des fonctions d'appartenance, mais aussi les techniques de majorations et transformations matricielles employées pour obtenir des conditions LMI, sont autant de sources de conservatisme. Aussi, les travaux théoriques présentés visent deux objectifs principaux :

- La **formulation de conditions LMI** pour des problèmes de commande particuliers (suivi de trajectoire, stabilisation des descripteurs TS, retour de sortie, commande décentralisée...).
- La **réduction du conservatisme** des conditions LMI (approches non quadratique de Lyapunov, lemmes de relaxation...).

Ainsi, avec pour point de départ des travaux en cours au CReSTIC lors de mon arrivée sur la commande des systèmes TS et mes compétences acquises dans ce domaine lors de mes propres travaux de thèse, nous avons tout d'abord proposé des conditions LMI pour la synthèse quadratique robuste de lois de commande par retour de sortie et en suivi de trajectoires pour les systèmes TS incertains et perturbés.

Ensuite, ayant auparavant abordé des problèmes de synthèse d'observateur sous la forme descripteur au cours de ma thèse, nous nous sommes intéressés à la commande de cette classe de systèmes. Ainsi, dans le cadre de la thèse de Tahar Bouarar, des conditions LMI pour la stabilisation robuste des descripteurs TS ont été proposées. Afin de réduire le conservatisme des approches considérées, ces conditions ont été obtenues par le biais de fonctions candidates de Lyapunov non quadratiques. Parallèlement à ces travaux, l'extension

de ces approches a été proposée pour le suivi de trajectoire des descripteurs TS incertains et perturbés (thèse de Lynda Seddiki) mais aussi pour la commande décentralisée des descripteurs TS de grandes dimensions (travaux de thèse en cours de Dalel Jabri).

Tirant parti des connaissances acquises et notamment de la propriété de redondance analytique des descripteurs, c'est-à-dire l'association d'équations dynamiques et statiques au sein d'un même système d'équations algèbro-différentielles, j'ai proposé de traiter certains problèmes relatifs à la commande par retour de sortie. En effet, la réécriture « redondante » sous forme descripteur d'une dynamique en boucle fermée permet de découpler les matrices de commande de celles du système dynamique à contrôler. Or, en ce qui concerne le retour de sortie, les approches classiques mènent à l'apparition de nombreux termes croisés. Ceux-ci rendent difficile l'obtention de conditions LMI et ruinent leur extension au cadre non quadratique. L'approche redondante proposée a permis de lever ces verrous et des conditions LMI non quadratiques ont pu être proposées pour la synthèse de lois de commande robustes par retour de sortie (aussi bien statique que dynamique) pour les systèmes TS incertains et perturbés.

Constatant certains problèmes relatifs à la mise en œuvre des conditions LMI non quadratiques, et notamment à l'apparition des dérivées des fonctions d'appartenance au sein de ces conditions, nous nous sommes intéressés à proposer des approches alternatives permettant de contourner ce problème. Dans un premier temps, des fonctions de Lyapunov non quadratiques données sous forme d'intégrales curvilignes ont été considérées. Néanmoins, celles-ci nécessitent la vérification de contraintes extrêmement restrictives, liées à l'indépendance du chemin parcouru. Une autre alternative, cette fois-ci plus heureuse, a par conséquent été explorée. Celle-ci consiste en la redéfinition des objectifs d'analyse des systèmes TS. En effet, la majorité des travaux tentent d'établir des conditions de stabilité globales pour les systèmes TS. Or, en considérant le problème sous un angle local, nous avons montré que des conditions LMI pouvaient être obtenues sans nécessiter la connaissance, préalable à la résolution des LMI, de paramètres difficiles à obtenir (bornes des dérivées des fonctions d'appartenance).

Par ailleurs, puisque le problème d'obtention de conditions non quadratiques relève principalement de la difficulté d'obtenir des conditions matricielles convexes, je me suis très récemment intéressé à d'autres techniques d'optimisation et notamment aux approches polynomiales. Ainsi, des conditions de stabilité écrites sous forme de contraintes SOS (Sum-Of-Square) pour la classe des systèmes TS polynomiaux (qui inclue par ailleurs les systèmes

TS standards) ont été proposées par le biais d'une nouvelle fonction candidate floue de Lyapounov polynomiale. Notons que ces travaux constituent une extension des approches non quadratiques (cas particulier des fonctions de Lyapounov polynomiales d'ordre 2) et que, par conséquent, cette nouvelle approche permet d'obtenir des conditions convexes d'analyse de la stabilité globale dans le cadre non quadratique là où, pour l'heure, les conditions LMI échouent.

Enfin, dans le but de fédérer les travaux réalisés aux CReSTIC sur la commande des SED et la commande des systèmes continus autour d'une thématique commune d'analyse des SDH, nous nous sommes intéressés à la commande des systèmes à commutations. Dans ce dessein, des techniques LMI sont employées et les travaux proposés constituent une ouverture vers d'autres classes de systèmes dynamiques vis-à-vis des techniques acquises lors de l'étude des systèmes TS. En effet, à cause de la nature des systèmes à commutations, l'existence d'une fonction de Lyapounov commune entre sous-systèmes constitue une condition nécessaire et suffisante de stabilité. Par conséquent, il devient possible d'effectuer un parallèle entre les approches quadratiques développées pour les systèmes TS et l'analyse des systèmes à commutations. Ainsi, nous nous sommes intéressés dans un premier temps à la stabilisation robuste des systèmes linéaires incertains et perturbés à commutations. Des conditions LMI ont alors été proposées et ont ensuite été étendues au cas de la stabilisation décentralisée des systèmes à commutations de grandes dimensions. Enfin, ce type d'approches a été étendu au cas des systèmes non linéaires incertains et perturbés à commutations en considérant un modèle TS pour chaque mode du SDH.

D'un point de vue applicatif, mes travaux ont porté principalement sur la conception et la commande de machines de rééducation. Cette thématique s'appuie sur un savoir faire reconnu de l'équipe AUTO et qui a notamment conduit au développement, avant mon arrivée au CReSTIC, de la machine de rééducation et d'entraînement isocinétique Multi-ISO. Ainsi, dans le cadre du projet CPER SysRéeduc et de la thèse de Lynda Seddiki, tirant parti de mon expérience préalable en biomécanique, nous avons proposé un nouveau dispositif permettant la rééducation en chaîne musculaire fermée des membres inférieurs. Ce type d'appareil permet de garantir une rééducation équilibrée du complexe musculo-squelettique par la réalisation de mouvements physiologiquement proches des sollicitations rencontrées dans la vie courante (marche, lever de chaise...). Un premier prototype a alors été réalisé en partenariat avec le CRITT-MDTS de Charleville-Mézières et une nouvelle structure de

commande a été proposée. Celle-ci permet de garantir la sécurité, mais aussi le rôle actif de l'utilisateur. Un premier étage permet de générer les trajectoires des mouvements à faire suivre par le dispositif sur la base de la détection des actions volontaires de l'utilisateur (mesure des forces appliquées par l'utilisateur sur le dispositif). Un second étage permet quant à lui de garantir le suivi des trajectoires générées. Ce dernier fait intervenir une loi de commande robuste synthétisée via les techniques LMI développées pour la stabilisation des modèles TS.

D'autres travaux à caractère applicatif ont également été entrepris. Ainsi, dans le cadre d'une collaboration internationale (Horst Schulte, Allemagne), une modélisation en vue de la commande d'un robot pneumatique a été réalisée. Celui-ci fait intervenir des dynamiques fortement non linéaires. Une approche de modélisation TS sous forme descripteur a été adoptée et une loi de commande PDC a pu être proposée sur la base des travaux théoriques développés sur la stabilisation robuste des descripteurs TS.

Enfin, de manière beaucoup plus épisodique, j'ai participé à quelques travaux d'analyse du mouvement en biomécanique. Ceux-ci résultent d'un savoir faire acquis lors de mes premiers travaux de recherche au sein de l'équipe biomécanique du LAMIH (Valenciennes). Ainsi, dans le cadre d'une collaboration avec le Dr Yannick Delpierre (Centre de l'Arche à Saint-Saturnin), une étude comparative de la marche des IMC avec une population saine a été réalisée. Celle-ci a permis de mettre en évidence, par le biais de l'analyse des phases relatives du mouvement, des paramètres explicatifs de la coordination motrice des membres inférieurs pouvant aider les cliniciens à adapter leurs diagnostics et protocoles de rééducation. Enfin, un travail collaboratif a également été réalisé avec le Pr Redha Taïar (LACM, Reims) en vue de l'analyse du mouvement de la phase d'initiation aux plongeurs de nageurs de haut niveau.

À ce stade, une petite autocritique s'impose : la rédaction d'une HDR est souvent abordée par le candidat en réalisant un état des lieux de ses activités d'enseignant-chercheur depuis le début de sa carrière. Ainsi, après s'être essoufflé par la rédaction de l'ensemble de ses activités passées, vient le moment d'aborder les perspectives. Or, si l'HDR ne constitue pas un aboutissement, mais une étape vers plus de responsabilités, il conviendrait probablement de commencer par porter plus d'attention à la rédaction des perspectives. L'expérience se nourrit d'erreurs et, en ce qui me concerne, je ne déroge pas à la règle. Peut-être faut-il déjà être passé par là pour s'en rendre compte? Quoiqu'il en soit...

À mon sens, une recherche de qualité ne peut être envisagée qu'en s'appuyant sur des échanges et des collaborations effectives. Bien entendu, cela dépendra des opportunités qui me seront offertes. Néanmoins, je souhaite à court ou moyen terme établir et conforter de nouveaux liens avec des chercheurs relevant des disciplines des mathématiques appliquées. Dans cette optique, des contacts ont été pris avec des chercheurs du **LMR**²⁹ de l'URCA. J'ai par ailleurs proposé et encadré cette année un premier stage de recherche M2 **MMSI**³⁰ au CReSTIC. De plus, je souhaite maintenir et développer mes collaborations sur le plan international. Dans ce sens, un professeur invité (H. Schulte, Allemagne) sera prochainement accueilli au sein de notre équipe (mars 2011). Par ailleurs, je projette d'effectuer un séjour de deux mois (avril-mai 2011) à l'Université Polytechnique de Valence (Espagne) afin d'approfondir mes travaux sur les approches SOS avec le professeur Antonio Sala.

Au plan national, une idée germe dans ma tête depuis quelque temps et suit son chemin. Il s'agit de proposer la création d'un nouveau GT au sein du GDR MACS, axé sur les techniques de commande et d'observation des systèmes flous. Ce nouveau GT pourrait s'appuyer sur des manifestations nationales telles que les rencontres francophones sur la Logique Floue et ses Applications (LFA) mais aussi sur des sessions spéciales dans des conférences internationales (FUZZ-IEEE, EUSFLAT, IFAC AFNC...). Notons par ailleurs que je me suis déjà positionné auprès du comité de pilotage de LFA pour l'organisation éventuelle à Reims d'une future édition.

D'un point de vue recherche, mes perspectives concernent aussi bien des **aspects structurels** que d'analyse et de **commande des systèmes non linéaires et hybrides**. Elles se nourrissent naturellement du bilan de mes travaux, de mon parcours et de mes expériences tant sur le plan humain que scientifique. Ainsi, dans la continuité des contributions proposées jusqu'à présent, les perspectives décrites ci-dessous peuvent naturellement être dégagées.

Tout d'abord, une grande partie de mes travaux considère des techniques dévolues aux descripteurs pour l'analyse des systèmes non linéaires. Notons que celles-ci n'ont pas été utilisées pour traiter des problèmes inhérents aux systèmes singuliers, auxquels on associe souvent la notion de descripteur, mais dans le but de proposer une généralisation des conditions de stabilisation/stabilité LMI pour une large classe de systèmes dynamiques avec un conservatisme modéré. Une suite possible à ces travaux serait donc de proposer des

²⁹ Laboratoire de Mathématiques de Reims, EA 4535.

³⁰ Modélisation Mathématique pour les Sciences de l'Ingénieur.

conditions permettant de **traiter certains problèmes structurels des systèmes non linéaires singuliers**. En effet, étudier la stabilité (admissibilité) de tels systèmes nécessite de tenir compte de propriétés de régularité ou encore de non-impulsivité. Or, si ces notions sont bien connues et maîtrisées dans le cadre linéaire [Dai, 1989], il n'en est pas de même pour les systèmes non linéaires. En effet, par l'utilisation des approches usuelles (basée sur l'emploi d'un vecteur d'état étendu), des travaux ont montré qu'il n'était pas possible de garantir la non-impulsivité du modèle non linéaire [Marx et Ragot, 2008]. Par conséquent, une piste d'étude pourrait être de chercher à formaliser, via une approche TS, des conditions suffisantes pour les descripteurs non linéaires correspondantes à ces propriétés structurelles des systèmes linéaires singuliers.

Un autre point important de mes travaux de recherche concerne la synthèse de lois de commande robustes par retour de sorties pour les systèmes TS. Notons que ces approches de commande présentent un intérêt applicatif puisqu'elles permettent de stabiliser un système dynamique par la seule mesure de ses grandeurs accessibles (variables de sorties). Or, pour l'heure, les travaux que nous avons proposés ne tiennent pas compte de variables de prémisses non mesurables. En effet, il ne faut pas perdre de vue que les lois de commande synthétisées sont basées sur le concept PDC et utilisent, par conséquent, les fonctions d'appartenance des modèles TS qu'elles stabilisent. Dans ce cas, et d'un point de vue pratique, ceci s'avère restrictif. La recherche de conditions (LMI ou SOS) pour la synthèse de lois de commande robustes par **retour de sorties avec prémisses non-mesurables**, par exemple dans l'esprit des travaux menés au CRAN pour le diagnostic [Ichalal, 2009], est une perspective intéressante de ces travaux de recherches.

D'autre part, de nombreux résultats existent pour la commande des systèmes TS dans le cadre quadratique. Ceux-ci font intervenir une fonction candidate de Lyapunov conduisant à la recherche de variables de décisions communes à un ensemble de contraintes LMI. Les techniques d'obtention de ces conditions LMI quadratiques sont à ce jour bien maîtrisées. Elles sont basées sur l'application de lemmes de transformations matricielles (Complément de Schur, lemme d'élimination, lemme de Finsler...). Aussi, même s'il est possible que tous les problèmes de commande ou d'observation des systèmes TS n'aient pas encore été traités, l'obtention de conditions de stabilité quadratiques ne constitue plus un « enjeu majeur », mais tout au plus une $n^{\text{ième}}$ extension des techniques existantes. Cela dit, le défi de l'**extension dans le contexte non quadratique** demeure un problème ouvert. En effet, même si de nombreux travaux ont été proposés dans ce sens, peu d'entre eux permettent de s'affranchir d'hypothèses restrictives ou difficiles à vérifier. Ce n'est que très récemment que des

conditions LMI non quadratiques de stabilité et de stabilisation ne nécessitant pas la connaissance des bornes des dérivées des fonctions d'appartenance ont été proposées [Guerra et Bernal, 2009][CN19]. Celles-ci concernent des problèmes d'automatique classiques tels que la stabilité intrinsèque et la stabilisation par retour d'état et sont obtenues au prix d'une redéfinition des objectifs d'analyse des systèmes TS à un contexte local. De plus, la formulation et l'implémentation de ces conditions LMI non quadratiques s'avèrent relativement complexes. Un effort doit donc être effectué en vue de simplifier, dans la mesure du possible, ces approches et/ou de proposer des boîtes à outils permettant de faciliter leur utilisation dans le champ applicatif. Notons enfin que l'extension de ces approches à des problèmes spécifiques (commande par retour de sortie, commande optimale, commande robuste, etc.) reste encore à réaliser et constituera probablement, à plus ou moins court terme, la source de nombreux travaux.

À ce stade, un constat s'impose : la quasi-totalité des travaux existants dans la littérature, relatifs à l'analyse des systèmes TS (mais aussi hybrides ou encore LPV), reposent sur la résolution de contraintes écrites sous forme d'inégalités matricielles. Bien qu'ayant démontrés leur efficacité depuis de nombreuses années, les efforts réalisés dans le but d'aboutir à des conditions nécessaires et suffisantes de stabilité conduisent à une formulation LMI de plus en plus complexe pour une diminution du conservatisme parfois minime. Il convient donc aujourd'hui de nous interroger sur les limites possibles de ces approches. En effet, si tel était le cas, l'utilisation des outils LMI pour la recherche de fonction de Lyapunov pourrait traduire un « entêtement » conduisant à des avancées peu significatives. Une question d'actualité est, par conséquent :

Quelles sont les alternatives aux approches LMI?

Parmi les techniques d'optimisation de problèmes convexes, l'approche polynomiale semble être en mesure d'ouvrir de nouvelles voies. En effet, des avancées récentes ont été réalisées pour l'analyse de la stabilité et la synthèse de lois de commande des systèmes dynamiques polynomiaux [Powers et Wormann, 1988][Henrion et Garulli, 2005]. De nouveaux outils de l'optimisation convexe ont été développés sur la base de décompositions polynomiales en somme de carrés (**Sum Of Square**) [Prajna, 2004]. Ces nouvelles techniques suscitent cependant quelques critiques [Löfberg, 2009]. Leurs détracteurs stipulent qu'il est

difficile de garantir quoique ce soit à l'aide des boîtes à outils SOS actuelles. En effet, j'en conviens, les résultats obtenus peuvent parfois être ambiguës.

N'en était-il pas de même lors de l'apparition des premiers outils de résolution LMI?

Nous noterons que ces outils d'optimisation SOS font l'objet de nombreux développements actuels et que l'on peut espérer disposer d'outils fiables, sinon d'outils dont les résultats sont plus facilement interprétables, dans un proche avenir. Basées sur les approches SOS, des conditions de stabilité/stabilisation des systèmes TS polynomiaux ont très récemment été proposées [Tanaka et al., 2009][Narimani et Lam, 2010]. Dans ce cadre, nos travaux récents ont porté sur des conditions SOS de stabilité via l'emploi d'une nouvelle fonction candidate polynomiale floue de Lyapounov [RS3]. Notons que cette approche inclut, à titre de cas particulier, les fonctions de Lyapunov aussi bien quadratiques que non quadratiques et promet par conséquent d'intéressants résultats à venir. En effet, l'extension à la stabilisation reste à finaliser. Par ailleurs, si les approches SOS constituent une alternative élégante aux LMI, l'extension de celles-ci à des problèmes spécifiques de commande (retour de sortie, commande robuste, etc.) demeure à ce jour un champ où peu de travaux ont été réalisés. Le train est en marche et il nous semble important de le prendre, que ce soit pour l'analyse des systèmes TS, mais aussi hybrides ou encore LPV.

Jusqu'ici, les perspectives présentées concernent des problèmes sur lesquels je souhaite déployer mes efforts à plus ou moins court terme. Néanmoins, d'autres extensions possibles des travaux entrepris peuvent être envisagées. Ainsi, concernant la commande décentralisée des systèmes de grandes dimensions, les approches que nous avons retenues jusqu'à présent consistent en la réécriture du système sous forme de modèles TS ou hybrides interconnectés. Notons que, d'un point de vue purement mathématique, les conditions LMI obtenues ne permettent pas de diminuer le conservatisme vis-à-vis de conditions classiquement applicables aux systèmes de dimensions raisonnables, mais plutôt de faciliter la résolution du problème d'optimisation convexe lorsque le coût de calcul augmente en raison de la taille des variables de décision. Une perspective de ces travaux, par exemple en vue de l'application à la commande de systèmes en réseaux, pourrait consister en la prise en compte de retards au sein des interconnexions entre sous-systèmes. D'autre part, et de manière quasi systématique au cours de nos travaux, nous avons considéré la robustesse en prenant en compte des incertitudes paramétriques, mais aussi des perturbations externes au sein des classes de

systèmes étudiées. D'autres techniques, sur lesquelles je ne me suis que très peu penché pour l'heure, permettent de garantir ou d'améliorer la sécurité des systèmes. Ainsi, il pourrait être intéressant d'aborder la synthèse d'observateurs TS et/ou hybrides à des fins de diagnostic et/ou de commande tolérante aux fautes.

D'un point de vu applicatif, il va de soit que les techniques de commande développées sont génériques à de nombreux systèmes dynamiques et ne se limitent pas à la commande de tel ou tel processus dans un domaine particulier. J'entends ici insister sur le fait que mes travaux ont pris une direction plus fondamentale au sens de l'automatique et que je me considère moins, aujourd'hui, spécialiste d'un problème applicatif particulier (par exemple la stabilité posturale de l'homme en station debout). Cela ne diminue en rien mon intérêt pour la recherche expérimentale, mais j'aspire plutôt à déployer mes compétences d'automaticien, au travers de collaborations ou de partenariats, à des problématiques applicatives variées. À titre d'exemple, on peut penser que, dans les années à venir et avec les contraintes environnementales auxquelles nous avons à faire face, des applications liées aux processus de production d'énergies renouvelables constitueront un domaine d'application porteur, capable de fédérer une partie de notre communauté. Néanmoins, à plus ou moins court terme, et compte tenu de la sensibilité applicative qui se dégage de mon parcours initial, j'envisage d'entreprendre de nouvelles collaborations dans le domaine de l'ingénierie biomédicale. Ainsi, avec le Dr Didier Pradon, responsable du laboratoire d'analyse du mouvement de l'hôpital Raymond-Poincaré à Garches, nous envisageons une collaboration dans un proche avenir pour développer une méthode d'estimation, à base d'observateurs non linéaires, de l'attitude posturale et des forces appliquées par un sujet en fauteuil roulant. L'idée est ici d'analyser les phénomènes compensatoires que met en œuvre le sujet lors de phases d'équilibre sur deux roues et ainsi d'évaluer son niveau d'apprentissage et d'expertise pour manœuvrer un fauteuil roulant.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

J.H.J. Allum, B.R. Bloem, M.G. Carpenter, M. Hulliger, M. Hadders-Algra, *Proprioceptive control of posture: a review of new concepts*, *Gait & Posture*, 8(3) :214-242, 1998.

Anaes, *Les appareils d'isocinétisme en évaluation et en rééducation musculaire: intérêt et utilisation*, Agence National d'Accréditation et d'Evaluation en Santé, février 2001.

P. Apkarian, J. M. Biannic, P. Gahinet, *Self-Scheduled H-infinity Control of a Missile via Linear Matrix Inequalities*, *Journ. of Guidance Control and Dyn.*, 18(3) :532-538, 1993.

B

S. Boyd, L. El Ghaoui and E. Feron, *Linear matrix inequalities in system and control theory*, Siam, 1994

M.S. Branicky, *Multiple lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems*, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 43(4) :475-482, 1998.

E.B. Bynum, R.L. Barrack, A.H. Alexander, *Open versus closed chain kinetic exercices after anterior cruciate ligament reconstruction: A prospective randomized study*, *American Journal of Sports Medicine*, 23(4):401-406, 1995.

C

S.L. Campbell, *Singular systems of differential equations II*, *Research notes in mathematics*, London: Pitman Publishing Inc.; 1982.

M. Chadli, *Stabilité et commande des systèmes décrits par des multimodèles*, thèse de l' Institut National Polytechnique de Lorraine, décembre 2002.

M. Chadli, A. El Hajjaji, *Comment on "Observer-based robust fuzzy control of nonlinear systems with parametric uncertainties"*, *Fuzzy Sets & Systems*, 157(9) :1276-1281, 2006.

M. Chadli, D. Maquin, J. Ragot, *An LMI formulation for output feedback stabilisation in multiple model approach*, *Proceedings of the IEEE 41th Conference on Decision Control (CDC02)*, USA, 10-13 Dec. 2002.

F. Cherier, J. Dansereau, Y. Petit, C.E. Aubin, H. Labelle, J.A. De Guise, *Towards the self-calibration of a multiview radiographic imaging system for the 3D reconstruction of the human spine and rib cage*, *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 13(5) :771-779, 1999.

Cherouali, T. *Caractérisation et implantation de la stimulation mécanique de la boucle neuromusculaire gamma sur une machine isocinétique*, Thèse de l'université de Reims Champagne Ardenne, France, 2004.

B. Colobert, A. Créteil, P. Allard, P. Delamarche, *Force-plate based computation of ankle and hip strategies from double-inverted pendulum model*, *Clinical Biomechanics*, 21(4) :427-434, 2006.

D

L. Dai, *Singular control systems*, Lecture notes in control and information sciences, Berlin: Springer; 1989.

A. Denève, *Développement et commande d'un robot pour la rééducation des membres supérieurs*, Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, décembre 2007.

C. Döll, *La robustesse de lois de commande pour des structures flexibles en aéronautique et espace*, Thèse de l'Ecole nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace SUPAERO, 2001.

E

N. Essounbouli, *Commande adaptative floue robuste des systèmes non linéaires incertains*, Thèse de l'Université de Reims Champagne-Ardenne, Avril 2004.

F

G. Feng and L. Wang, *Controller synthesis of fuzzy dynamic systems based on piecewise Lyapunov functions*, FUZZ-IEEE'2001, Melbourne, Australia, 2001.

G. Feng, *H-infinity controller design of fuzzy dynamic systems based on piecewise Lyapunov functions*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: 34(1), 2004.

G. Feng, *A Survey on Analysis and Design of Model-Based Fuzzy Control Systems*, IEEE Trans Fuzzy Systems, 14(5) :676- 697, 2006.

E. Fridman, U. Shaked, *H ∞ control of non linear state delay descriptor systems: An LMI approach*, Linear Algebra and its Applications, 351-352 :271-302, 2002.

G

P. Gahinet, A. Nemirovski, A.J. Laub and M. Chilali, *LMI Control Toolbox*, The Mathworks Inc, 1995.

K. Gasso, G. Mourot, A. Boukhriss et J. Ragot, *Optimisation de la structure d'un modèle de Takagi-Sugeno*, Actes des rencontres francophones (LFA), Valenciennes, France, 1999.

K. Gasso, *Identification des systèmes dynamiques non-linéaires : approche multi-modèles*, Thèse de l'INPL, Décembre, 2000

T.M. Guerra, M. Bernal, A. Kruszewski and M. Afroun, *A way to improve results for the stabilization of continuous-time fuzzy descriptor models*, Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans, USA, 2007.

T.M. Guerra and M. Bernal, *A way to escape from the quadratic framework*, in Proc. FUZZ-IEEE Conference, Jeju, Korea, 2009.

T.M. Guerra and L. Vermeiren, *LMI based relaxed nonquadratic stabilizations for non-linear systems in the Takagi-Sugeno's form*, Automatica, 40(5) :823-829, 2004.

H

W.M. Haddad, D.S. Bernstein, *Controller design with regional pole constraints*, IEEE Trans. Automat. Control, 37 (1) :54-69, 1992.

H. Hatze, *The inverse dynamics problem of neuromuscular control*, Biological Cybernetics, 82 :133-141, 2000.

D. Henrion, A. Garulli, *Positive polynomials in control*, Lecture notes in control and information sciences, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2005.

D. Huang and S. K. Nguang, *Robust H_∞ static output feedback control of fuzzy systems: An ILMI approach*, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B, 36(1) :216–222, 2006.

D. Huang and S.K. Nguang, *Static output feedback controller design for fuzzy systems: An ILMI approach*, Information Sciences, 177(14) :3005–3015, 2007.

I

D. Ichalal, *Estimation et diagnostic de systèmes non linéaires décrits par un modèle de Takagi-Sugeno*, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.

J

A. Jadbabaie, *A reduction in conservatism in stability and gain analysis of Takagi-Sugeno fuzzy systems via linear matrix inequalities*, 14th IFAC Triennial World Congress, Beijing, China: 285–289, 1999.

M. Johansson, *Piecewise linear control systems*, Ph.D. dissertation, Lund Institute of Technology, 1999.

M. Johansson, A. Rantzer and K.E. Arzen, *Piecewise quadratic stability of fuzzy systems*, IEEE Trans. Fuzzy Systems, 7(6) :713-722, 1999.

K

I.A. Kapandji, *Physiologie articulaire. Membre inférieur: La hanche, le genou, la cheville, le pied, la voûte plantaire*. Edition S.A. Maloine, 1985.

S. Kawamoto, K. Tada, A. Ishigame and T. Taniguchi, *An approach to stability analysis of second order fuzzy systems*, IEEE International Conference on Fuzzy Systems : 1427–1434., 1992.

E. Kim and H. Lee, *New approaches to relaxed quadratic stability condition of fuzzy control systems*, IEEE Trans. Fuzzy Systems, 8(5) :523-534, 2000.

L

H.K. Lam, *Stability analysis of sampled-data fuzzy controller for nonlinear systems based on switching T-S fuzzy model*, Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, 3(4) :418-432, 2009.

H. K. Lam, H. Frank, F. Leung, K. Peter and S. Tam. *A switching controller for uncertain nonlinear systems*, IEEE Control Systems Magazine, 7-14, 2003.

F. H. F. Leung, H. K. Lam, P. K. S. Tam, *Design of fuzzy controllers for uncertain nonlinear systems using stability and robustness analyses*, Systems & Control Letters, 35(4) :237-243, 1998

J. Li, H. O. Wang, D. Niemann and K. Tanaka, *Dynamic parallel distributed compensation for Takagi-Sugeno fuzzy systems: An LMI approach*, Information Sciences, 123(3-4) :201-221, 2000.

J. Li, S. Zhou and S. Xu, *Fuzzy Control Systems design via Fuzzy Lyapunov Functions*, IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics – Part B, 38(6)1657-1661, 2008.

Liapounoff, A., *Problème général de la stabilité du mouvement*, Annales de la faculté des sciences de Toulouse, (9):203–474, 1907 (traduction en français du mémoire Russe).

D. Liberzon and A.S. Morse, *Basic problems in stability and design of switched systems*, IEEE Control Systems, 19(5):59-70, 1999.

Y. Lin, E. D. Sontag and Y. Wang, *A Smooth converse Lyapunov theorem for robust stability*, SIAM Journal on Control and Optimization, 34 :124-160, 1996.

X. Liu and Q. Zhang, *New approaches to H_∞ controller design based on fuzzy observers for fuzzy T-S systems via LMI*, Automatica, 39(9) :1571-1582, 2003.

J. Löfberg, *Pre- and Post-Processing Sum-of-Squares programs in practice*, IEEE Trans. on Automatic Control, 54(5) :1007-1011, 2009.

D.G. Luenberger, *Dynamic equation in descriptor form*. IEEE Trans Automat Control, AC-22:312–21, 1997.

G.E. Lutz, R.A. Palmitier, K.N. An, *Comparaison of tibio-fémoral joint forces during open kinetic chain and closed kinetic chain exercices*, J. Bone Joint Surg, 75(A) :732-739, 1993.

M

X. J. Ma, Z. Q. Sun and Y. Y. He, *Analysis and design of fuzzy controller and fuzzy observer*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 6(1): 41-50, 1998.

B.P. Ma, J. Sun, *Robust stabilization of uncertain T–S fuzzy descriptor systems*. In: Proceedings of the 3rd IEEE international conference on machine learning and cybernetics. 2004.

N. Manamanni, B. Mansouri, A. Hamzaoui and J. Zaytoon, *Relaxed Conditions in Tracking Control Design for T-S Fuzzy Model*. JIFS, Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 18(2) :185-210, 2007.

Mansouri, B., *Contribution à la synthèse de lois de commandes en poursuite de trajectoire pour les systèmes flous de type Takagi-Sugeno incertains*, Thèse de l'Université de Reims Champagne Ardenne, décembre 2005.

G.T. Marzan, H.M. Karama, *A computer program for direct linear transformation solution of the colinearity condition and some application of it*. Symposium on closed-range photogrammetric systems, pp. 420-476, American Society of Photogrammetry, Falls, Church, 1975

B. Marx and J. Ragot, *Controller and observer designs for a class of TS descriptor systems with pole placement constraint*, 45th IEEE Conference on Decision and Control, San Diego, CA, USA, December 13-15, 2006.

B. Marx and J. Ragot, *Stability and L_2 norm bound conditions for Takagi-Sugeno descriptor systems*, IFAC World Congress, 2008.

V.F. Montagner, V.J.S. Leite, R.C.L.F. Oliveira, P.L.D. Peres. *State feedback control of switched linear systems: An LMI approach*, Journal of Computational and Applied Mathematics, 194 :192–206, 2006.

Y. Morère, *Mise en oeuvre de lois de commande pour les modèles flous de type Takagi-Sugeno*, Thèse de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2001.

S. Moughamir, *Conception et développement d'une machine d'entraînement et de rééducation des membres inférieurs*, Thèse de doctorat de l'université de Reims Champagne Ardenne, France, 1999.

S. Moughamir, J. Zaytoon, N. Manamanni, L. Afilal, *A system approach for control development of lower-limbs training machines*, Control Engineering Practice, 287-299, 2001.

L.A. Mozelli, R.M. Palhares, F.O. Souza, E.M.A.M. Mendes, *Reducing conservativeness in recent stability conditions of TS fuzzy systems*, Automatica, 45(6) :1580-1583, 2009.

N

M. Narimani and H.K. Lam, *SOS-based stability analysis of polynomial fuzzy model-based control systems via polynomial membership functions*, IEEE Trans. Fuzzy Syst., forthcoming, doi:10.1109/TFUZZ.2010.2050890, 2010.

L.M. Nashner, *Adaptation of human movement to altered environments*, Trends in Neural Sciences, 358-361, 1992.

S.K. Nguang and P.Shi, *Robust Output Feedback Control Design for Takagi-Sugeno Systems with Markovian Jumps: A Linear Matrix Inequality Approach*, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 128(3) :617-625, 2006.

J.P. Nougier, *Méthodes de calcul numérique. Vol 2: Fonctions équations aux dérivées*, Ed. HERMES Science Europe, Paris, 2001.

O

J.J. O'Connor, *Can muscle co-contraction protect knee ligaments after injury or repair*, J.Sports Med, 21(3):438-444, 1993.

H. Ohtake, K. Tanaka, H.O. Wang, *Switching fuzzy controller design based on switching Lyapunov function for a class of nonlinear systems*, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics-Part B, 36(1) :13-23, 2006.

H. Ohtake, K. Tanaka, H.O. Wang, *A construction method of switching Lyapunov function for nonlinear systems*, in: IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Honolulu, HI, pp 221–226, May 12-17, 2002.

P

D. Peaucelle, *Modèles descripteurs redondants et réduction du pessimisme des conditions LMI*, JN-MACS, Reims, 2007

S. Prajna, A. Papachristodoulou, P. Seiler, P.A. Parrilo, *SOSTOOLS: Sum of squares optimization toolbox for MATLAB, Version 2.00*, California Inst. Technol., Pasadena, 2004.

R

R. M. Redheffer, *On a certain linear fractional transformation*, J. Math. And Phys, 39 (1960) 269-286.

B.J. Rhee, S. Won, *A new fuzzy Lyapunov function approach for a Takagi–Sugeno fuzzy control system design*, Fuzzy Sets and Systems, 157(9) :1211-1228, 2006.

S

S. Antonio and C. Ariño, *Asymptotically necessary and sufficient conditions for stability and performance in fuzzy control: Applications of Polya's theorem*, Fuzzy Sets and Systems 158 :2671-2686, 2007.

A. Sala, T.M. Guerra and R. Babuska, *Perspectives of fuzzy systems and control*, Fuzzy Sets and Systems (Special Issue: 40th Anniversary of Fuzzy Sets), 153(3) :432-444, 2005.

A. Sala, *On the conservativeness of fuzzy and fuzzy-polynomial control of nonlinear systems*, Annual Reviews in Control, 33(1) :48-58, 2009.

A. V. Schaft and H. Shumacher, *An Introduction to Hybrid Dynamical Systems*, Springer , Lecture Notes in Control and information Sciences, 251, 2000.

L. Seddiki, *Développement et commande T-S d'une machine de rééducation des membres inférieurs en chaîne musculaire fermée*, Thèse de l'Université de Reims Champagne-Ardennes, Octobre 2008.

R. N. Shorten and K. S. Narendra, *A sufficient condition for the existence of a common Lyapunov function for two second-order linear*, Decision and Control, 1997., Proceedings of the 36th IEEE Conference on, 10-12 Dec 1997, San Diego, CA , USA.

R. N. Shorten, K. S. Narendra, O. Mason, *A result on common quadratic Lyapunov functions*, IEEE Transactions on Automatic Control, 48(1):110-113,2003.

E.D. Sontag, Y. Wang, On characterizations of the input-to-state stability property, Systems & Control Letters, 24(5) :51-359, 1995

L.A. Steinkamp, M.F. Dillingham, M.D. Markel, *Biomechanical consideration in patellofemoral joint rehabilitation*, Am. J.Sports Med, 21(3):438-444, 1993.

V.L. Syrmos, C.T. Abdallah, P. Dorato and K. Grigoriadis, *Static output feedback – A survey*, Automatica., 33(2) :125-137, 1997.

T

K. Tanaka, T. Ikeda and H.O.Wang, *Fuzzy regulators and fuzzy observers: relaxed stability conditions and LMI-based designs*, IEEE Trans. Fuzzy Systems, 6(2) :1–16, 1998.

K. Tanaka, H. Ohtake and H.O. Wang, *A Descriptor System Approach to Fuzzy Control System Design via Fuzzy Lyapunov Functions*, IEEE Trans Fuzzy Systems, 15(3) :333- 341, 2007.

T. Takagi and M. Sugeno, *Fuzzy identification of systems and its application to modelling and control*, Transactions on Systems Man and Cybernetics, 11(15):116-132,1985.

K. Tanaka and M. Sugeno, *Stability analysis and design of fuzzy control systems*, *Fuzzy Sets and Systems*, 45(2) :135-156, 1992.

K. Tanaka and H.O. Wang, *Fuzzy control systems design and analysis. A linear matrix inequality approach*, Wiley, New York, 2001.

K. Tanaka, T. Hori, H. O. Wang, *New Parallel Distributed Compensation using time derivative of membership functions*, *A fuzzy Lyapunov approach*, 42th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, Florida, USA, December 2001.

K. Tanaka, T. Hori, and H.O. Wang, *A multiple Lyapunov function approach to stabilization of fuzzy control systems*, IEEE Trans. Fuzzy Systems, 11(4) :582-589, 2003.

K. Tanaka, H. Yoshida, H. Ohtake, H.O. Wang, *A Sum of Squares Approach to Stability Analysis of Polynomial Fuzzy Systems*, *In proc. Of the American Control Conference, ACC '07*, New York, NY, 9-13 July 2007.

K. Tanaka, H. Yoshida, H. Othake and H.O. Wang, *A sum-of-squares approach to modeling and control of nonlinear dynamical systems with polynomial fuzzy systems*, IEEE Trans. Fuzzy Syst., 17(4):991-922, 2009.

T. Taniguchi, K. Tanaka and H.O. Wang, *Fuzzy descriptor systems and nonlinear model following control*, Transactions on Fuzzy Systems, 8(4): 442-452, 2000.

T. Taniguchi, K. Tanaka, H.O. Wang, *Model construction rule reduction and robust compensation for generalized form of Takagi-Sugeno fuzzy systems*, IEEE Trans. on Fuzzy Sys., 9(4) :525-537, 2001.

S. Tong, T. Wang, H. X. Li, *Fuzzy robust tracking control for uncertain nonlinear systems*, International Journal of Approximate Reasoning, 30 :73-90, 2002.

C. Tseng and B. Chen, *H_∞ decentralized fuzzy model reference tracking control design for non linear interconnected systems*, IEEE Trans. Fuzzy Sys., 9(6) :795-809, 2001.

H.D. Tuan, P. Apkarian, T. Narikiyo and Y. Yamamoto, *Parametrized linear matrix inequality techniques in fuzzy control design*, IEEE Trans. Fuzzy Systems, 9 :324-332, 2001.

V

E. Viel, M. Esnault, *Récupération du sportif blessé. De la rééducation en chaîne fermée au stretching en chaîne musculaires*, Edition Masson, 2003.

W

H.O. Wang, K. Tanaka, and M.F. Griffin, *An approach to fuzzy control of nonlinear systems: stability and the design issues*, IEEE Trans. Fuzzy Systems, 4(1) :14-23, 2996.

D.A. Winter, F. Prince, J.S. Frank, C. Powell, K.F. Zabjek, *Unified theory regarding A/P and M/L balance in quiet stance*, Journal of Neurophysiology, 1996

Y

H. Yang, J. Zhao, *Robust controller for a class of uncertain switched fuzzy systems*, Journal of Control Theory and Applications 5(2) :184–188, 2007.

H. Yang, G. Dimirovski, J Zhao, *Switched Fuzzy Systems: Representation Modelling, Stability Analysis, and Control Design*, Studies in Computational Intelligence 109 :155–168, 2008.

J. Yoneyama, *Robust H_∞ control analysis and synthesis for Takagi–Sugeno general uncertain fuzzy systems*, Fuzzy Sets and Systems, 157(16) :2205-2223, 2006

J. Yoneyama, M. Nishikawa, H. Katayama and A. Ichikawa, *Output stabilization of Takagi–Sugeno fuzzy systems*, Fuzzy Sets and Systems, 111(2) :253–266, 2000.

Z

F. Zheng, Q. G. Wang, and T. H. Lee, *Output tracking control of MIMO fuzzy nonlinear systems using variable structure control approach*, IEEE Trans. Fuzzy Sys., 10(6), 2002.

K. Zhou, J Doyle and K. Glover, *Robust and Optimal Control*, Prentice Hall, New Jersey, 1996.

K. Zhou and P. P. Khargonekar, *Robust stabilization of linear systems with norm-bounded time-varying uncertainty*, Syst. Control Letters, 10(1) :17-20, 1998.

D.G. Zill, M.R. Gullen, *Advanced Engineering Mathematics*, second ed., Jones and Bartlett, London, UK, 2000

ANNEXES : TIRES A PART DE PUBLICATIONS SIGNIFICATIVES

Liste des publications proposées :

K. Guelton, S. Delprat, T.M. Guerra, *An alternative to inverse dynamics joint torques estimation in human stance based on a Takagi-Sugeno unknown inputs observer in the descriptor form*, Control Engineering and Practice, 16(12), 1414-1426, 2008.

M. Zerar, K. Guelton, N. Manamanni, *Linear Fractional Transformation Based H-infinity Output Stabilization for Takagi-Sugeno Fuzzy Models*, Med. J. of Measurement and Control, 4(3):111-121, 2008.

B. Mansouri, N. Manamanni, K. Guelton, A. Kruszewski, T.M. Guerra, *Output feedback LMI tracking control conditions with H_∞ criterion for uncertain and disturbed TS models*, Information Sciences, 179(4), 446-457, 2008.

B. Mansouri, N. Manamanni, K. Guelton, M. Djemai, *Robust pole placement controller design in LMI region for uncertain and disturbed switched systems*, Nonlinear analysis: hybrid systems, 2(4):1136-1143, 2008.

K. Guelton, T. Bouarar, N. Manamanni, *Robust dynamic output feedback fuzzy Lyapunov stabilization of Takagi-Sugeno systems – A descriptor redundancy approach*, Fuzzy Sets and Systems, 160(19):2796-2811, 2009.

K. Guelton, T.M. Guerra, M. Bernal, T. Bouarar, N. Manamanni, *Comments on Fuzzy Control Systems Design via Fuzzy Lyapunov Functions*, IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics – Part B, 40(3) :970-972, 2010.

T. Bouarar, K. Guelton, N. Manamanni, *Static output feedback controller design for Takagi-Sugeno systems – A fuzzy Lyapunov LMI approach*, CDC'09, 48th IEEE Conference on Decision and Control, Shanghai, P.R. China, December 16-18 2009.

L. Seddiki, K. Guelton, J. Zaytoon, *Concept and T-S tracking controller design of a CMC lower-limb rehabilitation device*, IET Control Theory & Applications, 4(8) :1407-1420, 2010.

T. Bouarar, K. Guelton, N. Manamanni, *Robust Fuzzy Lyapunov Stabilization for uncertain and disturbed Takagi-Sugeno Descriptors*, ISA Transactions, 49(4) :447-461, 2010.

T.M. Guerra, M. Bernal, A. Jaadari, K. Guelton, *Stabilisation non quadratique locale pour des modèles continus de type Takagi-Sugeno*, CIFA 2010, 6ème Conférence Internationale Francophone d'Automatique. Nancy, 2-4 juin 2010.

K. Guelton, N. Manamanni, D.L. Koumba-Emianiwe, *Sum-of-Square Based Stability Analysis of Polynomial Fuzzy Systems - A New Polynomial Fuzzy Lyapunov Approach*, submitted, 2010.

Pour des raisons de copyright, les références citées ci-dessus ne peuvent être fournies sur un serveur. Si vous souhaitez obtenir l'une de ces références, merci de contacter l'auteur: kevin.guelton@univ-reims.fr