

THÈSE

Présentée pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Reims Champagne Ardenne

Spécialité : Génie informatique, Automatique et Traitement du Signal

Par

Djamel Eddine Chouaib BELKHIAT

**Diagnostic d'une classe de systèmes linéaires à
commutations : Approche à base d'observateurs robustes**

Soutenue le 05 Décembre 2011
devant le jury composé de :

Rapporteurs :

Pr. Vincent COCQUEMPOT
Pr. Taha BOUKHOBZA

Professeur à l'Université des Sciences et Technologies de Lille
Professeur à l'Université Henri Poincaré, Nancy 1

Examineurs :

Pr. Hervé GUÉGUEN
Pr. Janan ZAYTOON
Pr. Nouredine MANAMANNI
Dr. Nadhir MESSAI

Professeur à SUPÉLEC Rennes
Professeur à l'Université de Reims Champagne Ardenne
Professeur à l'Université de Reims Champagne Ardenne
Maître de conférences à l'Université de Reims Champagne Ardenne

*Je dédie cette thèse
à mes très chers parents
à mon épouse et à mes sœurs
à mon frère
à toute ma famille
à mes amis*

Remerciements

Le présent mémoire est le résultat de trois années d'un intense travail de recherche au sein du Centre de Recherche en STIC (CReSTIC) de l'université de Reims Champagne Ardenne. Je voudrais tout d'abord remercier Monsieur **Janan ZAYTOON**, en tant que directeur du CReSTIC pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire, et en tant que membre du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes sincères remerciements vont à Monsieur **Vincent COCQUEMPOT**, Professeur à l'université des Sciences et Technologies de Lille, et à Monsieur **Taha BOUKHOBZA**, professeur à l'université Henri Poincaré Nancy 1, de m'avoir fait l'honneur d'être rapporteur de ma thèse. Leurs remarques et questions pertinentes ont permis d'enrichir le débat lors de la soutenance, d'une part, et d'améliorer le manuscrit, d'autre part.

Je remercie également Monsieur **Hervé GUÉGUEN**, Professeur à SUPÉLEC Rennes, pour avoir accepté d'examiner ce travail et de faire partie de ce jury.

Je suis très heureux que le moment s'est présenté pour exprimer mes gratitude à mes directeurs de thèse Monsieur **Noureddine MANAMANNI**, Professeur à l'université de Reims Champagne Ardenne, et Monsieur **Nadhir MESSAI**, Maître de conférences à l'université de Reims Champagne Ardenne, pour le thème qu'ils m'ont proposé, pour la confiance qu'ils m'ont placée en moi, pour leur disponibilité, pour la documentation qu'ils m'ont mis à ma disposition, pour tous leurs conseils et leurs orientation durant tout le long de ce travail. Durant ces trois ans de thèse, ils n'ont pas cessé de m'inculquer la rigueur pour mener à bien ma thèse. Je leur suis très reconnaissant.

Mes remerciements les plus chaleureux vont à mes parents, mon épouse, mes sœurs, mon frère ainsi qu'à toute ma famille, pour leurs soutiens et leurs encouragements, qu'ils soient certains de toutes mes reconnaissances.

Références personnelles

Revues internationales avec comités de lecture

Belkhiat, D. E. C., Messai, N., & Manamanni, N. (2011). Design of a robust fault detection based observer for linear switched systems with external disturbances. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*. Vol 5, no. 2, pp. 206-219.

Conférences internationales avec comité de lecture

Belkhiat, D. E. C., Messai, N., & Manamanni, N. (2009). Robust Fault Detection Based-Observer for Linear Switched Systems. *The 3rd IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems (ADHS09)*, Zaragoza, Spain, septembre 2009.

Belkhiat, D. E.C., Messai, N., & Manamanni, N. (2011). Design of robust detection observer for discrete-time linear switched system. *18th world Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC 2011)*, Milan, Italy.

Belkhiat, D. E. C, Messai, N., & Manamanni, N. (2011). A fault detection & Isolation scheme for discrete time switched linear systems. *9th IEEE International Conference on Control & Automation (IEEE ICCA'11)*, Santiago, Chile.

Conférences nationales avec comité de lecture

Belkhiat, D. E. C., Messai, N., & Manamanni, N. (2010). Synthèse d'observateur robuste pour la détection de défauts d'une classe de systèmes à commutations. *6^{ème} Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA 2010)*, Nancy, France.

Belkhiat, D. E. C., Messai, N., & Manamanni, N. (2011). Synthèse d'observateur robuste pour la détection de défauts des systèmes linéaires discrets à commutations. *4^{ème} Journées Doctorales/ Journées Nationales MACS (JD-JN-MACS 2011)*, Marseille, France.

Conférences nationales sans actes

Belkhiat, D. E. C., Hamdi, F., Messai, N., & Manamanni, N. (2010). Modélisation et observation pour le diagnostic des systèmes à commutations. *Workshop du GIS 3SGS'10, Surveillance, Sûreté et Sécurité des Grands Systemes*, Reims, France.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE DIAGNOSTIC DES SYSTEMES DYNAMIQUES HYBRIDES	5
I.1. Introduction	6
I.2. Partie 1 : Introduction aux systèmes dynamiques hybrides.....	6
I.2.1. Structure d'un système dynamique hybride	7
I.2.1.1. La partie discrète	7
I.2.1.2. La partie continue	7
I.2.1.3. Interface entre la partie continue et la partie discrète.....	8
I.2.2. Définition formelle des systèmes dynamiques hybrides	8
I.2.3. Quelques classes de systèmes dynamiques hybrides	12
I.2.3.1. Systèmes impulsionsnels (Systèmes à sauts)	13
I.2.3.2. Systèmes linéaires par morceaux.....	14
I.2.3.3. Systèmes à commutations.....	16
I.2.4. Tour d'horizon des problématiques des SDH	18
I.3. Partie 2 : Problématiques et objectifs du diagnostic des SDH.....	20
I.3.1. Les objectifs du diagnostic : Définitions et terminologies.....	21
I.3.2. Classification des défauts.....	22
I.3.3. Principe général du diagnostic à base de modèle	23
I.3.4. Diagnostic à base de modèle des systèmes continus	24
I.3.4.1. Méthodes de génération de résidus	25
I.3.4.2. Evaluation et structuration des résidus	26
a. Les résidus structurés	28
b. Les résidus directionnels	30
I.3.5. Diagnostic à base de modèle des systèmes à événements discrets.....	30
I.3.5.1. Méthodes à base d'une représentation événementielle des défauts	31
I.3.5.2. Méthodes reposant sur une modélisation à base d'état des défauts	33
I.3.6. Diagnostic à base de modèle des systèmes hybrides.....	36
I.3.6.1. Méthodes issues des systèmes continus	37
I.3.6.2. Méthodes issues des SED.....	37
I.3.6.3. Méthodes mixtes	38
I.4. Conclusion	39

**CHAPITRE 2 : SYNTHESE D'OBSERVATEURS ROBUSTES POUR LA
DETECTION DE DEFAUTS D'UNE CLASSE DE SYSTEMES LINEAIRES A
COMMUTATIONS 41**

II.1. Introduction..... 42

II.2. Classe des systèmes considérés et hypothèses de travail..... 42

II.3. Structure du générateur de résidus à base d'observateur hybride 44

II.3.1. Description du fonctionnement de l'observateur hybride 45

II.3.1.1. Cas où l'observateur hybride et le SLC évoluent dans le même mode 46

II.3.1.2. Cas où l'observateur hybride et le SLC n'évoluent pas dans le même mode
..... 47

II.4. Synthèse de l'observateur hybride robuste pour la détection de défauts..... 48

II.4.1. Synthèse de l'observateur hybride..... 49

II.4.1.1. Convergence de l'erreur d'estimation 49

a. Conditions de convergence : 1^{ère} alternative..... 50

b. Conditions de convergence : 2^{ème} alternative 54

c. Comparaison des deux alternatives : exemple numérique 56

II.4.1.2. Transposition en temps discret des conditions de convergence..... 57

II.4.2. Amélioration de la Robustesse et de la sensibilité de l'observateur hybride .. 60

**II.5. Optimisation de la Synthèse de l'observateur robuste pour la détection de
défauts 68**

II.5.1. Procédure itérative 68

II.5.2. Discussion 69

II.6. Simulation et résultats..... 71

II.7. Conclusion 76

**CHAPITRE 3 : METHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC DES SYSTEMES
LINEAIRES A COMMUTATIONS 79**

III.1. Introduction 80

III.2. Présentation de la méthodologie du diagnostic proposée..... 80

III.2.1. Structure de la méthodologie de diagnostic..... 82

III.2.2. Générateur de Signatures de modes..... 83

III.2.2.1. Convergence des erreurs d'estimation..... 85

III.2.2.2. Table des signatures théoriques & évaluation des résidus 86

III.2.3. Générateur de signatures de défauts..... 88

III.2.3.1. Synthèse des observateurs hybrides pour la localisation de défauts 91

III.2.3.2. Amélioration de la robustesse et de la sensibilité des observateurs hybrides	92
III.2.3.3. Table des signatures théoriques & évaluation des résidus structurés.....	95
III.2.4. Identification du mode & détection et localisation de défauts	96
III.3. Simulation et résultats	101
III.3.1. Construction du diagnostiqueur	102
III.3.1.1. Fonctionnement du diagnostiqueur en l'absence de défauts	104
III.3.1.2. Fonctionnement du diagnostiqueur en présence de défauts	108
a. Défauts de capteurs.....	108
b. Défaut discret	110
III.4. Conclusion	112
CHAPITRE 4 : COMMANDE TOLERANTE AUX DEFAUTS DES SLC :	
APPROCHE PRELIMINAIRE.....	113
IV.1. Introduction	114
IV.2. Commande tolérante aux défauts des systèmes continus	114
IV.2.1. Approches passives	115
IV.2.2. Approches actives	115
IV.2.2.1. Loi de commande pré-calculée	116
IV.2.2.2. Loi de commande synthétisée en ligne	117
a. Accommodation de défauts.....	117
b. Reconfiguration	118
IV.3. Commande tolérante aux défauts des SED	118
IV.4. Etat de l'art sur la commande tolérante aux défauts des SDH.....	119
IV.5. Proposition d'une approche de FTC pour les SLC.....	121
IV.5.1. Structure de la commande tolérante aux défauts.....	122
IV.5.2. Synthèse de la commande par retour d'état à base d'observateur	125
IV.5.2.1. Robustesse de la loi de commande.....	127
IV.5.2.2. Sensibilité des résidus structurés aux défauts	130
IV.6. Simulation et résultats	133
IV.7. Conclusion	138
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	141
ANNEXE A.....	145

ANNEXE B.....	153
BIBLIOGRAPHIE.....	159

Table des figures

Fig. 1.1. Système hybride : interaction entre la partie continue et la partie discrète.....	7
Fig. 1.2. Automate hybride de la boîte de vitesse automatique.....	12
Fig. 1.3. Automate hybride de la balle rebondissante.....	14
Fig. 1.4. Domaine de linéarité pour un système linéaire par morceaux ($m = 3$).....	16
Fig. 1.5. Modèle du thermostat.....	17
Fig. 1.6. Evolution de la température de la chambre.....	18
Fig. 1.7. Architecture générale du diagnostic de défauts à base de modèle quantitatif.	25
Fig. 1.8. Schéma DRGS relatif aux capteurs.....	29
Fig. 1.9. Schéma GRGS relatif aux capteurs.....	29
Fig. 1.10. Résidus directionnels.	30
Fig. 1.11. Modélisation à base d'événements.	32
Fig. 1.12. Modèle du procédé à base d'états.	35
Fig. 1.13. Diagnostiqueur à base d'états.....	36
Fig. 2.1. Structure du générateur de résidus.....	45
Fig. 2.2. Evolution de la fonction de Lyapunov multiple.....	53
Fig. 2.3. Domain de faisabilité ("x" : théorème 2.1, "o" : théorème 2.2).....	57
Fig. 2.4. Portrait de phase	71
Fig. 2.5. Portrait de phase (SLC, Observateur hybride).....	73
Fig. 2.6. Evolution de la fonction de Lyapunov multiple.....	73
Fig. 2.7. Evolution du mode réel et mode estimé.....	74
Fig. 2.8. Résidu généré par l'observateur.....	75
Fig. 2.9. Détection de défaut.....	76
Fig. 3.1. Schéma de la méthodologie de diagnostic adopté.....	83
Fig. 3.2. Structure de générateur des résidus.	84
Fig. 3.3. Structure de générateur des résidus structurés.....	89
Fig. 3.4. Construction et fonctionnement du diagnostiqueur.	99
Fig. 3.5. Automate hybride.....	101
Fig. 3.6. Automate à états finis du diagnostiqueur.....	103
Fig. 3.7. Evolution des vecteurs de résidus.....	105
Fig. 3.8. Evolution des normes des résidus.....	106
Fig. 3.9. Evolution de la signature réelle et le mode estimé (sans défauts).....	107
Fig. 3.10. Evolution des normes des résidus du générateur de signatures de modes.	108
Fig. 3.11. Evolution des normes des résidus du générateur de signatures de défauts	109
Fig. 3.12. Evolution de la signature réelle et le mode estimé (défaut de capteurs).....	109
Fig. 3.13. Evolution de la signature réelle et le mode estimé (défaut discret).	111
Fig. 4.1. Classification des approches de la commande tolérante aux défauts.....	115
Fig. 4.2. Structure générale des méthodes AFTC.....	116

Fig. 4.3. Structure d'une AFTC à base de banc de régulateurs pré-calculés.....	117
Fig. 4.4. Structure de commande tolérante aux défauts proposée.	122
Fig. 4.5. Structure du bloc de commande.....	123
Fig. 4.6. Structure du bloc de reconfiguration.....	124
Fig. 4.7. Automate hybride.....	134
Fig. 4.8. Evolution des états du SLC autonome.	135
Fig. 4.9. Evolution des résidus.....	136
Fig. 4.10. Evolution des sorties du SLC.....	137
Fig. 4.11. Evolution du signal d'activation.	137
Fig. 4.12. Evolution des vecteurs d'état (Observateur 1, SLC).....	138
Fig. 4.13. Evolution des vecteurs d'état (Observateur 2, SLC).....	138