



HAL
open science

Contribution au diagnostic des systèmes à commutation : vers la sûreté et la sécurité des systèmes coopératifs

Nadhir Messai

► To cite this version:

Nadhir Messai. Contribution au diagnostic des systèmes à commutation : vers la sûreté et la sécurité des systèmes coopératifs. Automatique / Robotique. Université de Reims Champagne-Ardenne, 2018. tel-02926092

HAL Id: tel-02926092

<https://hal.science/tel-02926092v1>

Submitted on 31 Aug 2020

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.

Université de Reims Champagne-Ardenne

Habilitation à Diriger des Recherches
(Spécialité Automatique)

Par

Nadhir MESSAI

Maître de Conférences à l'Université de Reims Champagne-Ardenne

Contribution au diagnostic des systèmes à commutation : vers la sûreté et la sécurité des systèmes coopératifs

A soutenir publiquement le : 07 décembre 2018

Rapporteurs :	Vincent COCQUEMPOT	Professeur des Universités Université de Lille
	Mohamed DJEMAI	Professeur des Universités Université Polytechnique Hauts-de-France
	Didier THEILLIOL	Professeur des Universités Université de Lorraine
Examineurs :	Krishna BUSAWON	Professeur des Universités Northumbria University, Newcastle
	Dimitri LEFEBVRE	Professeur des Universités Université Le Havre
	Noureddine MANAMANNI	Professeur des Universités Université de Reims Champagne-Ardenne
	Janan ZAYTOON	Professeur des Universités Université de Reims Champagne-Ardenne

Remerciements

Je remercie vivement Vincent Cocquempot, Professeur à l'Université de Lille 1, Mohamed Djemai, Professeur à l'Université Polytechnique Hauts-de-France et Didier Theilliol, Professeur à l'Université de Lorraine, qui ont accepté de rapporter sur ce travail.

Je remercie également Krishna Busawon, Professeur à l'Université de Northumbria, et Janan Zaytoon, Professeur à l'Université de Reims Champagne-Ardenne pour m'avoir fait l'honneur de participer à mon jury et d'évaluer ce travail.

Je suis très heureux de la présence de Dimitri Lefebvre qui m'a initié à la recherche et encadré ma thèse.

Noureddine, ces remerciements sont l'occasion pour t'exprimer ma gratitude pour ton soutien de tous les jours. J'ai pris beaucoup de plaisir à travailler avec toi et à apprécier tes qualités.

Une partie importante de mes activités a été réalisée dans le cadre de projets de recherche, qui ont joué un rôle important dans mes orientations scientifiques. Je tiens ici à remercier les collègues qui ont participé à ces projets. Une mention particulière à Taha Boukhobza et à Michael Defoort.

C'est avec un très grand plaisir que j'adresse mes plus sincères remerciements à tous les doctorants, que j'ai eu la chance d'encadrer, pour leurs contributions à l'accomplissement des recherches résumées dans ce mémoire.

Un très grand merci pour les personnes du laboratoire et du département qui m'accompagnent dans mon quotidien et qui participent de près ou de loin au développement de mes travaux et plus particulièrement : Marwane Ayaida, Lissan Afilal, Laurent Arcese, Hacene Fouchal, Kevin Guelton, Ida Lenclume, Dimitri Marcheras, Sinuhé Martinez, Mamadou Mboup, Bernard Riera, Ramla Sadedem, et Frédéric Valentin. Nos discussions diverses et variées ainsi que vos qualités scientifiques et humaines m'ont beaucoup inspiré.

Une pensée pleine d'amour à mes enfants très indulgents et compréhensifs durant toutes les périodes où je me montre moins disponible et à mon épouse, Souad, pour ce qu'elle est.

En dernier lieu dans cette liste de remerciements, mais en première position dans mon cœur, je tiens à remercier mes parents qui ont toujours soutenu mes choix. Cette HDR, qui n'a bien sûr pas la même valeur symbolique d'une thèse à leurs yeux, est néanmoins le fruit de leur éducation.

Table des matières

Acknowledgements	iii
1 CURRICULUM VITAE	3
1.1 Présentation	3
1.2 Encadrement doctoral et scientifique	5
1.2.1 Encadrement de travaux post-doctoraux	5
1.2.2 Encadrement de thèses soutenues	6
1.2.3 Encadrement de thèses en cours	7
1.2.4 Encadrement de projets de Master Recherche	8
1.3 Responsabilités administratives et implications collectives	9
1.3.1 Implications et prises de responsabilités pédagogiques à l'URCA	9
1.3.2 Mandats électifs et responsabilités administratives et scientifique	9
1.4 Activités Nationales et Internationales	10
1.4.1 Expertise pour des instances d'évaluation	10
1.4.2 Membre de comités scientifiques internationaux	10
1.4.3 Organisation de colloques et conférences	10
1.4.4 Organisation et modération de sessions et journées scientifiques	11
1.4.5 Jury de thèse hors URCA	11
1.4.6 Participation à des comités de sélection	11
1.4.7 Relecture et évaluation pour des revues ou des conférences	12
1.5 Implications dans des projets de recherche	12
1.5.1 Responsabilités de projets de recherche	12
1.5.2 Participation à des projets de recherche	13
1.6 Résumé des activités d'enseignements	15
1.7 Résumé des activités de recherche	17
1.7.1 Activités de recherche en DEA et en Thèse	17
1.7.2 Activités de recherche au CReSTIC	18
1.8 Liste de Publications	26
1.8.1 Articles dans des revues internationales avec comité de lecture	26
1.8.2 Brevets	27

Table des matières

1.8.3	Direction d'ouvrage	27
1.8.4	Chapitres d'ouvrages	27
1.8.5	Communications dans des conférences internationales avec actes	28
1.8.6	Communications dans des conférences nationales avec actes	31
2	Synthèse des activités de recherche	33
2.1	Introduction	33
2.2	Introduction aux Systèmes Dynamiques Hybrides	34
2.3	Diagnostic à base de modèle des SLC	36
2.3.1	Structure du générateur de résidus	38
2.3.2	Synthèse de l'observateur hybride	40
2.3.3	Méthodologie du diagnostic	43
2.3.4	Application à un modèle de bicyclette	46
2.4	De la localisation à l'estimation des défauts	48
2.4.1	Estimation de l'état discret	50
2.4.2	Découplage des défauts	52
2.4.3	Estimation de l'état continu et des défauts	53
2.4.4	Synthèse du différenciateur algébrique	55
2.4.5	Exemple de Simulation	55
2.5	Travaux à caractère applicatif	57
2.5.1	Surveillance du Trafic routier	57
2.5.2	Résultats de validation	58
2.5.3	TalkRoBots : quand des systèmes hétérogènes communiquent	60
2.6	Conclusion	65
3	Bilan et projet scientifique	67
3.1	Préambule	67
3.2	Bilan et perspectives	67
3.3	Projet de recherche	70
3.3.1	Dignostic Distribué des Systèmes Multi-Agents	71
3.3.2	Sureté et sécurité des systèmes coopératifs	72
3.3.3	Application à la sureté des systèmes de transport intelligents coopératifs	73
3.4	Conclusion	74
A	Vers la sureté et la sécurité des Systèmes Multi-Agents	75
A.1	Introduction	75
A.2	Problem formulation	77
A.2.1	Network topology	77
A.3	Observer-based attack detection	80

A.3.1	Impulsive observer	81
A.3.2	Reset canceling observer	82
A.4	Implementation of the algorithm	83
A.5	Illustrative examples	83
A.5.1	Example 1 : Impulsive observer	84
A.5.2	Example 2 : Reset canceling observer	85
B	Sélection de publications	89
	Références bibliographiques	99

Introduction générale

Ce manuscrit décrit les activités de recherche que je mène au sein de département Automatique et Traitement du Signal (ATS) du Centre de Recherche en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (CReSTIC), de l'Université de Reims Champagne-Ardenne.

Il s'attache à montrer mon cheminement et à présenter d'une manière synthétique mes activités de recherche et mes futures orientations. Pour ce faire, j'ai choisi de le structurer en trois chapitres.

Le premier présente un curriculum vitæ détaillé incluant : une notice individuelle, une présentation des encadrements scientifiques dispensés, un aperçu des responsabilités administratives et scientifiques, d'une description de mes activités pédagogiques, un résumé synthétique de mes travaux de recherches et une liste de mes publications scientifiques.

Le deuxième chapitre de ce manuscrit synthétise une partie des résultats de recherche issue des travaux personnels ou d'encadrements. Dans cette partie, j'ai volontairement choisi de décrire uniquement les travaux sur le diagnostic des systèmes à commutation. Ce choix s'inscrit dans la ligne directrice de mon projet de recherche.

Le troisième chapitre présente un bilan de mes activités et propose quelques directions de recherche me paraissant à la fois scientifiquement pertinentes et en phase avec les défis de l'avenir. Ce chapitre est complété par une Annexe, en anglais (Annexe A), où, l'on donne quelques détails techniques relatifs au projet de recherche. Enfin, une sélection d'articles représentatifs de l'ensemble de mes travaux est rassemblée en Annexe B.

1 CURRICULUM VITAE

1.1 Présentation

Nadhir Messai

Né le 02 juin 1972 à Khenchela (Algérie)

Marié, 3 enfants

Adresse Professionnelle

CReSTIC

Université de Reims Champagne Ardenne

UFR Sciences Exactes et Naturelles

Moulin de la Housse BP 1039

51687 REIMS cedex 2

Téléphone : +33 (0)3 26 91 82 17

E-mail : nadhir.messai@univ-reims.fr

Situation actuelle

Grade Maître de Conférences depuis le 1^{er} septembre 2004

Classe normale, 5^{ème} échelon

Date de nomination dans l'échelon : 1^{er} Mars 2014

Section 61^e génie informatique, automatique et traitement du signal

Emploi N° 0707 à l'Université de Reims Champagne Ardenne (URCA)

UFR Sciences Exactes et Naturelles - Département Electronique, Electrotechnique,

Automatique (EEA) pour l'enseignement

Chapitre 1. CURRICULUM VITAE

Titulaire de la Prime d'Excellence Scientifique pour la période 2013-2017 (Noté "A" par l'instance d'évaluation nationale)

Titulaire de la Prime d'Encadrement Doctoral et de Recherche pour la période 2018-2021 (Noté "A" par l'instance d'évaluation nationale)

Formations

2003 Doctorat de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM)

Spécialité : Automatique et Informatique

Laboratoire : Laboratoire Systèmes et Transports (SeT, EA 3317)

Titre : Surveillance du trafic urbain et interurbain à base de modèles neuronaux

Mention très honorable

Thèse Soutenue publiquement le 17 décembre 2003 devant la commission d'examen suivante :

Pr. J.M. Henrioud (Université de Franche-Comté, Président),

Pr. R. Lengellé (Université de Technologie de Troyes, Rapporteur),

Pr. J. Ragot(Institut National Polytechnique de Lorraine, Rapporteur),

Pr. A. Elmoudni UTBM, Directeur de Thèse),

Pr. D. Lefebvre (Université Le Havre, Co-encadrant de Thèse),

Dr. P. Thomas (UTBM, Co-encadrant de Thèse),

Dr. J. M. Thiriet (Université Henri Poincaré Nancy1, Invité)

2000 Diplôme d'Etudes Approfondies en Informatique Automatique et Productique, (UTBM)

1996 Diplôme d'Ingénieur en génie électrique, Université d'Annaba (Algérie)

Fonctions exercées

2004-... Maître de Conférences à l'URCA

2002-2004 ATER à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

1996-1999 Conseiller technique auprès du Président de l'Assemblée Populaire (Mairie en Algérie)

1.2 Encadrement doctoral et scientifique

D'un point de vue quantitatif, ma participation à l'encadrement est synthétisée dans le tableau 1.1.

TABLE 1.1 – Bilan quantitatif des encadrements doctoraux et scientifiques

Type d'encadrement	Nombre
Post-docs	2
Doctorat soutenus	6
Doctorat en cours	2
Master Recherche	8

1.2.1 Encadrement de travaux post-doctoraux

2010-2011 Sinuhé MARTINEZ MARTINEZ

Sujet : Analyse structurelle des propriétés d'observabilité d'une classe de systèmes hybrides

Financement : Projet COSMOS 2 du GIS 3SGS ¹

Encadrement : N. Messai 50% et N. Manamanni 50%.

Production scientifique commune : 2 revues [RI-4, RI-6], 3 conférences internationales 2 [CI-9, CI-10,] et 1 conférence nationale [CN-2]

2016-2017 Marcos Cesar BRAGAGNOLO

Sujet : Diagnostic distribué des systèmes multi-agents

Financement : Projet Interrégional SUCRÉ ²

Encadrement : N. Messai 50% et N. Manamanni 50%.

Production scientifique commune : 1 revue en phase de lecture [RS-2]

1. Surveillance, Sûreté et Sécurité des Grands Systèmes

2. Sûreté de fonctionnement et résilience pour la gestion et le contrôle coopératifs des systèmes sociotechniques : Coopération Homme(s)-Robot(s) en milieu hostile

1.2.2 Encadrement de thèses soutenues

2005-2009 Rebiha BEKRAR

Sujet : Identification des systèmes à événements discrets par réseaux de Petri

Financement : Financement Interne- projet du Groupe Auto du CReSTIC

Encadrement : N. Messai 50%, N. Essounbouli 40%, B. Riera 5% et A. Hamzaoui 5%

Production scientifique commune : 1 revue [RI-7], 4 conférences internationales [CI-20, CI-21, CI-25, CI-26] et 2 conférences nationales [CN-8, CN-9]

2007-2010 Fatiha HAMDJ

Sujet : Contributions à la synthèse d'observateurs pour les systèmes dynamiques hybrides

Financement : Bourse PNE (Programme National Exceptionnel) du gouvernement Algérien (Séjour de 18 mois au CReSTIC)

Encadrement : N. Messai 50% et N. Manamanni 50%

Production scientifique commune : 1 revue [RI-10], 5 conférences internationales [CI-8, CI-16, CI-18, CI-19] et 2 conférences nationales [CN-6, CN-7]

Situation professionnelle : Maître de conférences à l'Université de Batna (Algérie)

2007-2010 Mathieu HEMOUR

Sujet : Contribution à la modélisation et à la simulation appliquées aux études d'exploitation du réseau ferré urbain

Financement : Bourse CIFRE avec la RATP

Encadrement : N. Messai 50%, A. Philippot 33% et B. Riera 34%

Production scientifique commune : 2 conférences internationales [CI-14, CI-15] et 1 conférence nationale [CN-5]

Situation professionnelle : Cadre RATP

2007-2010 Djamel Eddine Chouaib BELKHIAT

Sujet : Contribution à la synthèse d'observateur hybride pour le diagnostic d'une classe de systèmes hybrides

Financement : Allocation Régionale dans le cadre du GIS 3SGS

Encadrement : N. Messai 50% et N. Manamanni 50%

Production scientifique commune : 1 revue [RI-9], 4 conférences internationales [CI-11, CI-12, CI-13, CI-17] et 2 conférences nationales [CN-3, CN-4]

1.2. Encadrement doctoral et scientifique

Situation professionnelle : Maître de conférences à l'Université de Sétif (Algérie)

2012-2017 Khaled LABOUDI

Sujet : Contribution à la détection et à l'estimation des défauts des systèmes linéaires à commutations

Financement : Allocation de recherche MENESER

Encadrement : N. Messai 50% et N. Manamanni 50%

Production scientifique commune : 1 revue en phase de lecture [RS-5], 1 chapitre de livre [CO-1], 2 conférences internationales [CI-6, CI-7] et 1 conférence nationale [CN-1]

Situation professionnelle : ATER à l'URCA

2014-2017 Abdelhafid ZEROUAL

Sujet : Estimation des systèmes linéaires à commutation : application au trafic routier

Financement : Bourse PROFAS B+ de Campus France (12 mois) et projet PHC Tassili (6 mois)

Encadrement : N. Messai 50% et S. Kechida (Algérie) 50%

Production scientifique commune : 3 revues [RI-1, RI-2, RI-3] et 1 conférence internationale [CI-4]

Situation professionnelle : Maître de conférences à l'Université de Skikda (Algérie)

D'un point de vue qualitatif, on peut remarquer que la grande majorité de mes doctorants a soutenu en trois ans. Les thèses ont, aussi, donné lieu à des publications dans des revues reconnues de qualité Q1. Je note ici que les travaux de M. Hemour sont confidentiels et n'ont fait l'objet que de quelques conférences à la marge.

1.2.3 Encadrement de thèses en cours

Oct. 2015-... Thi Thanh Quynh NGUYEN

Sujet : Diagnostic distribué des systèmes multi-agents

Financement : Bourse du gouvernement Vietnamien

Encadrement : N. Messai 50% et N. Manamanni 50%

Production scientifique commune : 1 revue en phase de lecture [RS-3] et 1 conférence internationale [CI-3]

Nov. 2016-... **Thiem Van PHAM**

Sujet : Contrôle distribuée et coopératif des systèmes multi-agents

Financement : Bourse du gouvernement Vietnamien (VIED)

Encadrement : N. Messai 50% et N. Manamanni 50%

Production scientifiques communes : 1 revue et 1 conférence internationale en phase de lecture [RS-4]

1.2.4 Encadrement de projets de Master Recherche

Mars-Sept. 2007 **Mathieu HEMOUR**

Sujet : Modélisation et simulation des SED par Réseaux de neurones

Provenance de l'étudiant : Université de Reims Champagne-Ardenne

Encadrement : N. Messai 100%

Mars-Sept. 2008 **Mohamed ZERROUGUI**

Sujet : Synthèse d'Observateur pour le diagnostic des Systèmes à Commutations

Provenance de l'étudiant : Université de Reims Champagne-Ardenne

Encadrement : N. Messai 50% et N. Manamanni 50%

Mars-Sept. 2009 **Souhayb SALLEM** (stage Ingénieur/Master de Tunisie)

Sujet : Détection des défauts d'une classe de système à commutations

Provenance de l'étudiant : Ecole Nationale d'Ingénieur de Gabes (Tunisie)

Encadrement : N. Messai 50% et N. Manamanni 50%

Mars-Sept. 2014 **Nidhal RACHDI**

Sujet : Approche hybride pour la modélisation et simulation de la dynamique d'un véhicule

Provenance de l'étudiant : Ecole Centrale de Lille

Encadrement : N. Messai 50% et N. Manamanni 50%

Mars-Sept. 2015 **Careca MUANZA DIBA** (stage dans le cadre du projet SUCRÉ)

Sujet : Conception et commande d'un robot mobile non holonome

Provenance de l'étudiant : Université de Reims Champagne-Ardenne

Encadrement : N. Messai 100%

1.3. Responsabilités administratives et implications collectives

- Mars-Sept. 2016** **Bilel ROJBI** (stage dans le cadre du projet SUCRÉ)
Sujet : Intégration d'un tunnel de communication dans ROS
Provenance de l'étudiant : Université Paris 8
Encadrement : N. Messai 100%
- Mars-Sept. 2017** **Kouame Boris N'DJORE** (stage Ingénieur/Master de Tunisie)
Sujet : Détection d'attaques dans les réseaux VANETs
Provenance de l'étudiant : Ecole supérieure des communications de Tunis
Encadrement : N. Messai 50% et M. Ayaida 50%
- Mars-Sept. 2017** **Merieme ISMAILI** (stage dans le cadre du Projet C-ROADS)
Sujet : Sécurité des réseaux véhiculaires : Etude d'un système de PKI distribué
Provenance de l'étudiant : Université de technologie de Troyes
Encadrement : N. Messai 100%

1.3 Responsabilités administratives et implications collectives

1.3.1 Implications et prises de responsabilités pédagogiques à l'URCA

- Directeur des études du parcours « Ingénieries de systèmes robotisés » du Master EEAI de l'URCA, de 2012 à 2015
- Responsable du Secteur « Robotique » de la filière d'Ingénieur Automatique et Informatique Industrielle (A2I) de l'UTT en convention avec l'URCA
- Membre du Conseil de Perfectionnement du Master EEAI de l'URCA, depuis 2014
- Co-responsable (avec K. Guelton) de la salle de TPs d'automatique du département EEA de l'URCA
- Responsable de deux unités d'enseignement du Master EEAI de l'URCA et de deux unités d'enseignement de la filière d'Ingénieur A2I

1.3.2 Mandats électifs et responsabilités administratives et scientifique

- Responsable de l'axe transversal "Industrie 4.0" du CReSTIC, depuis 2018 (avec A. Philippot)
- Membre élu du conseil de laboratoire CReSTIC de 2007 à 2015

- Responsable des séminaires du CReSTIC, de 2009 à 2015 (organisation d'un séminaire par mois)
- Membre élu du conseil de l'école doctorale Sciences Technologie Santé de l'URCA (ED-STTS), de 2009 à 2013
- Membre de la commission « recrutement » de l'ED-STTS, de 2009 à 2013
- Membre de la commission des relations internationales de l'ED-STTS, de 2009 à 2013

1.4 Activités Nationales et Internationales

1.4.1 Expertise pour des instances d'évaluation

- Expert pour l'ANR, depuis 2008 (évaluation de 1 à 2 projets et de 10 à 15 pré-propositions/an)
- Expert international pour the Higher Education Commission, Pakistan for the award of Ph.D. degree, depuis 2009

1.4.2 Membre de comités scientifiques internationaux

- Représentant Français au comité technique « TC-2.2. Linear Control Systems » de l'IFAC
- Membre de comités de programme des conférences :
 - **ICINCO 2016, 2017 et 2018**, International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics
 - **IFAC ICONS 2016**, 4th IFAC International Conference on Intelligent Control and Automation Sciences, 1-3 juin 2016, Reims, France.
 - **IEEE CEIT 2015**, 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology, 25-27 Mai, Tlemcen, Algérie.
 - **IEEE ICSC 2013**, International Conference on Systems and Control, 29-31 octobre, Alger, Algérie.
 - 1^{er} Colloque International Francophone, Ingénierie et Environnement, 18 et 19 Octobre 2010, Annaba, Algérie.
 - **ICSIP 2009, 2011 et 2013**, International Conference on Systems and Information Processing, Guelma, Algérie.

1.4.3 Organisation de colloques et conférences

- Vice-président du Comité National d'Organisation de la conférence ICONS 2016 (44th IFAC International Conference on Intelligent Control and Automation Sciences), 1-3 juin

2016, Reims, France

- Membre du Comité National d'Organisation des 22^{ème} rencontres francophones sur la Logique Floue et ses Applications, 10-11 octobre 2013, Reims, France
- Membre du Comité National d'Organisation du 3^{ème} Workshop du GIS 3SGS29-30 septembre 2010, Reims, France
- Membre du Comité National d'Organisation de la conférence EAM'09 (European Annual Conference on Human Decision-Making and Manual control), 3-4 Septembre 2009, Reims, France
- Membre du Comité National d'Organisation des Journées Doctorales/Journées Nationales MACS 2007 (JD/JN MACS'07), 12-13 juillet 2007, Reims, France

1.4.4 Organisation et modération de sessions et journées scientifiques

- Modérateur de la session «Robotics and autonomous systems », 4th IFAC International Conference on Intelligent Control and Automation Sciences, Reims, France (2016)
- Modérateur de la session « Hybrid systems », 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology, Tlemcen, Algérie (2015)
- Modérateur de la session « Hybrid systems », Conference on Control and Fault Tolerant Systems, Nice, France (2013)
- Organisateur et modérateur d'une journée scientifique dans le cadre du projet MOSYP à Reims (2009)

1.4.5 Jury de thèse hors URCA

- Examineur de la thèse de A. FAGHRAOUI , Université de Lorraine, spécialité Automatique, Traitement du Signal et Génie Informatique, soutenue le 11 décembre 2013
- Rapporteur de la thèse de M. RIZVIL, Université PIES (Pakistan Institute of Engineering and Applied Sciences), spécialité Automatique, soutenue en juillet 2011
- Examineur de la thèse de Arezki AIT-SEDDIK, Université de Technologie de Troyes, spécialité Optimisation et Sécurité des Systèmes, soutenue le 16 novembre 2009

1.4.6 Participation à des comités de sélection

- Membre du comité de sélection du poste MCF 61 N 0885 IUT de Troyes à l'Institut universitaire de technologie de Troyes en 2011
- Membre du comité de sélection du poste MCF 61 N 0545 ISTV à l'université de Valenciennes en 2010

1.4.7 Relecture et évaluation pour des revues ou des conférences

- **Reviewer pour des revues internationales** : Automatica, IET Control Theory and Applications, Nonlinear Analysis, European Journal of Control, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, International Journal on Robust and Nonlinear Control, Fuzzy Sets and Systems,, Engineering Applications of Artificial Intelligence, etc.
- **Reviewer pour des conférences internationales** : IEEE Conference on Decision and Control (CDC), European Control Conference (ECC), IFAC World Congress, International Symposium on Fault Detection, Supervision, and Safety of Technical Processes (SAFE-PROCESS), International Conference on Control and Fault Tolerant Systems (SysTol), IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA), etc.

1.5 Implications dans des projets de recherche

1.5.1 Responsabilités de projets de recherche

- [P-1] 2016-2019 **Co-porteur du projet de transfert technologique TalkRoBots**
Objectifs : Proposer une solution permettant de pallier au manque d'interopérabilité et de lever le verrou de l'hétérogénéité associée à la communication entre systèmes hétérogènes
Porteurs : N. Messai, M. Ayaida et F. Valetin
Rôle dans le projet : Porteur et responsable scientifique
Montant de l'aide obtenue : 370 K€
- [P-2] 2015-2017 **Co-porteur du projet interrégional SUCRÉ**
Titre : Sûreté de fonctionnement et résilience pour la gestion et le contrôle coopératifs des systèmes sociotechniques
Objectifs : Etude et mise au point d'outils d'aide à la planification, à la décision et à la coopération Homme(s)-Robot(s) et Robot(s)-Robot(s)
Porteurs : N. Messai et M.P. Pacaux-Lemoine
Rôle dans le projet : Porteur au niveau de la région et la mise en place de la plateforme robotique
Montant de l'aide obtenue : 550 K€ dont 150 K€ pour l'URCA
Partenaires : Université de Technologie de Troyes, Université de Valenciennes et du Hainaut- Cambrésis, Université d'Artois, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles, Université de Lille 1, Ecole des Mines de Douai.

1.5. Implications dans des projets de recherche

[P-3] 2011-2015 Co-porteur PHC TASSILI¹

Titre : Gestion du réseau de trafic urbain d'une agglomération, application à la ville de Guelma

Objectifs : Proposer des approches de modélisation et d'estimation pour la gestion du réseau de trafic urbain avec un application à la ville de Guelma en Algérie.

Porteurs : H. Alla, N. Messai et H. Tebbikh (Algérie)

Rôle dans le projet : porteur URCA et encadrement de la thèse de A. Zeroual

Montant de l'aide obtenue : 45 K€

Partenaires : Université Grenoble Alpes, Université de Guelma (Algérie)

1.5.2 Participation à des projets de recherche

[P-4] 2017-2020 Participation au Projet CPER Factories of Future Champagne-Ardenne

Objectifs : Implantation d'une plateforme de recherche

Porteur : V. Carre-Menetrier et F. Yalaoui

Rôle dans le projet : Responsable du sous projet robotique au niveau de l'URCA

Montant de l'aide obtenue : 1,25M€ dont 664 K€ pour l'URCA

Partenaires : Université de Technologie de Troyes

[P-5] 2016-2020 Participation au Projet européen C-ROADS France

Objectifs : Assurer la continuité du service coopératif urbain/interurbain, développer une liaison avec la plateforme européenne C-ROADS, et garantir une interopérabilité européenne au niveau des services d'information sur le trafic en temps réel

Porteur : Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE)

Rôle dans le projet : Participation aux tests de validation et à l'analyse des résultats

Montant de l'aide obtenue : 14,5M€ dont 445 K€ pour l'URCA

Partenaires : Opérateurs routiers (MEDDE, ASFA, APRR, SANEF, VINCI Autoroutes), Métropoles (Bordeaux, Strasbourg), Constructeurs (Renault,

1. Projet Hubert Curien franco-algérien

Peugeot), Laboratoires (CEREMA, IFSTTAR), Universités (URCA, Telecom ParisTech TPT, Université d’Auvergne), Sécurité (IDnomic), Laboratoire mobilité (Car2road, Transpolis)

[P-6] 2016-2018 Participation au Projet européen SCOOP@F

Objectifs : Préparer un déploiement national des véhicules connecté sur une grande échelle et dans des configurations variées (autoroutes, routes et rues). Le projet prévoit un équipement avec des systèmes ITS de plus de 3000 véhicules et 2000 km de routes et rues.

Porteur : Ministère de l’écologie, du développement durable et de l’énergie (MEDDE)

Rôle dans le projet : Participation aux tests de validation et à l’analyse des résultats

Montant de l’aide obtenue : 13,2M€ dont 576 K€ pour l’URCA

Partenaires : Constructeurs (Renault et PSA), Opérateur d’autoroutes (SANEF), Collectivités Ile de France, Rennes, Bordeaux et Isère), Laboratoires (CEREMA, IFSTTAR, LAB, ITS Bretagne), Universitaires (URCA, TPT), Opérateur Telecom (Orange), Sécurité PKI (IDnomic), Tests avec partenaires européens (Autriche, Espagne et Portugal)

[P-7] 2009-2011 Participation au Projet ‘COSMOS 2’ du GIS 3SGS

Titre : Contrôle et Observation de Systèmes à Modes multiples de fonctionnement Sûrs

Objectifs : observation diagnostic et étude des propriétés des systèmes à plusieurs modes de fonctionnement

Porteur : N. Manamanni

Rôle dans le projet : Encadrement d’un post-doctorant

Montant de l’aide obtenue : 157 K€

Partenaires : Université de Lille et université de Lorraine

[P-8] 2008-2012 Membre du comité de pilotage du projet CPER MOSYP

Titre : Mesures des performances et Optimisation des Systèmes de Production

Objectifs : Contrôle/commande et à ordonnancement des ateliers de production

Porteurs : H. Hamzaoui et B. Riera

Partenaires : responsable de la tâche modélisation et encadrement de la thèse de R. Bekrar

Montant de l'aide obtenue : 450 K€

Partenaires : Université de Technologie de Troyes

[P-9] 2008-2009 Participation au Projet 'COSMOS 1' du GIS 3SGS

Titre : Conception et Observation de Systèmes à MOdes multiples de fonctionnement Sûrs

Objectifs : Analyse de l'existant sur les thèmes de la surveillance et du diagnostic à base de multi-modèles et/ou de systèmes hybrides

Porteur : J. Ragot (CRAN Nancy)

Rôle dans le projet : Diagnostic des systèmes dynamiques hybrides

Montant de l'aide obtenue : 59 K€

Partenaires : Université de Lille, université de Lorraine, Université de Technologie de Troyes

1.6 Résumé des activités d'enseignements

Mes activités d'enseignement ont commencé durant ma dernière année de thèse à l'UTBM, où j'ai bénéficié d'un poste d'attaché temporaire d'enseignement et de recherche. Lors de cette première expérience, j'ai été affecté au département Génie des Systèmes de Commande (GSC), qui venait d'ouvrir, afin de proposer des supports pédagogiques pour les étudiants Ingénieur. Ainsi, en collaboration avec X. Dovifaaz, nous avons monté et effectué les travaux pratiques (TP) de commande des systèmes discrets. Par ailleurs, j'ai assuré les travaux dirigés (TD) et monté les cours magistraux (CM) de chaînes de mesures informatisées. Enfin, j'ai monté et enseigné les TP de commande par réseaux de neurones de l'unité de valeur commande des systèmes complexes.

Depuis ma prise de fonction à l'Université de Reims Champagne-Ardenne, mes enseignements se déroulent essentiellement au département EEA de l'UFR Sciences Exactes et Naturelles. Par ailleurs, les enseignements que j'ai pu effectuer couvrent un large spectre de disciplines relatives à la 61^{ème} section du CNU. Ces enseignements sont majoritairement dispensés pour des étudiants en *Master 1 et 2 ou en première année de l'ITII génie mécanique et plus récemment en filière d'ingénieur A2I* (Automatique et Informatique Industrielle). Ils concernent les domaines de gestion de production, de l'automatique des systèmes continus et échantillonnés, des réseaux, de la robotique et du diagnostic. Ainsi, afin de ne pas rentrer dans des descriptions détaillées, pouvant s'avérer rébarbatives pour le lecteur, je me limiterai dans la suite de cette section à une présentation sommaire de quelques éléments qui me paraissent significatifs.

À mon arrivée au département, un déficit d'enseignants en gestion de production se faisait ressentir. Volontairement, j'ai été assez rapidement responsable de cette matière complètement

Chapitre 1. CURRICULUM VITAE

nouvelle pour moi et pour laquelle j'ai dû monter un enseignement complet (formalisation des problèmes, méthodes juste à temps, ordonnancement dans un atelier de production, etc.). La prise en charge entière (CM, TD et TP) de ce module, m'a demandé un lourd investissement. Mais, ce fut une expérience enrichissante.

En ce qui concerne mes enseignements en automatique, j'ai eu à m'investir dans **la création de cours, de TD et de TP ainsi que dans le renouvellement des équipements de la salle de TP**, dont je suis coresponsable avec mon collègue K. Guelton. J'en prends pour exemples, le montage des cours de diagnostic en M2 et le renouvellement des TD des deux modules d'automatique du M1. Quant aux TP, j'ai principalement monté la maquette du pendule inversé, j'ai fait l'acquisition et le montage d'une maquette d'asservissement de vitesse et j'ai proposé des nouveaux sujets de TP en simulation sous Matlab. Ces derniers portent aussi bien sur les concepts classiques de l'identification, de l'analyse fréquentielle et temporelle, de l'analyse de la stabilité et des performances que sur des méthodes de synthèse de correcteurs analogiques et numériques.

En 2007, je me suis investi dans le montage d'un module d'enseignement de réseaux de Petri et de Grafctet au sein d'un nouveau parcours de Master 2 GEII pour l'agro-industrie du département EEA. Par ailleurs, ayant repris en 2009 les enseignements de réseaux, **j'ai complètement renouvelé les TP de cette matière en optant pour un logiciel largement utilisé en industrie (Packet Tracer)**.

En 2011, le département EEA a engagé une réflexion sur le renouvellement de la maquette d'enseignement en Master. A cette occasion, **j'ai proposé et monté le parcours « Ingénieries de systèmes robotisés »** du Master EEAI de l'URCA. J'ai, naturellement, **assuré la direction de ce parcours**. Ainsi, en plus de la gestion des enseignements, j'ai monté, en 2011 et en 2014, deux projets pédagogiques dans le cadre de l'appel à projets « Soutien et renforcement de l'enseignement supérieur en Champagne-Ardenne ». Ces projets avaient pour objectif l'acquisition et le montage d'une cellule robotique. Dans, ce cadre, j'ai particulièrement défini le cahier des charges, négocié l'achat du matériel et monté les sujets de TPs.

En 2015, la baisse effective du nombre d'étudiants nous a contraints de restructurer le master en supprimant les parcours. Depuis, **j'ai la responsabilité du secteur robotique de la filière d'ingénieur A2I de l'UTT en convention avec l'URCA**, qui a ouvert en 2016. Cette nouvelle responsabilité **m'a amené aussi à monter des nouveaux enseignements (CM, TD et TP) sur la robotique industrielle et l'environnement ROS (Robot Operating System)**.

1.7 Résumé des activités de recherche

1.7.1 Activités de recherche en DEA et en Thèse

Mon premier contact avec le monde de la recherche fut le travail réalisé dans le cadre de mon DEA [CI-31], au laboratoire Système et Transport (SeT) de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM).

À mon arrivée au SeT, l'axe *Modélisation du trafic routier* était en pleine effervescence au sein de l'équipe Évaluation et Conduite de Systèmes (ECS), qui m'a proposé un sujet sur *la modélisation et la surveillance du trafic par réseaux de neurones*. Les résultats obtenus ont débouché sur un sujet de thèse, sous la direction de P. Thomas, D Lefebvre et A El-Moudni.

Les travaux réalisés durant cette période ont conduit, d'une part, à la proposition de modèles neuronaux d'écoulement du trafic [RI-13], et, d'autre part, au développement d'une approche de détection, de localisation et d'identification des incidents [RI-12]. Dans ce cadre, nous avons proposé des modèles neuronaux statiques [CN-11] permettant de reproduire le fameux « Diagramme Fondamental », afin de distinguer les deux régimes de l'écoulement (le trafic fluide et les congestions). Par ailleurs, quatre algorithmes d'initialisations, particulièrement dédiés au contexte du trafic ont été proposés pour résoudre le problème de convergence vers des minima locaux très éloignés du minimum global [CI-30]. Ces algorithmes ont l'avantage d'être formulés en exploitant la forme particulière des modèles neuronaux et les paramètres physiques de l'infrastructure considérée. Des études comparatives, basées sur des données de simulation et des données réelles, ont permis de montrer que l'approche neuronale proposée était tout à fait pertinente et présentait de réels avantages tant en ce qui concerne la qualité des modèles que leur facilité de mise en œuvre [CN-10].

Ces premiers résultats nous ont permis de mettre en place des modèles macroscopiques performants et simples d'emploi. Nous nous sommes donc intéressés à l'exploitation de ces modèles pour la surveillance du trafic et la détection d'incidents. Cette tâche a été réalisée en proposant une architecture neuronale permettant la division de l'espace débit concentration en quatre zones distinctes et la classification des données mesurées dans l'une de ces zones [RI-12]. Cependant, même si ces travaux ont permis la détection et la localisation des incidents, l'absence d'informations sur l'évolution temporelle des variables mesurées a empêché la mise en place d'une procédure d'identification de ces incidents. C'est pourquoi nous nous sommes intéressés à des modèles macroscopiques plus complexes en cherchant à introduire des notions d'évolution temporelle.

Dans ce contexte, une procédure complète de sélection du vecteur de régression pour la construction d'un modèle neuronal macroscopique du 2e ordre a été mise en place. Les résidus obtenus, en

Chapitre 1. CURRICULUM VITAE

comparant ce modèle, de bon fonctionnement, et les observations réelles, ont été traités à l'aide de méthodes de surveillance classiques afin de détecter, localiser et identifier les incidents [CI-29]. Par ailleurs, face à la difficulté d'obtenir des mesures qui couvrent l'ensemble du domaine du fonctionnement sain du système (i.e., écoulement normal du trafic dans toutes les circonstances), nous avons proposé une approche de surveillance à base d'un modèle neuronale dynamique. Il s'agit plus particulièrement de la mise en parallèles de quatre réseaux de neurones dynamiques hyper connectés et de la pondération des résidus générés en confrontant les données du terrain et celles issues des réseaux [CI-28].

Après avoir proposé cette panoplie d'algorithmes permettant la surveillance des boucles considérées individuellement, nous avons proposé une approche modulaire, qui considère la dimension spatiale des réseaux du trafic routier. Cette approche est dite modulaire dans le sens où l'état de chaque tronçon est modélisé séparément par un réseau de Petri. Les modèles des tronçons sont ensuite reliés selon la structure réelle du système physique pour superviser tout ou une partie du réseau [RI-12].

À l'issue de ma thèse, j'ai commencé à m'intéresser au diagnostic des systèmes hybrides en participant à l'action spécifique n°193 issue du groupe Systèmes Dynamiques Hybrides et soutenue par le GDR MACS [CI-27]. J'ai également finalisé en cette période mes travaux postdoctoraux effectués dans le cadre du projet européen « Etude d'aménagement et équipement du périmètre proche de la gare TGV de l'Aire Urbaine France-Suisse-Allemagne ». Il est à noter que ces travaux de valorisation portaient principalement sur une représentation virtuelle en 3 Dimensions du périmètre partagé du secteur gare TGV de Méroux et sur la réalisation d'un outil d'aide à la décision permettant de mettre en valeur les différentes configurations d'aménagement envisagées par le bureau d'étude.

L'ensemble de ces travaux m'a permis d'acquérir des compétences dans le domaine de la modélisation et la surveillance du trafic routier ainsi que la maîtrise des procédures d'identification par réseaux de neurones. Je ne me doutais pas à l'époque que cela allait servir mes futures recherches sur le diagnostic des systèmes hybrides.

1.7.2 Activités de recherche au CReSTIC

Depuis ma nomination en tant que maître de conférences en septembre 2004, j'ai intégré le Centre de Recherche en Sciences et Technologie de l'Information et de la Communication de l'URCA (CReSTIC, EA 3804). À mon arrivée à Reims, j'ai rejoint le groupe Automatique (AUTO) dont les activités s'articulaient autour de deux thématiques : Commandes Hybrides et Systèmes à Événements Discrets. Quant à mes activités de recherche actuelles, elles se déroulent au sein de l'équipe « Commande et Observation Avancées des systèmes Continus et Hybrides » (COACH),

qui émane de la restructuration du CReSTIC et de l'équipe AUTO au 1^{er} Janvier 2016.

Dès mon recrutement, j'ai cherché à développer des passerelles entre mes travaux précédents et les thématiques de mon laboratoire d'accueil. C'est dans ce cadre que je me suis naturellement orienté vers le développement d'approches inspirées de mes centres d'intérêt durant la thèse, à savoir, les réseaux de neurones et les réseaux de Petri. Cependant, même si mes premières activités de recherche au CReSTIC ont été influencées par un héritage lié à mes travaux de thèse, cette influence s'est traduite uniquement dans l'exploitation des outils utilisés et a rarement concerné le type de solutions que j'ai apportées. Depuis, mes activités concernant les réseaux de neurones et les réseaux de Petri se sont raréfiées au profit de mes travaux dans le cadre des systèmes à commutation, achevant ainsi ma **réorientation thématique**.

Ainsi, d'un point de vue fondamental et méthodologique, mes travaux de recherche peuvent être regroupés sous la thématique « identification et observation pour le diagnostic des systèmes hybrides ». L'objectif de ces travaux est double :

- Fournir des méthodes de modélisation qui soient simples, facilement implémentables et si possible modulables.
- Développer ou améliorer des procédures de synthèse d'observateurs afin de répondre aux challenges de diagnostic de certaines classes de systèmes hybrides.

Mes activités de recherche s'inscrivent le plus généralement dans le cadre de projets que j'ai montés ou dans lesquels je suis fortement impliqué. Ils s'articulent autour des problématiques que je présente, ci-dessous, d'une façon, synthétique, et parfois chronologique.

Identification des systèmes hybrides

Cette partie de mes travaux de recherche concerne principalement le développement d'algorithmes pour l'apprentissage du comportement des Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH) par Réseaux de Petri ainsi que la proposition de méthodologies d'identification permettant d'approximer le comportement des SDH par réseaux de neurones.

L'idée directrice des travaux à base des réseaux de neurones consiste à approximer un SDH par un modèle paramétrique « moyen », permettant de reproduire l'ensemble des modes du système [CI-26, CI-22, RI-11]. Ainsi, en collaboration avec J. Zaytoon et B. Riera, nous nous sommes intéressés à l'identification d'une classe de SDH caractérisée par des dynamiques non linéaires et par un nombre de modes inconnu. Dans ce cadre, nous avons adapté les procédures usuellement utilisées pour l'identification des systèmes non linéaires, par réseaux de neurones multicouches, au cas des systèmes hybrides. L'approche proposée avait l'avantage de considérer le problème d'identification des SDH en termes d'architectures et d'algorithmes développés pour les réseaux

Chapitre 1. CURRICULUM VITAE

de neurones [CI-24, RI-11]. Enfin, les modèles neuronaux issus de la phase d'identification ont été utilisés pour la détection des défauts dans le cadre du benchmark de l'action spécifique n°193 du GDR MACS [CI-23].

Par ailleurs, en collaboration avec M.S. Mouchaweh, à l'époque maître de conférences au CReSTIC, nous avons proposé une approche d'identification qui conjugue des techniques de reconnaissance de formes et des algorithmes d'estimation paramétrique. Cette approche concernait des systèmes linéaires à commutation, dont le nombre de modes est connu, et a permis d'estimer le mode discret du système ainsi que les instants de commutations [RI-8, CO-3].

Parallèlement à ces activités focalisées sur les dynamiques continues d'un SDH, mes travaux ont aussi porté sur une abstraction événementielle de cette classe de système [CN-8, CN-9, CI-21, CI-22, CI-24, CI-26, RI-7].

C'est dans ce cadre que j'ai proposé le sujet de thèse de R. Bekrar, qui visait à développer des méthodes systématiques permettant de construire un modèle comportemental en exploitant les données événementielles issues de mesures. Ce travail a concerné des systèmes manufacturiers composés d'une partie opérative et d'une partie commande fonctionnant en boucle fermée. Nous l'avons entamé en considérant une approche d'identification basée sur l'utilisation des signaux de sortie du système. Ainsi, nous nous sommes intéressés, dans un premier temps, à des systèmes modélisables par un réseau de Petri binaire et nous avons déterminé les conditions nécessaires et suffisantes à l'unicité de la solution obtenue [CI-26]. Puis, nous avons considéré le cas de classes plus larges de RdP, en formalisant le problème d'identification sous la forme d'un problème d'optimisation combinatoire. Ce problème a été résolu par la synthèse d'algorithmes permettant de fournir l'ensemble de solutions faisables et de sélectionner la solution optimale [RI-7, CN-9, CI-27]. Par ailleurs, des études concernant les propriétés, la complexité et la convergence des algorithmes développés ont été menées [CI-27]. Les résultats obtenus ont montré que l'approche proposée avait l'avantage d'être simple, relative et constructive [CI-26]. Néanmoins, bien que sa complexité soit linéaire, la convergence vers une solution optimale est parfois difficile, notamment lorsque le nombre de paramètres à estimer devient grand.

Pour faire face à ce problème, une deuxième approche basée sur l'exploitation des signaux d'entrée et de sortie mesurables a été proposée. Cette approche considère que le modèle du système est composé d'une partie mesurable et d'une partie non mesurable. Elle exploite les signaux d'E/S afin de déterminer des bornes sur le nombre de places (transitions) non mesurables. Une fois ces bornes obtenues, le problème d'identification est résolu par les techniques de programmation linéaire binaire [CI-25]. Bien que les méthodes proposées permettaient d'identifier des modèles reproduisant les comportements observés dans la séquence d'excitation, il a été constaté que le modèle issu de la phase d'identification pourrait, dans certains cas, générer des comportements indésirables. C'est pourquoi nous avons cherché à inhiber ces derniers en

introduisant des contrôleurs garantissant le comportement désiré. Ainsi, deux algorithmes de synthèse de contrôleurs ont été mis en place [RI-7, CN-8, CI-20, CI-21]. Le premier est basé sur l'utilisation des chemins d'influence des transitions interdites [CI-20, CI-21]. Quant au deuxième algorithme, il consiste à utiliser les séquences de transitions interdites pour caractériser les places de contrôle à ajouter au modèle RdP identifié [CI-21]. Comparativement avec les travaux qui visent à résoudre ce problème, nos algorithmes possèdent l'avantage de ne nécessiter aucune spécification, et de n'utiliser que les états atteignables observés dans la séquence d'E/S, ce qui répond bien à un besoin d'identification. Enfin, nous avons généralisé ces approches au cas des RdP stochastiques dans le cadre d'une collaboration avec le GREAH (Groupe de Recherche en Electrotechnique et Automatique du Havre) [RI-7].

D'un point de vue applicatif, l'ensemble de ces travaux a été validé sur un système de production destiné à exploiter, gérer, régler et piloter un système intégré de conditionnement de comprimés (la machine "PRODUCTIS" installée à l'IUT de Reims) [RI-7]. Il est à noter que ces travaux m'ont permis d'être le pivot de la première collaboration entre l'équipe troyenne et la partie SED de l'équipe rémoise. Elle était aussi l'occasion pour moi de participer au montage du projet MOSYP, pour lequel j'étais responsable de la tâche modélisation puis membre du comité de pilotage.

Observation des systèmes à commutation

Cette problématique s'inscrit naturellement dans la suite de mes travaux sur l'identification des SDH et représente un tournant, qui a parachevé une réorientation thématique graduelle. Il a été initié, durant le projet CPER MOSYP (Mesure des performances et Optimisation des Systèmes de Production), grâce à une collaboration étroite et fructueuse avec N. Manamanni. Par la suite, il a constitué l'un des points de départ de la thématique estimation, observation et diagnostic des systèmes et, notamment, l'émergence de l'axe synthèse d'observateurs et diagnostic.

Dans cet axe, nous nous intéressons principalement à des problèmes de synthèse d'observateur pour des SDH, dont l'évolution temporelle est décrite par des commutations discrètes entre un ensemble de sous-systèmes dynamiques continus. L'objectif est d'exploiter les signaux issus des capteurs et les connaissances dont on dispose sur le système afin de déterminer à chaque instant l'état dans lequel il évolue, de reconstruire les variables d'états nécessaires à sa commande ou à sa surveillance et de développer des méthodes de diagnostic permettant de détecter, de localiser et d'estimer les défauts.

L'originalité de mes contributions réside, principalement, dans le type d'approches que je propose pour l'estimation et le diagnostic à base de modèle. En effet, plusieurs équipes de recherche s'intéressent depuis des années à ces problématiques. Toutefois, la majeure partie des travaux réalisés

Chapitre 1. CURRICULUM VITAE

se focalise soit sur la partie continue, soit sur la partie discrète. De ce fait, j'ai essayé de proposer des méthodologies de modélisation, d'estimation et de diagnostic prenant en considération de façon explicite les deux aspects, continu et discret, d'un SDH.

Dans ce cadre, j'ai assuré avec N. Manamanni l'encadrement de la thèse de F. Hamdi. L'objectif de ce travail était double. D'une part, suggérer des structures simples et modulaires permettant de modéliser explicitement les interactions entre la partie continue et la partie discrète d'un SDH, tout en évitant le problème d'explosion combinatoire, et, d'autre part, proposer un schéma d'observation exploitant la puissance du formalisme de modélisation. Ainsi, nous avons défini, dans un premier temps, une méthodologie générique de modélisation basée sur des Réseaux de Petri Différentiels (RdPDf). Puis, nous avons synthétisé un observateur hybride dont la structure fait coopérer un observateur discret associé à un observateur continu. Le premier observateur identifie le mode courant en estimant les composantes des vecteurs de marquage et de franchissement des transitions. Quant au second, il exploite la sortie de l'observateur discret afin de produire l'estimé des variables d'états continues. Enfin, la mise à jour de l'état continu et de l'état discret est assurée grâce à une interaction entre les deux observateurs [CN-6, CN-7, CI-8, CI-16, CI-18, CI-19, RI-10].

Forts de ces premiers résultats, j'ai participé au montage du projet COSMOS 1 (Conception et Observation de Systèmes à MOdes Multiples de fonctionnement Sûrs) du GIS 3SGS (Surveillance, Sûreté et Sécurité des Grands Systèmes). Ce projet entre quatre partenaires académiques (CRAN, CReSTIC, ICD et LAGIS) portait sur la modélisation et la surveillance des systèmes dynamiques dont l'évolution temporelle des variables d'état est décrite, soit par des commutations discrètes entre sous-systèmes (SDH), soit par l'agrégation d'un ensemble de systèmes partageant tout ou partie de leurs variables d'état (multi-modèles T-S ou quasi-LPV).

Ainsi, dans le cadre de la thèse de D. Belkhiat, financée grâce au projet COSMOS I, du GIS 3SGS, nous avons proposé une approche de synthèse d'observateurs hybrides robustes pour la détection des défauts de capteurs et d'actionneurs. L'idée clé de cette approche consiste à prendre en considération, dès la phase de la conception de l'observateur hybride, la robustesse vis-à-vis des entrées inconnues et la sensibilité aux défauts [CI-17, CN-4]. Ainsi, nous avons synthétisé un observateur sensible aux défauts et formalisé, sous forme d'inégalités matricielles linéaires, les conditions assurant la bornitude de l'erreur d'estimation [CI-17, RI-9]. Par ailleurs, nous avons établi une méthodologie de diagnostic qui consiste à utiliser conjointement des outils initialement dédiés au diagnostic des systèmes continus et d'autres spécifiques aux SED. La méthodologie proposée est basée sur trois modules ; deux types de générateurs de résidus (issus de l'automatique continue) et un estimateur en ligne de l'état discret, appelé diagnostiqueur (issu de l'automatique événementielle) [CI-12, CI-13]. Notre diagnostiqueur utilise les deux types de résidus, provenant de la partie continue, pour identifier le mode de fonctionnement du

systèmes linéaires à commutations et isoler les défauts de capteurs. Les résidus structurés ont été utilisés pour la localisation des défauts de capteurs et ont été générés à travers une structure DOS à base d'observateurs hybrides, à la fois robustes vis-à-vis des entrées inconnues et sensibles aux défauts capteurs [CN-3, CI-11]. Enfin, nous avons proposé une approche de synthèse de lois de commande tolérantes aux défauts de capteurs stabilisante via un retour d'état. Cette approche permet de préserver les performances nominales du système (situation non défaillante) en présence d'un défaut capteur. L'idée consiste à reconfigurer le retour d'état en remplaçant le vecteur d'état estimé à partir d'une sortie en défaut par un autre estimé à partir d'une sortie saine. La redondance des estimations est assurée dans cette approche par un banc d'observateurs hybrides robustes qui fournit plusieurs estimations correctes des vecteurs d'état et de sorties [CO-2, CO-4].

A partir de là, j'ai orienté mes efforts vers les problèmes d'estimation de défauts pour des systèmes linéaires à commutations (SLC). Dans ce contexte, j'ai co porté avec N. Manamanni un projet régional de recherche au titre de soutien aux projets émergents. Ce projet a été retenu et nous a permis d'obtenir une allocation donnant lieu à la thèse de K. Laboudi. Notre intérêt s'est porté, dans un premier temps, sur la généralisation aux SLC de la transformation de coordonnées, classiquement utilisée dans le cadre des systèmes linéaires, afin de découpler un sous-ensemble de l'état des défauts. Ensuite, un observateur hybride à entrées inconnues a été synthétisé, et des conditions de convergence ont été formulées sous forme d'inégalités matricielles linéaires. Les défauts ont été, finalement, estimés en utilisant simultanément l'observateur synthétisé et un différenciateur exact et robuste [CN-1, CI-6, CI-7]. Par ailleurs, pour faire face aux bruits de mesure qui compliquent la tâche d'estimation des défauts, nous avons exploré en collaboration avec, M. Mboup, une alternative basée sur les outils de l'algèbre différentielle afin d'estimer à la fois les défauts et les instants de commutation. L'idée ici est de rechercher les ruptures au niveau des signaux de sortie et/ou de leurs dérivées et d'exploiter les dérivateurs algébriques lors de la reconstitution des défauts [CO-1]. Les résultats obtenus sont très encourageants notamment en ce qui concerne l'estimation des instants de commutation.

Analyse structurelle des systèmes à commutations

Les travaux autour de cette problématique ont été initiés lors du projet COSMOS II du GIS 3SGS en collaboration avec nos collègues du CRAN (T. Boukhobza et F. Hamelin). Cette collaboration avait pour but de fédérer les compétences complémentaires des deux équipes en vue de l'analyse des propriétés structurelles des systèmes linéaires à commutation représentés par des équations d'états dont les éléments sont soit fixés à zéro soit des paramètres libres. Ce travail a pu se faire notamment par le financement sur ce projet (COSMOS II), du post-doc de S. Martinez, au sein du CReSTIC et qui avait auparavant effectué une thèse au CRAN.

L'objectif est d'étudier des propriétés structurelles (génériques) qui soient vraies pour presque toutes les valeurs des paramètres libres. Ceci rend les approches développées utilisables dès la phase de conception d'un système. De plus, lorsque ces propriétés ne peuvent être intrinsèquement garanties par la nature du système étudié, de telles approches peuvent s'avérer particulièrement utiles pour les concepteurs, notamment en termes de dimensionnement et de placement d'actionneurs et/ou de capteurs.

Les études que nous effectuons s'appuient sur les outils graphiques classiquement utilisés pour l'analyse structurelle des systèmes continus. Ces derniers possèdent l'avantage d'exploiter des algorithmes à faible ordre de complexité et de fournir des résultats facilement interprétables. Ainsi, nous nous sommes intéressés à la formalisation des conditions nécessaires et/ou suffisantes pour l'existence d'une séquence de commutation garantissant l'observabilité structurelle d'un SLC caractérisé par des modes non observables. Nous avons adapté l'outil graphique classiquement utilisé pour les systèmes linéaires et énoncé des règles graphiques intuitives garantissant l'observabilité totale du SLC [CN-2, RI-4]. Par ailleurs, nous avons proposé une approche permettant de placer un nombre optimal de capteurs supplémentaires pour garantir l'observabilité du système à commutation lorsque les conditions énoncées ne sont pas vérifiées [CI-9].

Surveillance de trafic routier et Systèmes de Transport Intelligents

Cette activité résulte des compétences que j'ai pu acquérir sur la modélisation du trafic et la dynamique amorcée par mes travaux sur l'observation et le diagnostic des SDH. En effet, lors de la soutenance de la thèse de F. Hamdi, des échanges avec des collègues algériens, membres de son jury, ont permis de lancer assez rapidement une collaboration sur les systèmes de transports. C'est dans ce cadre que j'ai monté un projet PHC TASSILI en collaboration avec le GIPSA-lab et l'Université de Guelma en Algérie. Les travaux menés dans ce cadre visent à contribuer par certains points de vue au débat, encore ouvert, sur la modélisation et la surveillance du trafic. Ils aspirent à y apporter des arguments en faveur de l'utilisation des modèles hybrides, en proposant des approches originales qui remédient à certaines limitations des méthodes classiques.

Ces travaux, à caractère applicatif, ont été amorcés dans la cadre de la thèse de A. Zeroual, financée en partie par le projet PHC Tassili et co-encadrée avec S. Kechida (Algérie). Ils s'articulent autour de trois parties. La première concerne la modélisation d'un tronçon routier sous la forme d'un système linéaire à commutation et la validation du modèle en utilisant des données réelles. La seconde se rapporte à la synthèse d'observateurs hybrides permettant l'estimation de la densité et du flux de trafic. Quant à la dernière, elle porte sur la proposition d'une méthodologie de surveillance des congestions et de détection des d'incident. Ainsi, nous avons, pour l'instant, proposé un modèle hybride de l'écoulement du trafic routier. Ce modèle a été validé en utilisant des données réelles et les résultats sont très encourageants [RI-1, CI-4]. Par ailleurs, les conges-

tions ont été détectées en utilisant des approches classiques de diagnostic à base de modèle [RI-2, RI-3].

Plus récemment, j'ai été sollicité par des collègues de l'équipe communication, du département "Informatique" du CReSTIC, afin de participer à deux projets européens de déploiement de véhicules connectés. Ma tâche ici, consiste principalement à participer aux différents tests de validation et à l'analyse des résultats. Mais, cette opportunité était trop belle pour ne pas déployer des efforts supplémentaires et tenter de contribuer à la sûreté et à la sécurité de ces futurs systèmes de transport. L'idée, d'une surveillance à base de modèle statique, a, ainsi, rapidement germé dans ma tête. Elle a été, ensuite, mise en œuvre par un étudiant en master, que j'ai co-encadré avec M. Ayaida. Les résultats obtenus en simulation sont plus que satisfaisants et ils ont fait l'objet d'un article soumis à Ad Hoc Networks. Ce papier a déjà passé le premier tour est et en phase de relecture depuis septembre 2018. Quant aux perspectives de ce premier travail, elles seront exposées dans le chapitre 3.

Diagnostic des Systèmes Multi-Agents

Parallèlement à ces activités, j'ai commencé à m'intéresser récemment aux problèmes d'estimation et de diagnostic distribué des systèmes à commutation, avec un objectif d'application aux systèmes multi robots. C'est dans ce cadre que j'ai porté le projet excellence SUCRé (Coopération Homme(s)-Robot(s) en milieu hostile), qui se focalise sur l'étude et la mise au point d'outils d'aide à la planification, à la décision et à la coopération Homme(s)-Robot(s) et Robot(s)-Robot(s) autour d'un objectif commun.

Bien que plus récente, la synergie dans ce dernier domaine est réelle. Elle se concrétise par la mise en place d'une plateforme robotique, l'obtention de financement pour le projet TalkRobots et les premiers résultats de recherche de Q.T. Nguyen et T. Pham Van que je co-encadre avec N. Manamanni [CI-3]. Plus de détails sur cette partie seront donnés dans les chapitres 2 et 3 de ce manuscrit.

1.8 Liste de Publications

1.8.1 Articles dans des revues internationales avec comité de lecture

- [RI-1] A. Zeroual, F. Harrou, Y Sun, **N. Messai**, Integrating Model-based Observer and Kullback-Leibler Metric for Estimating and Detecting Road Traffic Congestion, IEEE sensors Journal, Vol. 18-20. pp. 8605-8616, 2018
- [RI-2] A. Zeroual, F. Harrou, Y Sun, **N. Messai**, Monitoring road traffic congestion using a macroscopic traffic model and a statistical monitoring scheme, Sustainable Cities and Society, Vol. 35, pp. 494-510, 2017
- [RI-3] A. Zeroual, **N. Messai**, S. Kechida, F. Hamdi, A Piecewise switched linear approach for traffic flow modeling, International Journal of Automation and Computing, Vol. 14, pp. 729-741, 2017
- [RI-4] S. Martinez, **N. Messai**, N., J.P. Jeannot, D. Nuzillard, Two Neural Network based strategies for the detection of a Total Instantaneous Blockage of a Sodium-cooled Fast Reactor, Reliability Engineering and System Safety, Vol 137, pp.50-57, 2015
- [RI-5] A. Muhammad, A. Muddassar, I. Aamer, **N. Messai**, Mode Identification for Hybrid Model of SI Engine to Detect Misfire Fault, Journal of Control Engineering and Applied Informatics, Vol. 16-3, pp 65-74, 2014
- [RI-6] S. Martinez, **N. Messai**, T. Boukhobza, N. Manamanni, F. Hamelein, Graphic approach for the determination of the existence of sequences guaranteeing observability of switched linear systems, Automatica, Vol.50, pp 584-590, 2014
- [RI-7] S. Ould El Mehdi, R. Bekrar, **N. Messai**, F. Leclercq, D. Lefebvre, B. Riera, Design and identification of Stochastic and Deterministic Stochastic Petri Nets, IEEE SMC Part A, Vol. 42-4, pp. 931-946, 2012
- [RI-8] M. Sayed Mouchaweh, **N. Messai**, A non-supervised pattern recognition method for the identification of a class of hybride linear systems, Pattern Recognition Letters, Vol 33-2, pp. 144-151, 2012
- [RI-9] D. Belkhiat, **N. Messai**, N. Manamanni, Design of a Robust Fault Detection Based-Observer for Linear Switched Systems with external disturbances, Nonlinear Analysis : Hybrid Systems, Vol. 5-2, pp. 206-219, 2011
- [RI-10] F. Hamdi, N. Manamanni, **N. Messai**, K. Benmahamed, Hybrid observer design for linear switched system via Differential Petri Nets, Nonlinear Analysis : Hybrid Systems, Vol. 3-3, pp. 310-322, 2009
- [RI-11] **N. Messai**, J. Zaytoon, B. Riera, Identification of a class of hybrid dynamic systems with feed-forward neural networks : about the validity of the global model, Nonlinear Analysis : Hybrid Systems, Vol. 2-3, pp. 773-785, 2008

- [RI-12] N. Messai, P. Thomas, D. Lefebvre, A. El Moudni, Neural networks for local monitoring of traffic magnetic sensors » Control Engineering Practice. Vol 13-1, pp.67-80, 2005
- [RI-13] N. Messai, P. Thomas, D. Lefebvre, A. El Moudni, Optimal neural networks architectures for the flow-density relationships of traffic models, Mathematics and Computers in Simulation Special Issue on : intelligent forecasting, fault diagnosis, scheduling, and control. Vol. 60, pp.401-409, 2002

Articles en phase de lecture :

- [RS-1] M. Ayaida, N. Messai, S. Najeh, K. B. Ndjore , A Macroscopic Traffic Model-based Approach for Sybil Attack Detection in VANETs, Soumis à Ad Hoc Networks, en deuxième lecture
- [RS-2] M. C. Bragagnolo, N. Messai, N. Manamanni, Attack detection and counter in clustered networks with impulsive leaders, Soumis à Automatica
- [RS-3] Q. T. Nguyen, N. Messai, N. Manamanni, S. Martinez, Fault estimation for Multi-Agent Systems with switching topologies, En lecture
- [RS-4] T. V. Pham, N. Messai, N. Manamanni, Consensus in Cluster Networks of Agents with Linear Dynamics, En lecture
- [RS-5] K. Laboudi, N. Messai, N. Manamanni, M. Mboup, Switching time estimation for switched systems : An algebraic approach, En lecture

1.8.2 Brevets

- [B-1] A. Ayaida, N. Messai, F. Valentin, D. Marcheras, Procédé d'interconnexion entre robots, Brevet n°1851429

1.8.3 Direction d'ouvrage

- [DO-1] N. Manamanni, M.S. Sayed-Mouchaweh, N. Messai, K. Guelton, Actes du 3^{ème} Workshop du GIS 3SGS, Reims, 29-30 septembre 2010.

1.8.4 Chapitres d'ouvrages

- [CO-1] K. Laboudi, N. Messai, N. Manamanni, M. Mboupe, Fault and Switching Instants Estimation for Switched Linear Systems, New Trends in Observer-based Control - Volume 1, Elsevier, 2019

- [CO-2] T. Boukhobza, F. Hamelin, B. Marx, G. Mourot, A. M. Nagy A, J. Ragot, D. Belkhiat, K. Guelton, D. Jabri, N. Manamanni, S. Martinez-Martinez, **N. Messai**, V. Cocquempot, et al. Diagnostic des systèmes à modes multiples de fonctionnement, Supervision, surveillance et sûreté de fonctionnement des grands systèmes, O. Boubaker, Éditions Hermès, Traité IC2, ISBN 2-7462-3840-3, 2012
- [CO-3] M. Sayed Mouchaweh, **N. Messai**, O. Ayad, Identification of a class of Hybrid dynamic systems Learning in Non-Stationary Environments, Elsevier, pp 407-427, 2012
- [CO-4] T. Boukhobza, F. Hamelin, B. Marx, G. Mourot, A. M. Nagy A, J. Ragot, D. Belkhiat, K. Guelton, D. Jabri, N. Manamanni, S. Martinez-Martinez, **N. Messai**, V. Cocquempot, et al. Diagnosis of systems with multiple operating modes, Supervision and Safety of Complex Systems, N. Matta, Y. Vandenboomgaerde, J. Arlat, John Wiley & Sons, ISTE, ISBN 978-1-84821-413-2, 2012

1.8.5 Communications dans des conférences internationales avec actes

- [CI-1] S. Ecran, M. Ayaida, **N. Messai**, How mobile RSUs can enhance communications in VANETs, The 6th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communication, WINCOM'18, Marrakesh, Morocco, 16-19 October 2018
- [CI-2] S. Martinez-Martinez, **N. Messai**, T. Boukhobza, N. Manamanni, On the observability of Switched Linear Systems with unobservable modes. 20th IFAC World Congress, Toulouse, France, 9-14 July 2017
- [CI-3] Q. T. T. Nguyen, **N. Messai**, S. Martinez-Martinez, N. Manamanni, A distributed fault detection observer-based approach for a network of multi-agent systems with switching topologies, The 2017 Asian Control Conference - ASCC 2017, Gold Coast, Australia, 17 - 20 December 2017
- [CI-4] A. Zeroual, **N. Messai**, S. Kechida, F. Hamdi, Calibration and Validation of a Switched Linear Macroscopic Traffic Model, 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT'2015), Tlemcen, Algeria, 25-27 Mai, 2015
- [CI-5] A. Boumâaraf, T. Mohamadi, **N. Messai**, Improving of the Generation Method of Repeated PWM Based on the Signals Combinations Applied to a PV Pumping System, Vol. 74, pp. 320-330, 2015
- [CI-6] K. Laboudi, **N. Messai**, N. Manamanni, Fault Estimation for a Class of Switched Linear Systems, 9th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SafeProcess 2015), Paris, France, 2-4 septembre 2015
- [CI-7] K. Laboudi, **N. Messai**, N. Manamanni, Simultaneous Estimation of the State and the Unknown Inputs for a Class of Switched Linear Systems, 3rd International Conference on

- Control, Engineering & Information Technology (CEIT'2015), Tlemcen, Algeria, 25-27 Mai, 2015
- [CI-8] F. Hamdi, **N. Messai**, N. Manamanni, State Estimation for Switched Systems Described by Differential Petri Nets Models, International Conference on Systems and Control, ICSC'2013, Algiers, Algeria, october 29-31, 2013
- [CI-9] S. Martinez, **N. Messai**, D. Nuzillard, J.P. Jeannot, Early detection of an instantaneous total blockage accident in the core of a sodium-cooled fast reactor, 7th IEEE, GCC Conference and Exhibition (GCC), 978-1-4799-0722-9, pp 450-455, IEEE, Doha Qatar, novembre 2013
- [CI-10] S. Martinez, **N. Messai**, T. Boukhobza, N. Manamanni, F. Hamelein, Observability recovering for linear switched systems via sensor placement : a graphic approach, 8th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SafeProcess 2012), Mexico City, Mexico, August 29-31, 2012
- [CI-11] D. Belkhiat, **N. Messai**, N. Manamanni, M. Djemai, Fault detection & isolation for a class of hybrid systems : A dedicated switched robust observer scheme, 20th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (IEEE MED 2012), Barcelona - Spain, juillet 2012
- [CI-12] D. Belkhiat, **N. Messai**, N. Manamanni, Design of Robust Fault Detection Observers for Discrete-time Linear Switched Systems, 18th IFAC World Congress, Milano, Italy, 2011
- [CI-13] D. Belkhiat, **N. Messai**, N. Manamanni, A Fault Detection & Isolation Scheme for Discrete Time Switched Linear Systems, 9th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA'11), Santiago, Chile, 2011
- [CI-14] M. Hemour, A. Philippot, **N. Messai**, D. Caligny, B. Riera, Human design applied to operating light railstudies, 11th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems (HMS'2010). Valenciennes, France, septembre 2010
- [CI-15] M. Hemour, **N. Messai**, A. Philippot, D. Caligny, B. Riera, Human Adapted Design for operating metro studies, 2009, 28th European Annual Conference on Human Decision-Making and Manual control (EAM'09), Reims, France, 2009
- [CI-16] F.Hamdi, **N. Messai**, N. Manamanni, Design of switched observer using timed differential Petri Nets : A dwell time approach, European Control Conference (ECC'09). Budapest, Hungary, 2009
- [CI-17] D. Belkhiat, **N. Messai**, N. Manamanni, Robust Fault Detection Based-Observer for Linear Switched Systems, 3rd IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems (ADHS'09), Zaragoza, Spain, 2009

- [CI-18] F. Hamdi, N. Manamanni, **N. Messai**, K. Benmahamed, Hybrid Observer Design for Switched Linear Systems Using Differential Petri Net. 16th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, Ajaccio, Corsica, France, 2008
- [CI-19] F. Hamdi, **N. Messai**, N. Manamanni, Differential Petri Net observer for Piecewise linear Systems, 9th international conference on Sciences and Techniques of Automatic control and computer engineering (STA'2008), Sousse, Tunis, 2008
- [CI-20] R. Bekrar, **N. Messai**, N. Essounbouli, A Hamzaoui, B. Riera, Control synthesis approach for DES modelled by Petri Nets, 17th IFAC World Congress, Seoul, Korea, 2008
- [CI-21] R. Bekrar, **N. Messai**, N. Essounbouli, A Hamzaoui, B. Riera, Synthesis method of a PN controller using forbidden transitions sequences, 5th International Conference On Informatics in Control, Automation and robotics, Funchal, Madeira, Portugal, 2008
- [CI-22] **N. Messai**, A Simulation Study of a Neural Network Based Approach for the Identification of Hybrid Systems, the 2007 IEEE International Conference Computer Engineering and Systems, Cairo, Egypt, 2007
- [CI-23] **N. Messai**, P. Thomas, D. Lefebvre, B. Riera, Fault detection for HDS by means of neural networks : application to two tanks hydraulic system, 6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes. Beijing, China, 2006
- [CI-24] **N. Messai**, J. Zaytoon, B. Riera, Using Neural Networks for the Identification and the Diagnosis of a Hybrid Dynamic System, 2nd IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems (ADHS'06). Alghero, Italy, 2006
- [CI-25] R. Bekrar, **N. Messai**, N. Essounbouli, A Hamzaoui, B. Riera, Off-line identification for class of discrete event systems using safe Petri Nets, 3rd IFAC workshop on DES System Design (DESDes'06), Poland, 2006.
- [CI-26] R. Bekrar, **N. Messai**, N. Essounbouli, A Hamzaoui, B. Riera, Identification of discrete event systems using ordinary Petri Nets, Workshop on Advanced Control and Diagnosis (IAR-ACD'06), Nancy, France, 2006
- [CI-27] **N. Messai**, P. Thomas, D. Lefebvre, B. Riera, A. El Moudni, Modeling and Monitoring of Hybrid Dynamic Systems with Feed-Forward Neural Networks : application to two tanks hydraulic system, Workshop on Advanced Control and Diagnosis, Mulhouse, France, 2005
- [CI-28] **N. Messai**, P. Thomas, El Moudni A. Leclercq E. Druaux F, Lefebvre D., Feed-forward and RTRL neural networks for the macroscopic traffic flow prediction and monitoring : the potential of each other, 6th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, Shanghai, China, 2003
- [CI-29] **N. Messai**, Thomas P., Lefebvre D. et El Moudni A., A neural network approach for freeway traffic flow Prediction, IEEE International Conference on Control Applications. Glasgow, Scotland, 2002

- [CI-30] N. Messai, P. Thomas, D. Lefebvre, A. El Moudni, Structure and weight initialization of feed-forward networks for traffic flow-density relationships, IEEE Int. Joint Conference on Neural Networks., Washington, USA, 2001
- [CI-31] D. Lefebvre, P. Thomas, J.C. Thiriet, N. Messai, A. El Moudni, Model-based traffic monitoring by means of neural networks, 39th IEEE Conference on Decision and Control. Sydney, pp. 3541-3546, 2000

1.8.6 Communications dans des conférences nationales avec actes

- [CN-1] K Laboudi K, N. Messai, N. Manamanni, Estimation des défauts pour une classe de systèmes linéaires à commutations, 6^{ème} journées Doctorales et Journées Nationales (JD-JN MACS' 2015), Bourges, France, 18-19 Juin, 2015
- [CN-2] S. Martinez, N. Messai, T. Boukhobza, N. Manamanni, F. Hamelein, 2011, Analyse structurelle des propriétés d'observabilité et de diagnosticabilité d'une classe de systèmes hybrides, Workshop Surveillance, Sûreté et Sécurité des Grands Systèmes (3SGS' 11), Valenciennes, France, 2011
- [CN-3] D. Belkhiat, N. Messai, N. Manamanni, Synthèse d'observateurs robustes pour la détection de défauts des systèmes linéaires discrets à commutations, 4^{ème} journées Nationales MACS (JD-JN MACS' 2011), Marseille, France, 2011
- [CN-4] D. Belkhiat, N. Messai, N. Manamanni, 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, juin 2010
- [CN-5] M. Hemour, A. Philippot, N. Messai, D. Caligny, B. Riera, Amélioration de l'intégration du facteur humain dans les études d'exploitation ferroviaire, 6^{ème} Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA 2010), Nancy, France, juin 2010
- [CN-6] F. Hamdi, N. Messai, N. Manamanni, Observateur hybride pour les systèmes à commutations non autonomes, Workshop Surveillance, Sûreté et Sécurité des Grands Systèmes (3SGS'09). Nancy, France, 2009
- [CN-7] F. Hamdi, N. Messai, N. Manamanni, Synthèse d'observateur hybride pour le diagnostic d'une classe de système à commutations Workshop Surveillance, Sûreté et Sécurité des Grands Systèmes (3SGS'08). Troyes, France, 2008
- [CN-8] R. Bekrar, N. Messai, N. Essounbouli, A. Hamzaoui, B. Riera, Synthèse d'un contrôleur RdP pour le problème d'états interdits, 5^{ème} Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA 2008), Bucarest, Roumanie, 2008
- [CN-9] R. Bekrar, N. Messai, N. Essounbouli, A. Hamzaoui, B. Riera, Identification des systèmes à événements discrets par réseaux de Petri, JD-JN-MACS 2007, Reims-France, 2008

Chapitre 1. CURRICULUM VITAE

- [CN-10] **N. Messai**, P. Thomas, D. Lefebvre, A. El Moudni, Crossroad monitoring based on macroscopic first order neural network model, 5ème Congrès pluridisciplinaire Qualité et Sûreté de Fonctionnement, Nancy, France, Mars 2003
- [CN-11] **N. Messai**, P. Thomas, D. Lefebvre, J. C. Creput., Modélisation macroscopique du trafic sur un carrefour urbain : approches neuronales et estimation paramétrique, 3^{ème} Conférence Francophone de Modélisation et SIMulation., Troyes, France, Avril 2001

2 Synthèse des activités de recherche

2.1 Introduction

L'interaction de plus en plus importante entre les systèmes numériques (calculateurs numériques, logiciels, composants logiques,...) et les processus physiques de nature continue a conduit à l'émergence des systèmes dynamiques dits hybrides. En automatique, on désigne par systèmes dynamiques hybrides l'ensemble des systèmes dynamiques dans lesquels interagissent à la fois des phénomènes de nature continue et événementielle. Les exemples de systèmes hybrides sont abondants dans la vie réelle tels que : les systèmes de conversion d'énergie, les processus chimiques, les systèmes de transports, etc.

L'étude des Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH) a retenu l'attention de chercheurs des deux communautés de l'automatique que ce soit ceux qui s'intéressent aux systèmes continus ou ceux qui étudient les Systèmes à Événement Discrets (SED). Les objectifs de l'étude des SDH consistent à apporter une solution en termes de modélisation, d'analyse et de diagnostic à des problèmes que l'on ne peut pas traiter (ou que l'on traite difficilement) avec les méthodes classiques de l'Automatique. Ainsi, devant la complexité de ces systèmes, l'automaticien est souvent amené à développer de nouvelles méthodes qui prennent en compte les deux dynamiques du SDH, continue et discrète, et de leurs interactions.

Mes travaux portent principalement sur la sûreté et la sécurité des systèmes hybrides, que j'ai essayé de traiter d'une façon uniforme et cela indépendamment de l'application. L'objectif principal de mes travaux est de développer des méthodologies et des algorithmes qui améliorent la sûreté et la sécurité de tels systèmes complexes. Cela inclut des méthodes visant à modéliser et à analyser l'évolution des systèmes hybrides, ainsi que des algorithmes permettant de détecter et d'estimer les anomalies pouvant survenir.

Ainsi, depuis la soutenance de ma thèse, mon activité de recherche s'est diversifiée. J'ai d'une

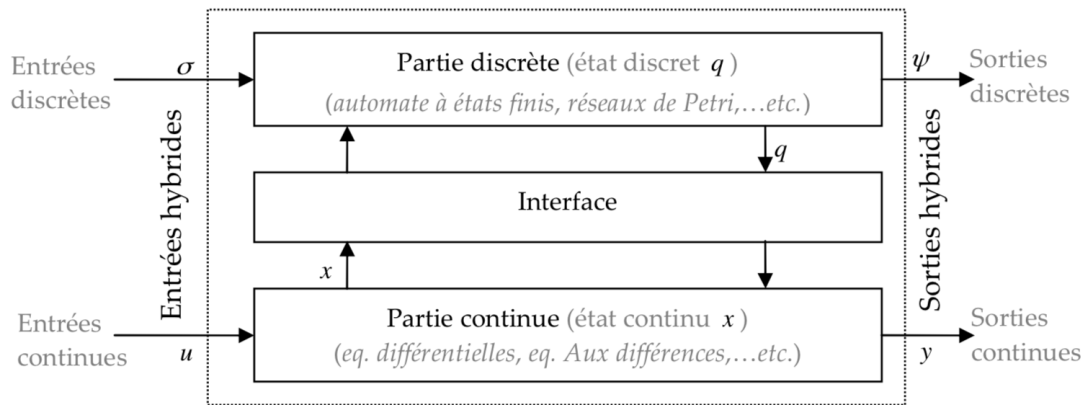


FIGURE 2.1 – Structure d'un système dynamique hybride

part étendu mes travaux d'identification, à base de réseaux de neurones, aux systèmes à commutations, et d'autre part essayé de développer de nouvelles techniques en identification, en analyse structurelle et surtout en observation et en diagnostic pour cette même classe de système. Au fil de années, j'ai petit à petit recentré mes travaux autour de la sûreté et la sécurité des systèmes.

En me lançant dans l'écriture de ce chapitre, j'aurai pu faire une synthèse pour chacune des problématiques que j'ai abordées. Cela aurait nécessité l'introduction de plusieurs notions, voire même un chapitre supplémentaire, permettant aux lecteurs de mieux appréhender les différents travaux. Or, afin de rendre ce document homogène, *j'ai fait, à tort ou à raison, le choix de ne présenter qu'une partie de mes activités*. Ainsi, tout en assumant les réussites comme les échecs, inhérent à toute démarche de recherche, des travaux que j'ai pu mener, *je vais me focaliser dans la suite de ce document sur les parties relatives à l'observation et au diagnostic. Ce choix à été fait, non parce que je considère que ces travaux sont plus importants que les autres, mais, plutôt, car cette partie représente "le cordon embryonnaire", qui a alimenté mon futur projet de recherche*.

2.2 Introduction aux Systèmes Dynamiques Hybrides

Généralement, un SDH peut être vu comme l'agrégation d'un SED, de systèmes dynamiques continus et d'une interface qui gère les interactions entre les deux parties (continue et discrète) [1]. Comme l'illustre la Figure 2.1, chaque partie du SDH dispose d'entrées (discrètes σ , continues u) et de sorties (discrètes Ψ , continues y). L'état discret est décrit par q et l'état continu est décrit par x . Ces différents éléments, à savoir la partie discrète, la partie continue et l'interface peuvent être décrits ou spécifiés de différentes manières.

La partie discrète du système hybride est associée à un SED dont l'espace d'état est un ensemble discret fini, où l'état discret ne change qu'à certains instants du temps de façon instantanée [2]. Les transitions entre les états discrets sont associées à l'occurrence d'événements discrets tels que l'opération d'usinage sur une pièce, le traitement d'une instruction par un processeur ou l'ouverture et la fermeture d'un interrupteur [3, 4].

La partie continue est représentée par un ensemble de modèles continus. Elle est constituée d'une infinité de valeurs décrivant l'évolution d'une grandeur physique tel que la température d'une pièce ou d'un objet, la vitesse d'un mobile ou le niveau d'un liquide dans un réservoir. L'évolution de la partie continue est caractérisée par un espace de temps continu et peut être représentée par des équations différentielles ordinaires, des équations algébro-différentielles,... etc.

L'interface traduit l'interaction entre la partie continue et la partie discrète de façon que l'état discret q détermine la dynamique continue spécifique de la partie continue du SDH [1, 5]. Par ailleurs, les signaux provenant de la partie continue déterminent, par l'intermédiaire de l'interface, les événements autorisant des transitions de l'état discret d'une situation vers une autre [6].

La modélisation des SDH s'effectue selon trois principales familles d'approches [7] : les approches issues de l'automatique continue, les approches issues des systèmes à événements discrets (SED) et les approches mixtes. Bien que les deux premières approches soient intéressantes pour l'étude de certaines propriétés comme la stabilité et l'atteignabilité, elles ont l'inconvénient de privilégier un aspect du SDH au détriment de l'autre. C'est pourquoi les *approches mixtes* [6, 8, 9] cherchent à intégrer les deux aspects au sein d'un même formalisme de modélisation comme les automates hybrides [10], les réseaux de Petri mixtes [11], les réseaux de Petri prédicats-transitions différentiels [12] et les réseaux de Petri différentiels [13, 14, 15].

En ce qui me concerne, j'ai généralement privilégié, l'utilisation et le développement de modèles mixtes. Ainsi, à l'exception de quelques travaux basés sur des modèles neuronaux [RI-11, CI-22, CI-23], j'ai particulièrement exploité la puissance de modélisation des automates hybrides [RI-8, CO-2, CO-4, CI-11] et les réseaux de Petri différentiels [RI-10, CO-3, CI-8, CI-18]. Notons également que dans le cadre du projet COSMOS II, nous avons proposé, en collaboration avec des collègues du CRAN, une modélisation graphique particulièrement adaptée à l'analyse des propriétés structurelle [RI-6, CI-2, CI-10].

Parmi les diverses classes de systèmes hybrides, la classe des systèmes à commutations revête un intérêt particulier en raison de sa capacité à modéliser une large classe de systèmes physiques [16, 17]. Dans un système à commutations, l'état continu évolue sur un intervalle de temps avec une dynamique (parmi un ensemble fini de dynamiques) puis avec une autre sur l'intervalle de temps suivant. La commutation entre les différentes dynamiques est régie par une loi qui spécifie le mode de fonctionnement actif à chaque instant [18, 19]. Formellement, un système à

commutations peut être défini par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = h(\lambda, x, u) \\ y(t) = g(\lambda, x, u) \end{cases} \quad (2.1)$$

où $x \in \mathbb{R}^n$ est l'état continu du système, $u \in \mathbb{R}^m$ est la commande, $y \in \mathbb{R}^p$ est la sortie et λ représente une fonction constante par morceaux. Cette fonction orchestre les commutations entre les modes et prend ses valeurs dans un ensemble fini $I = \{1, \dots, N\}$ où N est le nombre de mode.

2.3 Diagnostic à base de modèle des SLC

Le diagnostic d'un système consiste à détecter si ce dernier est affecté par un ou des défauts à un instant donné puis à localiser les éléments défaillants et à identifier l'amplitude des défauts en fonction du temps [20, 21, 22]. Pour ce faire, différentes approches existent dans la littérature [23]. Elles peuvent être classées dans deux grandes catégories : celles n'utilisant aucun modèle de référence et celles basées sur un modèle du système à diagnostiquer [24, 25, 26, 27]. Par ailleurs, dans le cadre des approches à base de modèle, nous pouvons distinguer deux types de méthodes : quantitatives et qualitatives. Ces approches reposent sur des tests de cohérence qui consistent à vérifier les contradictions entre les observations et les prédictions effectuées par le modèle de référence. Ainsi, les principales approches à base de modèles continus cherchent à reconstruire l'état [28, 29], à estimer des paramètres [30] ou bien à générer des Relations de Redondance Analytiques (RRA), qui lient des grandeurs connues [31]. Quant aux systèmes à événements discrets, le test de cohérence consiste à comparer les séquences d'événements prévues et/ou d'état par le modèle avec celles observées grâce aux capteurs discrets [32, 33, 34, 35].

Les travaux que je mène relèvent principalement des approches à base de modèle quantitatif. Ils reposent, généralement, sur l'estimation de l'état continu et/ou discret pour des systèmes hybrides linéaires dont la partie continue est représentée par des équations différentielles ou aux différences.

Il est évident que l'interaction entre la partie continue et la partie discrète d'un SDH complique davantage la tâche de diagnostic de ce type de système. En effet, l'apparition d'un défaut au niveau de la partie continue d'un SDH peut affecter sa partie discrète et vice-versa. Ainsi, l'occurrence d'un défaut capteur peut par exemple influencer la trajectoire d'état mais peut également se traduire par une non transition vers le mode successeur ou à l'inverse par une transition vers un mode non successeur.

Lorsque l'on s'intéresse au diagnostic des SDH, on peut distinguer deux situations selon que l'on dispose ou pas d'informations sur le mode dans lequel se trouve le SDH à chaque instant [36,

37, 38, 39]. En effet, lorsque le mode actif est connu, la procédure de diagnostic est relativement simple car elle ne nécessite aucune procédure d'identification du mode de fonctionnement actif. Dans ce cadre nous pouvons, à titre d'exemple citer [40], où un filtre robuste de détection a été synthétisé pour un SLC en temps discret. Ce problème a été également étudié pour des SLC en temps continu dans [41]. Enfin, VanGorp *et al.* ont considéré le problème de détection pour des SLC ayant des modes non observables [42].

En revanche, quand aucune information n'est disponible sur le mode actif, la procédure de diagnostic doit faire appel à des techniques permettant d'identifier l'état discret afin de connaître le sous système linéaire à diagnostiquer. Différents travaux ont porté sur ce problème [43, 44, 45, 46]. A titre d'exemple, Pissano *et al.* ont synthétisé dans [47] un observateur permettant de détecter les défauts dans un SLC incertain en temps continu. Comme pour le cas des systèmes continus, ces méthodes à base d'observateurs hybrides utilisent le résidu issu de la confrontation des données estimées avec les observations réelles pour la détection de défauts. Cependant, l'estimation de l'état continu du système hybride nécessite l'estimation de l'état discret et inversement. Un autre problème qui s'ajoute à l'estimation de l'état discret concerne l'actualisation de l'état continu estimé après la transition, un phénomène qui doit être pris en considération dans la synthèse de l'observateur pour les systèmes à sauts [48, 49]. Par ailleurs, l'approche à base d'espace de parité a été étendue par Cocquempot *et al.* à une classe de systèmes hybrides [50, 36]. De même, nous avons adapté une approche d'identification paramétrique afin de détecter les défauts affectant la partie continue d'un SDH en temps discret [39].

Bien que plusieurs travaux ont porté récemment sur le diagnostic des SDH, ce problème demeure peu traité quand nous avons commencé à nous y intéresser. Par ailleurs, la plupart de ces travaux accordaient plus d'importance à la partie continue au détriment de la partie discrète et ne traitaient pas les aspects de robustesse vis-à-vis des entrées inconnues et de sensibilité aux défauts. De ce fait, nos contributions portent principalement sur la proposition de méthodologie de diagnostic exploitant conjointement des outils initialement dédiés au diagnostic des systèmes continus et d'autres spécifiques aux SED [RI-8, RI-9, RI-10].

Classe de systèmes considérée

Nous considérons, tout au long de cette section, une classe de SDH en temps continu composée de N sous-systèmes linéaires LTI¹ auxquels des commutations de modèles sont associées. Le franchissement des transitions ne se produit qu'à des endroits bien précis de l'espace d'état, noté G_{q,q^+} , qui sont décrits, dans notre cas, par des hyper plans linéaires :

$$G_{q,q^+} = \left\{ x \in \mathbb{R}^n \mid g_{q,q^+}(x) = a_{q,q^+}^1 x_1 + a_{q,q^+}^2 x_2 + \dots + a_{q,q^+}^n x_n = 0 \right\} \quad (2.2)$$

1. Linear Time-Invariant

avec : $(q, q^+) \in I_g$ et $(a_{q,q^+}^1, a_{q,q^+}^2, \dots, a_{q,q^+}^n) \in \mathbb{R}^n$. On définit par I_g l'ensemble de uplets regroupant les différentes transitions possibles, entre deux modes, qui peuvent avoir lieu dans un système à commutations. Chaque sous-système en temps continu est défini par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_q x(t) + B_q u(t) + B_{d_q} d(t) + B_{f_q} f(t) \\ y(t) = C_q x(t) + D_q u(t) + D_{d_q} d(t) + D_{f_q} f(t) \end{cases} \quad (2.3)$$

où $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $u(t) \in \mathbb{R}^m$, $y(t) \in \mathbb{R}^p$, $d(t) \in \mathbb{R}^m$ et $f(t) \in \mathbb{R}^l$ sont respectivement le vecteur d'état (non mesurable ou partiellement mesurable), le vecteur des entrées, le vecteur de sortie, le vecteur des entrées inconnues (perturbations, incertitudes non structurées, bruits) et le vecteur des défauts additifs à détecter.

$A_q, B_q, B_{d_q}, B_{f_q}, C_q, D_q, D_{d_q}, D_{f_q}$ sont des matrices connues de dimensions appropriées, $q \in Q = \{1, 2, \dots, N\}$ est l'indice du mode actif. Sans perte de généralités, on suppose que les deux vecteurs $d(t), f(t)$ sont bornés en norme L_2 .

2.3.1 Structure du générateur de résidus

La structure du générateur de résidus que nous proposons pour la classe de SLC présentée (2.3) est donnée par la Figure 2.2. Elle est composée de trois blocs ; un observateur continu pour l'estimation de l'état continu, un bloc pour l'identification du mode actif et un gain de pondération. L'observateur continu reçoit les entrées/sorties du SLC et l'estimation du mode actif générée par le bloc d'identification. En contre partie, il fournit l'estimation de l'état continu, nécessaire pour l'identification du mode actif, et l'estimation du signal de sortie du SLC. Ce dernier est comparé à la sortie réelle du système afin de générer le signal du résidu. Les gains de l'observateur et de pondération sont choisis de manière à assurer un bon compromis entre la robustesse des résidus, vis-à-vis des entrées inconnues, et leur sensibilité aux défauts. C'est un problème, en fait, qui a été traité jusqu'à présent pour les systèmes continus mais pas dans le cadre des SLC.

Considérons la structure de l'observateur hybride, associé au système à commutations (2.3), donnée par :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A_{\hat{q}} \hat{x}(t) + B_{\hat{q}} u(t) + K_{\hat{q}} (y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C_{\hat{q}} \hat{x}(t) + D_{\hat{q}} u(t) \\ r(t) = V(y(t) - \hat{y}(t)) \end{cases} \quad (2.4)$$

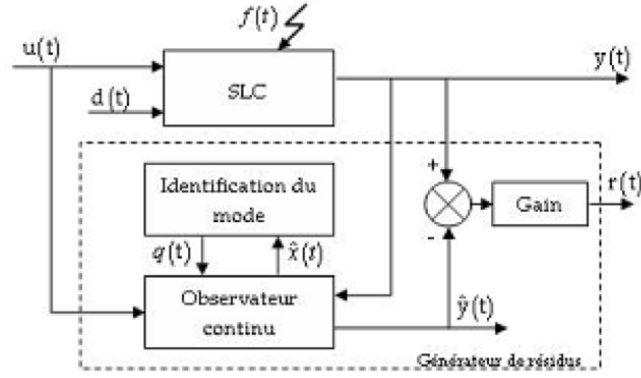


FIGURE 2.2 – Structure du générateur de résidus

où $\hat{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ et $\hat{y}(t) \in \mathbb{R}^p$ sont respectivement les vecteurs d'état et de sortie estimés, $r(t)$ est le vecteur des résidus. $K_{\hat{q}}$ et V sont respectivement la matrice de gains et la matrice de pondération à déterminer. $\hat{q} \in Q = \{1, 2, \dots, N\}$ est l'indice du mode actif de l'observateur hybride.

Si l'on désigne par q le mode du SLC et par \hat{q} le mode de l'observateur, les dynamiques de l'erreur d'estimation $e(x) = x(t) - \hat{x}(t)$ et du résidu $r(t)$ sont données par :

$$\dot{e}(t) = \bar{A}_{\hat{q}} e(t) + \Delta \bar{A}_{q, \hat{q}} x(t) + \Delta \bar{B}_{q, \hat{q}} u(t) + \bar{B}_{d_q} d(t) + \bar{B}_{f_q} f(t) \quad (2.5)$$

$$\begin{cases} r(t) &= V(y(t) - \hat{y}(t)) \\ &= V(C_q x(t) + D_q u(t) + D_{d_q} d(t) + D_{f_q} f(t) - C_{\hat{q}} \hat{x}(t) - D_{\hat{q}} u(t)) \\ &= V(C_{\hat{q}} e(t) + \Delta C_{q, \hat{q}} x(t) + \Delta D_{q, \hat{q}} u(t) + D_{d_q} d(t) + D_{f_q} f(t)) \end{cases} \quad (2.6)$$

avec : $\Delta A_{q, \hat{q}} = A_q - A_{\hat{q}}$, $\Delta B_{q, \hat{q}} = B_q - B_{\hat{q}}$, $\Delta C_{q, \hat{q}} = C_q - C_{\hat{q}}$, $\Delta \bar{A}_{q, \hat{q}} = \Delta A_{q, \hat{q}} - K_{\hat{q}} \Delta C_{q, \hat{q}}$, $\Delta \bar{B}_{q, \hat{q}} = \Delta B_{q, \hat{q}} - K_{\hat{q}} \Delta D_{q, \hat{q}}$, $\Delta D_{q, \hat{q}} = D_q - D_{\hat{q}}$.

De façon similaire, la dynamique de l'erreur d'estimation (2.5) et le résidu (2.6) peut être écrite de la façon suivante :

$$\dot{e}(t) = \dot{e}_x(t) + \dot{e}_u(t) + \dot{e}_d(t) + \dot{e}_f(t) \quad (2.7)$$

$$r(t) = r_x(t) + r_u(t) + r_d(t) + r_f(t) \quad (2.8)$$

avec :

$$\begin{cases} \dot{e}_x(t) &= \bar{A}_{\hat{q}} e_x(t) + \Delta \bar{A}_{q, \hat{q}} x(t) \\ r_x(t) &= V(C_{\hat{q}} e_x(t) + \Delta C_{q, \hat{q}} x(t)) \end{cases} \quad (2.9)$$

$$\begin{cases} \dot{e}_u(t) = \bar{A}_{\hat{q}} e_u(t) + \Delta \bar{B}_{q,\hat{q}} u(t) \\ r_u(t) = V(C_{\hat{q}} e_u(t) + \Delta D_{q,\hat{q}} u(t)) \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\begin{cases} \dot{e}_d(t) = \bar{A}_{\hat{q}} e_d(t) + \bar{B}_{d_q} d(t) \\ r_d(t) = V(C_{\hat{q}} e_d(t) + D_{d_q} d(t)) \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\begin{cases} \dot{e}_f(t) = \bar{A}_{\hat{q}} e_f(t) + \bar{B}_{f_q} f(t) \\ r_f(t) = V(C_{\hat{q}} e_f(t) + D_{f_q} f(t)) \end{cases} \quad (2.12)$$

on note par : $e_x(t) = e(t)|_{u=0,d=0,f=0}$, $r_x(t) = r(t)|_{u=0,d=0,f=0}$, $e_u(t) = e(t)|_{x=0,d=0,f=0}$, $r_u(t) = r(t)|_{x=0,d=0,f=0}$, $e_d(t) = e(t)|_{x=0,u=0,f=0}$, $r_d(t) = r(t)|_{x=0,u=0,f=0}$, $e_f(t) = e(t)|_{x=0,u=0,d=0}$, $r_f(t) = r(t)|_{x=0,u=0,d=0}$.

Notons que, dans la suite du document, $(.)^\dagger$ désigne la pseudo-inverse de $(.)$, et le symbole $(*)$ dans une matrice à la position (i, j) désigne la transposée de l'élément de la matrice à la position (j, i) . Nous définissons également par e_w la somme de e_x et e_u .

2.3.2 Synthèse de l'observateur hybride

Une panoplie d'approches traitant de la synthèse d'observateurs hybrides a été proposée dans la littérature [51, 43, 52, 53, 54]. Ces approches peuvent être classées en deux catégories; celles supposant la connaissance de l'état discret à chaque instant [55, 56], et celles s'affranchissant de cette hypothèse [57, 49, 58, 15, 59, 60]. En effet, la connaissance du mode de fonctionnement actif simplifie la synthèse de l'observateur et de ce fait, le recours aux approches classiques de synthèse devient naturel. Notons que la difficulté majeure dans ce cadre concerne la détermination des conditions de convergence de l'observateur hybride en tenant compte du phénomène de commutations. Sous cette hypothèse, la plupart des approches proposées, s'appuient sur l'existence d'une fonction de Lyapunov commune garantissant la convergence asymptotique de l'erreur d'estimation [55, 61]. Toutefois, l'idée de résoudre le problème en se basant sur la recherche d'une fonction unique pour tout le système demeure conservatrice. Pour pallier ce conservatisme, l'alternative souvent utilisée consiste à chercher une fonction de Lyapunov Multiple [48, 14].

En revanche, l'hypothèse de la non connaissance du mode de fonctionnement actif, nécessite des techniques qui prennent en charge conjointement l'estimation de l'état discret et continu. Ainsi, l'observateur est généralement constitué de deux parties : la première reconstruit l'état discret

et la deuxième estime l'état continu. Dans ce cadre nous pouvons à titre d'exemple citer [46], où un algorithme de super twisting a été proposé afin de reconstruire l'état continu du système. Ce dernier est utilisé par la suite pour estimer le mode discret. Une autre alternative, consiste en l'estimation de l'état discret dans un premier lieu et l'état continu dans un second temps [62, 63]. Dans ce cadre nous pouvons citer [64, 65], où l'état discret est estimé en un temps fini en utilisant des techniques de mode glissant.

Nos travaux se positionnent dans la catégorie des approches de synthèse d'observateurs sans connaissances a priori sur le mode actif. Quant à nos contributions, elles concernent la prise en compte du décalage entre le mode réel et celui estimé lors de la phase de synthèse de l'observateur. En effet, la détection des commutations s'effectue généralement avec un retard, qui engendre un décalage entre le mode discret du système et celui de l'observateur. Par ailleurs, les aspects de robustesse vis-à-vis des entrées inconnues, de sensibilité aux défauts et de conservatisme des fonctions de Lyapunov communes ont été aussi présents dès la phase de synthèse de nos observateurs.

Dans la suite de cette partie, sont présentés quelques solutions que nous avons proposées. En particulier, nous exposerons un résultat de synthèse d'observateur tenant compte de la désynchronisation entre le mode dans lequel évolue le système et celui de l'observateur. Ces résultats ont été étendus au cas des SLC en temps discret et des SLC avec saut d'état [CI-13]. Une autre variante concernant l'estimation des SLC modélisés par des réseaux de Petri différentiels est disponible dans [CI-18]).

Theorem 2.1. *Considérons le SLC (2.3) avec l'observateur (2.4) et supposons que pour $T_0 > 0$ nous avons $\sup_{t>T_0} \|x(t)\| \leq x_{\max}$ et $\sup_{t>T_0} \|u(t)\| \leq u_{\max}$. Supposons également qu'il existe des matrices $P_{\hat{q}}^T = P_{\hat{q}} > 0$, $H_{\hat{q}}$ et des scalaires $\alpha > 0$, $\xi > 0$ et $v_{\hat{q},q} \geq 0$ et $\mu_{\hat{q}^+, \hat{q}}$ telles que les LMI (2.13), (2.14), (2.15) et (2.16) sont satisfaites :*

$$\alpha I \leq P_{\hat{q}} \leq \xi I, \hat{q} \in Q \quad (2.13)$$

$$\Gamma_{\hat{q},q} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{\hat{q}}^T P_{\hat{q}} + P_{\hat{q}} \bar{A}_{\hat{q}} + I + v_{\hat{q},q} I & P_{\hat{q}} \Delta \bar{A}_{\hat{q},q} \\ (*) & -\varepsilon^2 v_{\hat{q},q} I \end{bmatrix} \leq 0, (\hat{q}, q) \in I_g \quad (2.14)$$

$$\Xi_{\hat{q},q} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{\hat{q}}^T P_{\hat{q}} + P_{\hat{q}} \bar{A}_{\hat{q}} + I + v_{\hat{q},q} I & P_{\hat{q}} \Delta \bar{B}_{q,\hat{q}} \\ (*) & -\varepsilon^2 v_{\hat{q},q} I \end{bmatrix} \leq 0, (\hat{q}, q) \in I_g \quad (2.15)$$

$$P_{\hat{q}^+} - \mu_{\hat{q}^+, \hat{q}} P_{\hat{q}} \leq 0, (\hat{q}, \hat{q}^+) \in I_g \quad (2.16)$$

Alors, l'erreur d'estimation e_w est bornée par :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sup \|e_w(t)\| \leq \sqrt{\frac{\bar{v}}{1 + \bar{v}} \frac{\xi}{\alpha} (x_{max}^2 + u_{max}^2)} \quad (2.17)$$

Amélioration de la Robustesse et de la sensibilité

Les processus physiques sont souvent soumis à des perturbations qui ont comme origine des bruits dûs à l'environnement du processus, des incertitudes de mesures, etc. Ces perturbations peuvent causer des fausses alarmes ou des non détections. Dès lors, la prise en compte de ces phénomènes s'avère indispensable dans la tâche de détection de défaut. Il existe plusieurs approches permettant de traiter ces aspects de robustesse qui sont classées en deux classes : active et passive. L'approche de robustesse active traite les entrées inconnues dans la phase de la génération des résidus. L'approche de robustesse passive est mise en application lors de l'évaluation du résidu, par exemple en utilisant des seuils variables dans le temps également connus sous la dénomination de seuils adaptatifs [66, 67]. Outre la robustesse vis-à-vis des entrées inconnues, la deuxième performance à laquelle on s'intéresse est la sensibilité du générateur des résidus à l'apparition des défauts. Ainsi, en s'inspirant des travaux effectués dans le cadre des systèmes continus, nous avons formulé des propositions et une procédure itérative permettant d'assurer un bon compromis entre la robustesse des résidus, vis-à-vis des entrées inconnues, et leur sensibilité aux défauts. Ces résultats se basent sur les deux critères suivants et sont énoncés ci-dessous :

$$\|r_d\|_2^2 - \gamma_{\hat{q}}^2 \|d\|_2^2 < 0 \quad (2.18)$$

$$\|r_f\|_2^2 - \beta_{\hat{q}}^2 \|f\|_2^2 > 0 \quad (2.19)$$

où : $\gamma_{\hat{q}}$ et $\beta_{\hat{q}}$ sont deux scalaires positifs.

Lemme 2.2. *Considérons le SLC (2.3) avec l'observateur (2.4). Le système (2.11) est asymptotiquement stable et satisfait la condition (2.18) s'il existe des matrices $P_{\hat{q}} > 0, H_{\hat{q}}$ et V tels que la LMI suivante est vérifiée :*

$$\begin{bmatrix} A_{\hat{q}}^T P_{\hat{q}} + P_{\hat{q}} A_{\hat{q}} - H_{\hat{q}} C_{\hat{q}} - C_{\hat{q}}^T H_{\hat{q}}^T & P_{\hat{q}} B_{d_q} - H_{\hat{q}} D_{d_q} & C_{\hat{q}}^T V^T \\ * & -\gamma_{\hat{q}}^2 I & D_{d_q}^T V^T \\ * & * & -I \end{bmatrix} \leq 0 \quad (2.20)$$

Avec : $H_{\hat{q}} = P_{\hat{q}} K_{\hat{q}}$

Lemme 2.4. *Considérons le SLC (2.3) avec l'observateur (2.4). Le système (2.12) est asymptotiquement stable et satisfait la condition (2.19) s'il existe des matrices $P_{\hat{q}} > 0, H_{\hat{q}}$ et V tels que la LMI suivante est vérifiée :*

$$\begin{bmatrix} Ter1 + 2\varphi_1(V, V_c^n) & H_{\hat{q}} D_{f_q} - P_{\hat{q}} B_{f_q} & C_{\hat{q}}^T V^T \\ * & \beta_{\hat{q}}^2 I + 2\varphi_2(V, V_f^n) & D_{f_q}^T V^T \\ * & * & -I \end{bmatrix} \leq 0 \quad (2.21)$$

avec : $V_c^n = V^{n-1} C_{\hat{q}}, V_f^n = V^{n-1} F_{f_q}, n = 1, 2, \dots, Ter1 = A_{\hat{q}}^T P_{\hat{q}} + P_{\hat{q}} A_{\hat{q}} - H_{\hat{q}} C_{\hat{q}} - C_{\hat{q}}^T H_{\hat{q}}^T,$
 $\varphi_1(V, V_c^n) = (V_c^n)^T V_c^n - (V_c^n)^T V C_{\hat{q}} - C_{\hat{q}}^T V^T V_c^n, \varphi_2(V, V_f^n) = (V_f^n)^T V_f^n - (V_f^n)^T V D_{f_q} - D_{f_q}^T V^T V_f^n,$
 $H_{\hat{q}} = P_{\hat{q}} K_{\hat{q}}$ et F_{f_q} est une matrice de pondération.

Theorem 2.2. *Considérons le SLC (2.3) avec l'observateur (2.4). $\forall (\hat{q}, \hat{q}^+) \in I_g$ tel que \hat{q}^+ est le mode successeur de \hat{q} , le résidu (2.6) est borné et satisfait les conditions (2.18) et (2.19), s'il existe des matrices $P_{\hat{q}} > 0, H_{\hat{q}}, V$ et des scalaires $\alpha > 0, \xi > 0, v_{\hat{q}, \hat{q}^+} \geq 0, \mu_{\hat{q}^+, \hat{q}} \leq 1$ tels que les LMIs (2.13), (2.14), (2.15), (2.16), (2.20) et (2.21) soient vérifiées.*

2.3.3 Méthodologie du diagnostic

Dans ce qui suit, l'enjeu est de proposer une approche de diagnostic permettant, d'une part, de détecter et de localiser les défauts capteurs, affectant la partie continue, et d'autre part, de détecter les défauts engendrant des transitions vers un mode non successeur. L'une des originalités de cette méthodologie consiste en la conjugaison d'outils généralement dédiés aux systèmes continus avec ceux utilisés pour les SED afin de considérer de façon explicite les interactions entre les deux aspects du SLC.

La figure 2.3 présente un schéma bloc de la structure proposé où l'idée clé consiste à donner le pouvoir de décision, concernant le bon fonctionnement du SLC, à un seul module qui assure la coordination entre les deux autres modules. Pour ce faire, nous avons mis en œuvre trois modules principaux qui interagissent les uns avec les autres.

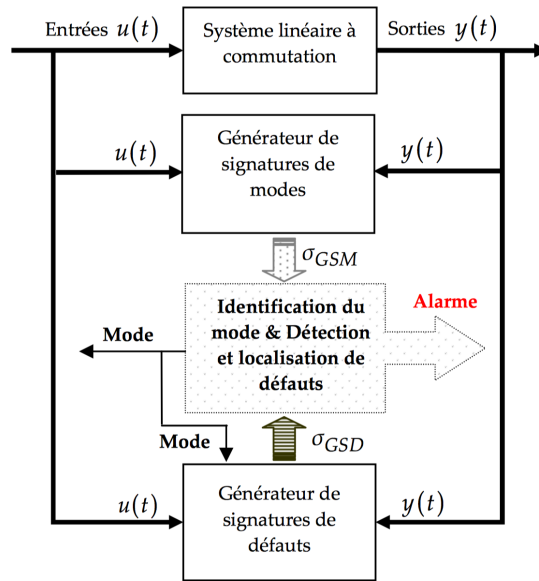


FIGURE 2.3 – Schéma de la méthodologie de diagnostic adopté

Le premier module, appelé "générateur de signatures de mode", a pour vocation principale de générer les indicateurs de cohérences (résidus) associés à chaque mode de fonctionnement normal en utilisant seulement les entrées-sorties du SLC. Il est conçu autour d'un banc de N observateurs de Luenberger. Les sorties reconstruites par chaque observateur sont confrontées, à tout instant, aux sorties mesurées pour générer des vecteurs de résidus r_q . Ces résidus seront par la suite évalués pour générer les signatures de modes. En l'absence de défauts, seulement un vecteur de résidus est nul à chaque instant, ce qui signifie que le SLC évolue selon le modèle associé à cet observateur. Notons ici que pour cela, notre générateur de résidus est synthétisé de façon à préserver une robustesse par rapport aux entrées inconnues.

Le deuxième module, nommé "générateur de signatures des défauts", est conçu autour d'un schéma DOS (Dedicated Observer Scheme) à base d'observateurs hybrides. Ce schéma est configuré de façon à générer des résidus structurés sensibles uniquement aux défauts de capteurs. Outre les entrées/sorties continues du SLC qui sont nécessaires pour son fonctionnement, ce module nécessite l'estimation en ligne du mode actif. Le troisième module, appelé "identification du mode & détection et localisation de défauts", reçoit les entrées-sorties continues du SLC, le vecteur de résidus sensibles au changement de mode σ_{GSM} et le vecteur de résidus sensibles aux défauts de capteurs σ_{GSD} . Ce module, qui assure la coordination entre les deux autres modules, est à même de détecter à la fois les défauts continus et discrets et de déterminer le mode de fonctionnement du SLC (normal ou défaillant).

Le module d'identification du mode & détection et localisation de défauts est un diagnostiqueur

qui indique le mode de fonctionnement normal ou défaillant du SLC. Il est composé d'un ensemble d'état enrichis indiquant les sorties observées, les états correspondants et les étiquettes décrivant le mode de fonctionnement possible du système. il est défini formellement comme suit :

Définition 3.2.

Le diagnostiqueur est un 6-uplet :

$$H_{diag} = (\hat{Q}, \Sigma, \Psi, Init, E, \gamma)$$

où

- $\hat{Q} = \hat{Q}_{cert} \cup \hat{Q}_{incert}$ est un ensemble d'états discrets avec :
 - $\hat{Q}_{cert} = \hat{Q}_N \cup \hat{Q}_D \cup \hat{Q}_F$ est un ensemble d'états discrets certains avec :
 - $\hat{Q}_N = \{\hat{q}_N, \hat{q}_N \in I_N\}$ est un ensemble d'états discrets correspondant aux états (modes) de fonctionnement normaux du SLC.
 - $\hat{Q}_D = \{\hat{q}_D, \hat{q}_D \in I_N\}$ est un ensemble d'états discrets représentant les comportements anormaux affectant la trajectoire discrète du SLC.
 - $\hat{Q}_F = \{\hat{q}_F, \hat{q}_F \in I_p\}$ est un ensemble d'états discret correspondant aux comportements anormaux du SLC, dûs à l'occurrence de défauts capteurs.
 - \hat{Q}_{incert} est un ensemble d'états discrets représentant les situations ambiguës où le diagnostiqueur n'arrive pas à décider du mode (normal ou défaillant) dans lequel le système évolue.
- $\Sigma = \Sigma_{GSM} \cup \Sigma_{GSD}$ est un ensemble fini de mots binaires :
 - Σ_{GSM} est un ensemble de 2^N mots binaires de la forme $(\sigma_{r_1}, \dots, \sigma_{r_i}, \dots, \sigma_{r_n})$ tel que $\sigma_{r_i} \in \{0, 1\}, i \in \{1, \dots, N\}$
 - Σ_{GSD} est un ensemble de 2^p mots binaires de la forme $(\sigma_{z_1}, \dots, \sigma_{z_i}, \dots, \sigma_{z_p})$ tel que $\sigma_{z_i} \in \{0, 1\}, i \in \{1, \dots, N\}$
 - $\Sigma_{mode} = \{\sigma_{mode_i} \in \Sigma_{GSM} | (\sigma_{r_i} = 1) \wedge (\sigma_{r_j} = 0), \forall j \neq i\}$ l'ensemble des mots binaires existant dans la table des signatures théoriques de modes (Tab. 3.1).
 - $\Sigma_{\phi} = \{\sigma_{\phi_i} \in \Sigma_{GSD} | (\sigma_{z_i} = 1) \wedge (\sigma_{z_j} = 0), \forall j \neq i\}$ l'ensemble des mots binaires existant dans la table des signatures théoriques de défauts capteurs (Tab 3.2).
 - $\Sigma_{incert} = \{\sigma_{incert} = \sigma | \sigma \in \Sigma / (\Sigma_{mode} \cup \Sigma_{\phi})\}$ est l'ensemble des mots binaires n'appartenant ni à la table des signatures théoriques de modes, ni à la table des signatures théoriques de défauts de capteurs.
- Ψ est un ensemble fini de sorties discrètes.

- $Int \subset \hat{Q}$ est l'état discret initial.
- $E \subset \hat{Q} \times \Sigma \times \hat{Q}$ est une collection de transitions discrètes. Le triplet $(\hat{q}, \sigma, \hat{q}^+)$ représente la transition du mode \hat{q} vers le mode \hat{q}^+ suite à l'arrivée de l'entrée discrète $\sigma \in \Sigma$.
- $\gamma : E \rightarrow \Psi$ est une application qui associe à chaque mode $\hat{q} \in Q$ une sortie discrète.

Construction et fonctionnement du diagnostiqueur.

Sans perte de généralités, la construction du diagnostiqueur pour un SLC de N états discrets et de p sorties est effectuée en construisant, pour chaque état discret q du SLC, $3 + p$ états discrets (figure 2.4) :

1. Un état discret $\hat{q}_N \in \hat{Q}_N$ correspondant à l'état de fonctionnement normal q du SLC.
2. Un état $\hat{q}_{incert} \in \hat{Q}_{incert}$ représentant les situations où l'observateur ne peut pas décider du mode dans lequel évolue le SLC.
3. Un état $\hat{q}_D \in \hat{Q}_D$ représentant les comportements anormaux affectant la trajectoire discrète du SLC à partir de l'état discret q .
4. Un ensemble de p états discrets noté par $\hat{q}_{Fj} \in \hat{Q}_F$, où $j = 1, \dots, p$, tel que l'état discret \hat{q}_{Fj} représente les comportements anormaux du SLC dans le mode q , dûs à l'occurrence d'un défaut dans le capteur j .

Il est à souligner que les états incertains sont ajoutés au sein du diagnostiqueur dans le but de prendre en considération les événements ambigus (i.e. tout événement traduit par l'observation d'une signature de mode ou de défaut différente de celles définies dans les tables de signatures théoriques). Pour plus de détails sur le fonctionnement du diagnostiqueur et la synthèse des différents module, le lecteur est invité à consulter [CI-11].

2.3.4 Application à un modèle de bicyclette

La méthodologie du diagnostic a été appliquée à un modèle de "bicyclette". Les résultats obtenus en simulation montrent qu'en l'absence de défauts, chaque composante des vecteurs de résidus $r_i(t)$ converge vers zéro uniquement lorsque le SLC évolue dans le mode q (Figure 2.5). Par ailleurs, les résultats de l'identification de mode, sont donnés dans la Figure 2.6, où l'on note respectivement les modes 1_{incert} , 2_{incert} et 3_{incert} par 1.5, 2.5, 3.5. Enfin, la détection et la localisation d'un défauts capteur est illustré par les Figures 2.7 et 2.8. Plus de détails concernant la construction du diagnostiqueur, la simulation des défauts affectant la partie et les performances de la détection sont disponibles dans la thèse de Belkhiat.

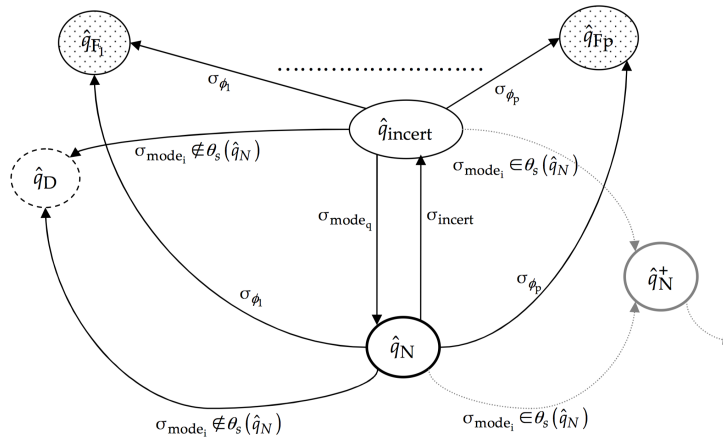


FIGURE 2.4 – Construction et fonctionnement du diagnostiqueur

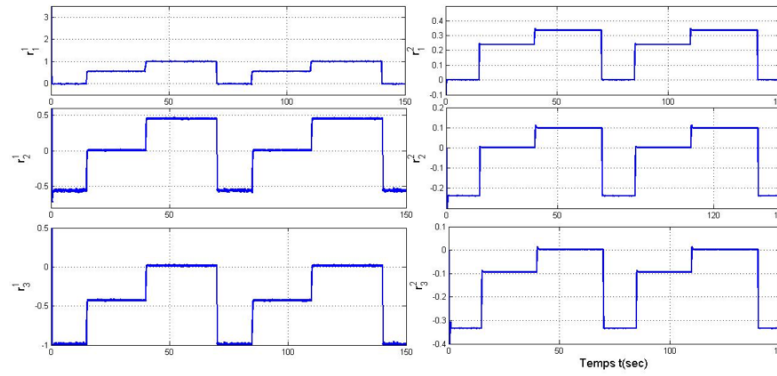


FIGURE 2.5 – Evolution des vecteurs de résidus

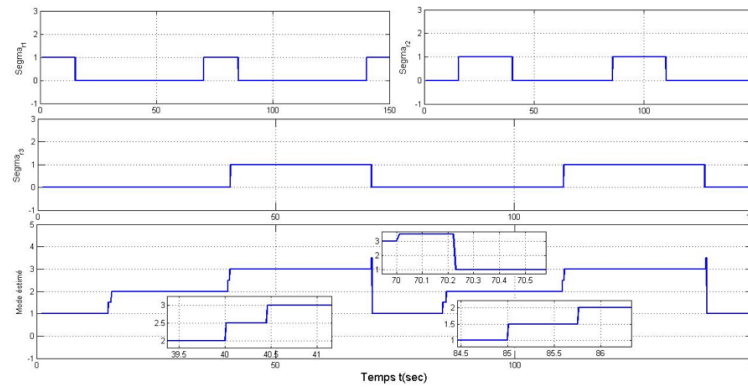


FIGURE 2.6 – Estimation du mode discret en l'absence de défauts

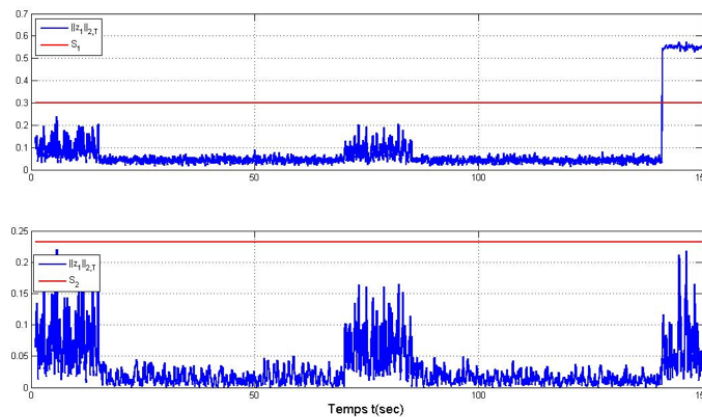


FIGURE 2.7 – Détection et localisation d'un défaut

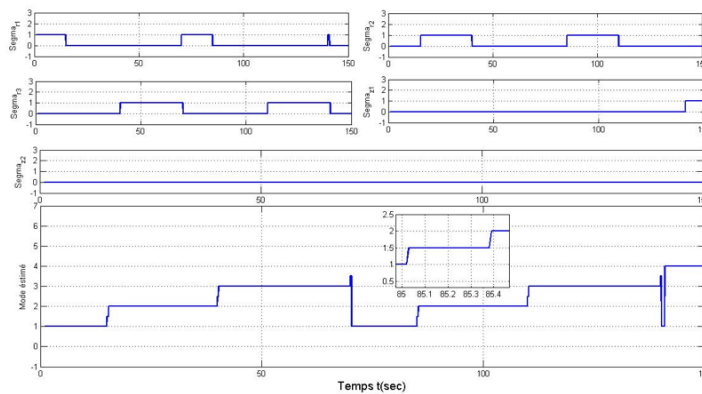


FIGURE 2.8 – Estimation du mode discret en présence d'un défaut

2.4 De la localisation à l'estimation des défauts

Dans la suite des travaux sur la détection et la localisation des défauts, nous nous sommes intéressés à la problématique d'estimation des défauts. Ce problème a été traité dans plusieurs travaux récents. À titre d'exemple, un algorithme adaptatif, permettant d'estimer les défauts affectant un SLC avec retard, a été développé dans [68]. Une autre approche de détection et d'estimation de défauts pour des SLC en temps discret est proposée dans [69]. Par ailleurs, les observateurs de type proportionnel intégral ont été adaptés pour l'estimation simultanée de l'état et des défauts [70, 71, 72] et ont été récemment étendus aux systèmes à commutation [73].

Cependant, au mieux de nos connaissances, l'estimation des défauts en présence de bruit de mesure, a reçu moins d'intérêt. Or, toute approche qui se veut applicable ne peut pas négliger la présence de bruits corrompant les signaux. C'est avec cet esprit que nous avons abordé

la problématique de l'estimation de défaut en optant pour une démarche non usuelle dite d'algèbre différentielle. En effet, cette approche introduite par M. Fliess et H. S. Ramirez [74, 75, 76, 77] conduit à des méthodes d'estimation de dérivées et de détection de ruptures, dont les performances sont bien connues [78, 79]. De plus, elle présente l'avantage de s'affranchir des hypothèses concernant la connaissance a priori d'informations statistiques sur le bruit. [80, 81]

L'idée directrice de nos travaux repose sur deux constats : d'une part, il est courant en automatique d'estimer les défauts en exploitant la dérivée des signaux de sortie, et, d'autre part, le passage d'un mode discret à l'autre se traduit généralement par une discontinuité dans le signal de sortie ou dans l'une de ses dérivées. Dans ce contexte, une approche algébrique devient intéressante pour l'estimation des dérivées et la détection des ruptures dans les signaux de sortie bruités, et ce sans qu'il soit nécessaire de connaître les propriétés statistiques de bruit.

Ainsi, notre méthodologie développée dans le cadre de la thèse de Khaled Laboudi, s'articule autour de trois blocs. Le premier estime les instants de commutation en exploitant les sorties continues issues des capteurs. L'idée ici est de considérer que le passage d'un mode à un autre se traduit par des ruptures dans les signaux des sorties ou dans l'une de leurs dérivées successives. Ainsi après une estimation de l'instant de commutation, par des méthodes algébriques, l'état discret est estimé par le bloc de reconstruction de l'état discret. Cette estimation est effectuée sous l'hypothèse d'une connaissance a priori de la séquence de commutation et de l'absence de défauts se traduisant par des transitions anormales. Quant au deuxième bloc, il correspond à un observateur hybride permettant d'estimer l'état continu du système. Cette estimation est réalisée en se basant sur les informations issues de l'observateur discret et des données des capteurs et des actionneurs. Parallèlement à l'estimation de l'état continu, un différentiateur algébrique calcule à chaque instant la dérivée du signal de sortie afin de la fournir à un autre bloc qui la conjugue avec les sorties de l'observateur hybride pour estimer les défauts.

Dans cette section, nous nous intéressons à l'estimation des défauts affectant la partie continue, et plus particulièrement, les défauts actionneurs. Nous considérons, ainsi, le SLC (2.22) :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_q x(t) + B_q u(t) + F_q f(t) \\ y(t) = C_q x(t) + \eta(t) \end{cases} \quad (2.22)$$

où $x \in \mathbb{R}^n$ est l'état continu, $u \in \mathbb{R}^m$ désigne la commande, $f \in \mathbb{R}^l$, $y \in \mathbb{R}^p$ représente la sortie du système et $\eta \in \mathbb{R}^p$ est un bruit de mesure. Pour tout $i \in I$, les matrices $F_i \in \{F_1, \dots, F_N\}$ sont des matrices connues de dimensions appropriées.

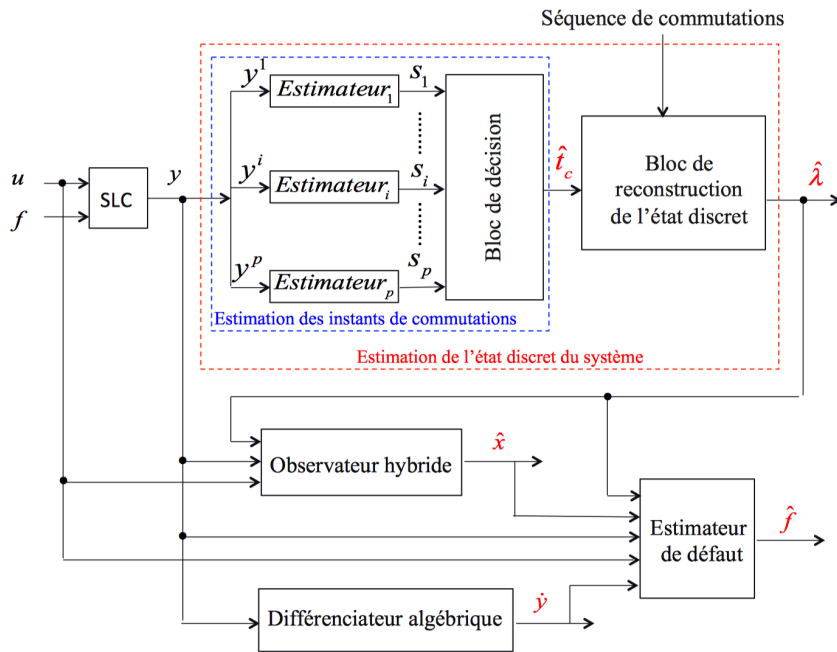
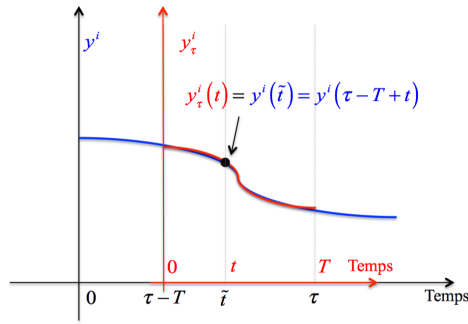


FIGURE 2.9 – Approche d’estimation de l’état et des défauts

2.4.1 Estimation de l’état discret

Les approches d’estimation de l’état discret peuvent être classées en deux familles : celles cherchant à déterminer le sous-système actif, et celles estimant les instants de commutation [82]. La reconstruction de l’état discret s’effectue dans ce cas en supposant que l’on connaît à priori la séquence de commutation et le mode initial.

Ainsi, une approche basée sur la projection des données a été proposée dans [83, 84, 85]. Le cas des SLC modélisés par réseaux de Petri différentiel a été traité dans nos premiers travaux [86, 14]. Aussi, un estimateur en ligne des instants de commutation pour un SLC ayant deux modes a été synthétisé dans [82]. Cette estimateur, basé sur des méthodes algébriques, a été étendue ensuite au cas des SLC avec plusieurs modes [87, 88]. Dans le même cadre, un algorithme basé sur des filtres a été proposé dans [89]. L’idée ici est de réécrire, dans un premier temps, le système original sous la forme d’un modèle impulsif auxiliaire. Puis, d’utiliser des manipulations algébriques annihilantes afin d’obtenir une relation algébrique différentielle faisant explicitement apparaître les instants de commutations. Enfin, des filtres sont utilisés afin d’estimer les instants de commutations sans aucune utilisation de dérivée des mesures. Cependant, au mieux de nos connaissances, l’estimation en ligne du mode discret et des instants de commutations pour des systèmes hybrides dont la sortie est affectée par des bruits de mesure reste un problème qui mérite d’être encore exploré. C’est dans cette perspective que s’inscrivent nos contributions exposées dans cette partie .


 FIGURE 2.10 – Restriction de la sortie y^i dans l'intervalle I_τ^T

Sans aucune perte de généralité, nous considérons dans ce qui suit que le SLC possède une seule sortie notée y^i . Cette dernière est restreinte à chaque instant τ sur un intervalle de temps $I_\tau^T = [\tau - T, \tau]$, d'une longueur prédéfinie et suffisamment petite comme suit (Figure 2.10) :

$$y_\tau^i(t) = H(t) y^i(\tau - T + t), \quad t \in [0, T] \quad (2.23)$$

où H est la fonction Heaviside.

L'objectif maintenant est d'estimer l'état discret à partir des mesures bruitées issues des capteurs. L'algorithme d'estimation proposé se fonde sur la possibilité de représenter le signal de sortie durant un intervalle de temps assez court à l'aide d'un polynôme et sur l'utilisation de manipulations algébriques permettant de réécrire le problème sous la forme d'un système linéaire faisant apparaître les instants de commutations recherchés. Sans le développer, pour ne pas alourdir la lecture, notre principal résultat est énoncé ci-dessous :

Theorem 2.3. *Considérons le SLC (2.22) et supposons que la sortie non bruitée $y_\tau^i(t)$ est restreinte sur l'intervalle $I_\tau^T = [\tau - T, \tau]$. Si une commutation a lieu à l'instant $\tau_c \in I_\tau^T$, alors le système linéaire (2.24) est vérifié. En plus, une estimation de l'instant de commutation t_c est donnée par : $\hat{t}_c = \tau - T + \hat{t}_c$.*

$$P_k^i(T, \tau) \hat{\Theta}_\tau = Q_k^i(T, \tau) \quad (2.24)$$

$$\text{où : } \hat{\Theta}_c = \begin{pmatrix} (\hat{t}_c)^3 & 3(\hat{t}_c)^2 & 3\hat{t}_c \end{pmatrix}^T, \quad Q_k^i = - \begin{pmatrix} v_{k+3}^i & v_{k+4}^i & v_{k+5}^i \end{pmatrix}^T \text{ et}$$

$$P_k^i = \begin{bmatrix} v_k^i & v_{k+1}^i & v_{k+2}^i \\ v_{k+1}^i & v_{k+2}^i & v_{k+3}^i \\ v_{k+2}^i & v_{k+3}^i & v_{k+4}^i \end{bmatrix},$$

par ailleurs, $\forall k \geq 0$ et $\forall v > 3$

$$v_k^i(\tau) = \int_0^T h_k(\rho) y_\tau^i(\rho) d\rho \quad (2.25)$$

et

$$h_k(\rho) = \begin{cases} \frac{(-1)^{k+1}}{(v-1)!} \frac{d^3}{d\rho^3} \left\{ \rho^{k+3} (T-\rho)^{v-1} \right\} & \text{si } \rho \in [0, T] \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.26)$$

2.4.2 Découplage des défauts

L'enjeu ici est de trouver une transformation de coordonnées permettant de réécrire le SLC (2.22) dans une autre base et de découpler un sous-ensemble de l'état des défauts. Ainsi, nous avons dans [CI-6] étendu une transformation de coordonnées initialement développée pour des systèmes linéaires continus [90] au cas des SLC. Ceci a permis de réécrire, pour chaque mode $i \in I$, le SLC sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}(t) = \bar{A}_q \bar{x}(t) + \bar{B}_q u(t) + \bar{F}_q f(t) \\ y(t) = \bar{C}_q \bar{x}(t) \\ \bar{x}(t_c^+) = T_{q(t_c^+)}^{-1} T_{q(t_c^-)} \bar{x}(t_c^-) \end{cases} \quad (2.27)$$

avec : $\bar{x} = T_q^{-1} x = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 & \bar{x}_2 \end{bmatrix}^T$, où $T_q = \begin{bmatrix} N_q & F_q \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ est une matrice non singulière, $N_q \in \mathbb{R}^{n \times (n-l)}$ est une matrice arbitraire, $\bar{x}_1 \in \mathbb{R}^{n-l}$ et $\bar{x}_2 \in \mathbb{R}^l$, sont respectivement le "sous-état" indépendant affecté par les défauts.

D'autre part, $T_{q(t_c^-)}$ et $T_{q(t_c^+)}$ représentent respectivement la matrice de transformation du mode actif avant et après l'instant de commutation t_c . Les autres matrices sont données par :

$$\bar{A}_q = T_q^{-1} A_q T_q = \begin{bmatrix} \bar{A}_q^{11} & \bar{A}_q^{12} \\ \bar{A}_q^{21} & \bar{A}_q^{22} \end{bmatrix}, \bar{B}_q = T_q^{-1} B_q = \begin{bmatrix} \bar{B}_q^1 \\ \bar{B}_q^2 \end{bmatrix}, \bar{F}_q = T^{-1} F_q = \begin{bmatrix} 0 \\ I_l \end{bmatrix} \text{ et } \bar{C}_q = C_q T_q = \begin{bmatrix} C_q N_q & C_q F_q \end{bmatrix}.$$

Notons ici que la troisième partie du système (2.27) est introduite afin de mettre à jour l'état du système transformé à chaque instant de commutation. En effet, bien que l'on ne considère pas des sauts d'état dans le SLC initial, la transformée de coordonnées engendre des sauts qu'il faut adaptés comme indiqué sur la Figure 2.11

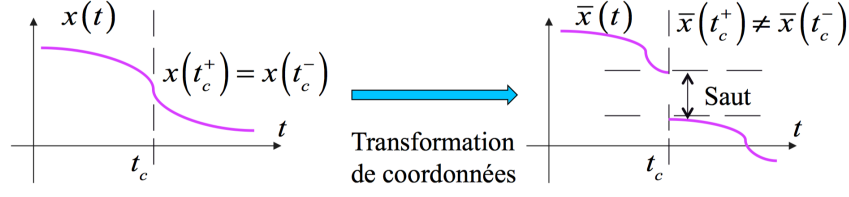


FIGURE 2.11 – Saut de l'état transformé à un instant de commutation

L'analyse du système (2.27), montre que la dynamique de \bar{x}_1 dépend du sous état \bar{x}_2 dont la dynamique dépend des défauts. Ainsi, dans le but de découpler complètement \bar{x}_1 de \bar{x}_2 , nous avons montré qu'il est possible, sous des hypothèses classiques, de trouver pour tout $i \in I$, une matrice arbitraire $Q_i \in \mathbb{R}^{p \times (p-l)}$ telle que la matrice $U_i = \begin{bmatrix} C_i F & Q_i \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{p \times p}$ soit une matrice non singulière vérifiant :

$$(U_i)^{-1} U_i = \begin{bmatrix} U_i^1 C_i F & U_i^1 Q_i \\ U_i^2 C_i F & U_i^2 Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_l & 0 \\ 0 & I_{p-l} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

où : $(U_i)^{-1} = \begin{bmatrix} U_i^1 & U_i^2 \end{bmatrix}^T$ avec $U_i^1 \in \mathbb{R}^{l \times p}$ et $U_i^2 \in \mathbb{R}^{(p-l) \times p}$.

Ainsi, après certaines transformations, nous obtenons le système réduit [CI-6] :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1(t) = \tilde{A}_q \bar{x}_1(t) + \tilde{B}_q u(t) + \tilde{E}_q y(t) \\ \bar{y}(t) = \tilde{C}_q \bar{x}_1(t) \\ \bar{x}_1(t_c^+) = S_{q,q^+} \bar{x}_1(t_c^-) \end{cases} \quad (2.29)$$

avec $\tilde{A}_q = \bar{A}_q^{11} - \bar{A}_q^{12} U_q^1 C_q N_q$, $\tilde{B}_q = \bar{B}_q^1$, $\tilde{C}_q = U_q^2 C_q N_q$, $\tilde{E}_q = \bar{A}_q^{12} U_q^1$ et $\bar{y} = U_q^2 y$. La matrice $S_{q,q^+} = \begin{bmatrix} I_{n-l} & 0_{(n-l) \times l} \end{bmatrix} T_{q(t_c^+)}^{-1} T_{q(t_c^-)} = \begin{bmatrix} S_{q,q^+}^1 & S_{q,q^+}^2 \end{bmatrix}$ désigne une matrice d'ordre $(n-l) \times n$, composée de deux sous matrices S_{q,q^+}^1 d'ordre $(n-l) \times (n-l)$ et S_{q,q^+}^2 d'ordre $(n-l) \times l$.

2.4.3 Estimation de l'état continu et des défauts

Considérant maintenant l'observateur et l'erreur d'estimation pour le sous-état \bar{x}_1 :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1(t) = A_q^{obs} \hat{x}_1(t) + B_q^{obs} u(t) + C_q^{obs} y(t) \\ \hat{x}_1(t_c^+) = S_{q,q^+} \hat{x}_1(t_c^-) \\ \hat{x}(t) = T_q \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ U_q^1 y(t) - U_q^1 C_q N_q \hat{x}_1(t) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2.30)$$

Chapitre 2. Synthèse des activités de recherche

avec $A_q^{obs} = \tilde{A}_q - L_q \tilde{C}_q$, $B_q^{obs} = \tilde{B}_q$, $C_q^{obs} = (L_q U_q^2 + \tilde{E}_q)$ et $\hat{x}_1(t)$ représente l'estimation de \bar{x}_1 . Ainsi, $\bar{x}_1(t_c^+)$ est l'estimation de l'état du système transformé réduit (2.29) après l'instant de commutation t_c et $\hat{x}(t_c^-)$ correspond à l'estimation de l'état \bar{x} du système transformé (2.27) avant l'instant de commutation t_c ($\hat{x}(t_c^-) = T_{q(t_c^-)}^{-1} \hat{x}(t_c^-)$).

$$\varepsilon_1(t) = \hat{x}_1(t) - \bar{x}_1(t) \quad (2.31)$$

Dès lors, les conditions suffisantes de synthèse de l'observateur hybride et de l'estimateur de défauts sont données ci-dessous [CI-7]. Notons qu' au-delà de la simple convergence asymptotique de l'erreur d'estimation, nous avons aussi proposé une version qui impose une dynamique dont les pôles sont cloisonnés dans une région LMI [CI-6] :

Proposition 2.4. *Considérons le SLC (2.22), le système transformé réduit (2.29) et l'observateur (2.30). La dynamique de l'erreur d'estimation (2.31) est donnée par :*

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_1(t) = A_q^{obs} \varepsilon_1(t) \\ \varepsilon_1(t_c^+) = G_{q,q^+} \varepsilon_1(t_c^-) \end{cases} \quad (2.32)$$

avec $G_{q,q^+} = S_{q,q^+}^1 - S_{q,q^+}^2 U_q^1 C_q N_q$.

Theorem 2.5. *Considérons le SLC (2.22), le système transformé réduit (2.29). S'il existe pour tout $i \in I$, une matrice $H_i \in \mathbb{R}^{(n-l) \times (p-l)}$ et une matrice $P_i \in \mathbb{R}^{(n-l) \times (n-l)}$ symétrique définie et positive tel que :*

$$\tilde{A}_i^T P_i + P_i \tilde{A}_i - H_i^T \tilde{C}_i - \tilde{C}_i^T H_i \leq 0 \quad (2.33)$$

$$\begin{bmatrix} P_i & G_{i,j}^T P_j \\ * & P_j \end{bmatrix} \geq 0 \quad (2.34)$$

où j est le mode successeur du mode i . Alors, l'observateur (2.30) synthétisé avec les gains matriciels $L_i = P_i^{-1} H_i^T$, assure la convergence asymptotique de l'erreur d'estimation (2.31), ainsi que celle de l'état estimé \hat{x} vers l'état réel x .

Proposition 2.6. *Considérons le SLC (2.22). Supposons que l'état estimé $\hat{x}_1(t)$ converge asymptotiquement vers l'état \bar{x}_1 . Alors, un estimateur du vecteur des défauts est donné par :*

$$\hat{f} = U_q^1 \dot{y} + \theta_q^1 \hat{x}_1 + \theta_q^2 y + \theta_q^3 u \quad (2.35)$$

avec

$$\theta_q^1 = -U_q^1 C_q N_q A_q^{obs} + \bar{A}_q^{22} U_q^1 C_q N_q - \bar{A}_q^{21}$$

$$\theta_q^2 = -U_q^1 C_q N_q (L_q U_q^2 + \tilde{E}_q) - \bar{A}_q^{22} U_q^1$$

$$\theta_q^3 = -U_q^1 C_q N_q \bar{B}_q^1 - \bar{B}_q^2$$

2.4.4 Synthèse du différentiateur algébrique

L'estimation des dérivées de signaux bruités est un problème pratique important. Il a été classiquement traité en utilisant des alternatives allant de l'ajustement des polynômes jusqu'à la conception d'observateurs [58, 91, 92, 93]. Cependant, toutes ces approches restent plus ou moins sensibles au bruit [79].

L'objectif de cette section est de présenter un différentiateur algébrique, robuste vis-à-vis du bruit, permettant de calculer la dérivée du vecteur de sortie y . Ce type de différentiateur a été appliqué avec succès dans différents domaines, comme le dé-bruitage des signaux [75, 74], le traitement d'images [94], l'estimation paramétrique et la dérivation numérique.

Notre contribution à ce niveau consiste principalement en une revisite des travaux développés dans [79, 95, 78, 96]. L'idée principale se base sur l'hypothèse que la sortie y est de classe C^∞ . Ceci permet de développer y en série de Taylor et de tronquer ce développement à un certain ordre N . Une transformée de Laplace est ensuite appliquée afin de réécrire le modèle dans le domaine opérationnel. Enfin, la dérivée de la sortie y est estimée en utilisant des dérivations adéquates dans le domaine opérationnel et des manipulations algébriques permettant le passage dans le domaine temporel. Ainsi, sans rentrer dans des détails rébarbatifs, qui risquent d'alourdir la lecture, le premier fruit de ce travail développé en collaboration avec Mamadou Mboup, est énoncé ci-dessous [CO-1] :

Theorem 2.7. *Considérons deux entiers naturels positifs μ et κ . Soit $I_\tau^{\tilde{T}}$, une fenêtre glissante de longueur \tilde{T} . Alors, une estimation de la dérivée d'un signal y à un instant $\tau \in I_\tau^{\tilde{T}}$ est donnée par :*

$$\hat{y}(\tau; \kappa, \mu) = \int_0^{\tilde{T}} g_{\kappa, \mu} \left(\frac{\rho}{\tilde{T}} \right) y(\tau - \tilde{T} + \rho) d\rho \quad (2.36)$$

$$où : g_{\kappa, \mu}(u) = -\frac{\gamma_{\kappa, \mu}}{\tilde{T}^2} u^\kappa (1-u)^\mu [\kappa + 1 - (\kappa + \mu + 2)u] \text{ et } \gamma_{\kappa, \mu} = \frac{(\mu + \kappa + 3)!}{(\mu + 1)!(\kappa + 1)!}.$$

2.4.5 Exemple de Simulation

L'approche proposée a été testée sur un SLC ayant 3 modes. La dynamique continue de ce SLC est caractérisée par 5 états et 3 sorties [CI-6]. Par ailleurs, la commande et le vecteur des

Chapitre 2. Synthèse des activités de recherche

défauts sont donnés respectivement par $u(t) = 1$ et $f(t) = \begin{pmatrix} f_1(t) & f_2(t) \end{pmatrix}^T$, où $f_1(t) = 7\sin(t)$ et $f_2(t) = 6\cos(t)$. Enfin, le bruit de mesure η est un bruit blanc avec un rapport signal a bruit de $57dB$ pour y^1 , $56dB$ pour y^2 et $64dB$ pour y^3 .

Les résultats d'estimation des instants de commutation sont synthétisés dans le tableau 2.1, où t_c représente l'instant de commutation réel, $\hat{t}_c^i, i \in \{1, 2, 3\}$ représente l'instant de la première détection par chacun des estimateurs et \hat{t}_c correspond à l'instant de commutation fournit par l'algorithme de décision. Nous remarquons que la fausse alarme est rejetée par l'algorithme de décision. Aussi, le signal de commutation q et son estimation sont donnés dans la figure 2.12.

t_c	1	FD	4.00	7.40	12.50	16.50	20.20	25.00	29.50	34.00
\hat{t}_c^1	1.01		4.05	7.43	12.52	16.54	20.22	25.02	29.58	34.02
\hat{t}_c^2	1.09	3.59	4.04	7.43	12.52	-	-	25.02	-	34.02
\hat{t}_c^3	1.01		4.04	-	12.52	16.53	20.22	25.05	29.55	-
\hat{t}_c	1.01		4.04	7.43	12.52	16.54	20.22	25.02	29.58	34.02

TABLE 2.1 – Détection des instants de commutations par les différents estimateurs

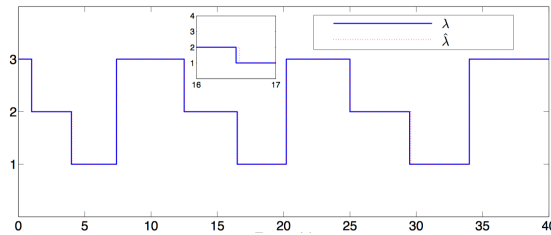


FIGURE 2.12 – Signal de commutations et son estimation

La figure 2.13, présente un exemple d'évolution de l'état x_4 , de son estimation \hat{x}_4 et de l'erreur d'estimation en l'absence de défauts. Cette figure montre clairement l'efficacité de l'observateur synthétisé.

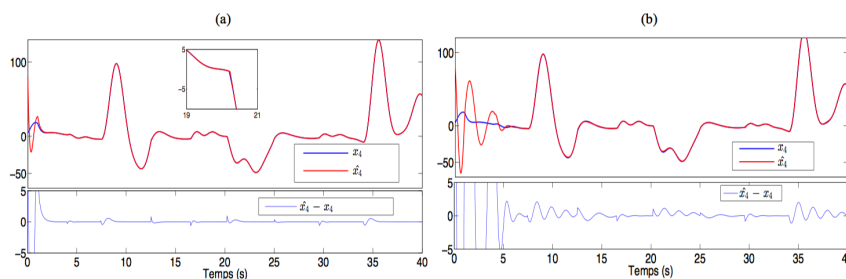


FIGURE 2.13 – État x_4 , son estimation \hat{x}_4 et l'erreur d'estimation $\hat{x}_4 - x_4$: (a) : cas avec région LMI, (b) : cas sans région LMI

Enfin, un exemple d'estimation de défauts est présenté sur la Figure 2.14. Cette dernière a été obtenue en utilisant un différenciateur algébrique d'ordre non minimal et montre que l'on arrive à bien estimer les défauts.

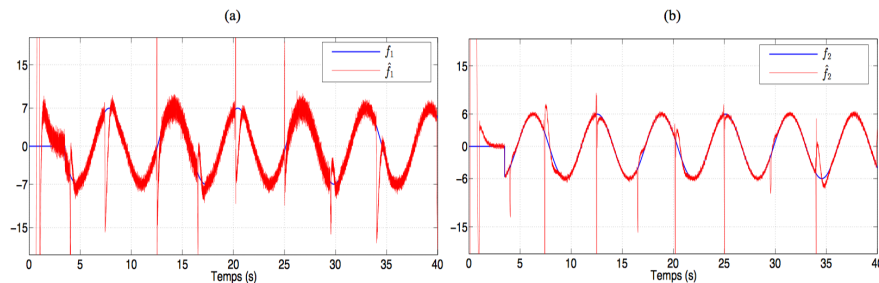


FIGURE 2.14 – Estimation du défauts : (a) : défaut f_1 et son estimation \hat{f}_1 , (b) : défaut f_2 et son estimation \hat{f}_2 .

2.5 Travaux à caractère applicatif

L'objectif de cette section est d'exposer quelques aspects applicatifs de mes travaux de recherche. En effet, l'applicabilité et l'implémentabilité des méthodes et des algorithmes que l'on développe ont, toujours, été au centre de mes intérêts. Ainsi, en plus de quelques applications "anecdotique" concernant l'identification d'une machine de distribution de médicaments [RI-7] et la surveillance d'un réacteur nucléaire [RI-4]), mes contributions à moyen et long terme concernent principalement la sûreté et la sécurité des systèmes de transports et la coopération entre systèmes hétérogènes.

2.5.1 Surveillance du Trafic routier

Mes activités dans le cadre des systèmes de transport portent sur la modélisation et la surveillance du trafic routier, en utilisant les outils de l'automatique. C'est dans ce cadre que j'ai co-encadré la thèse CIFRE de M. Hemour et la thèse de A. Zeroual. Cette dernière a été financée par un projet Hubert Curien Franco-Algérien, dont je suis le porteur local.

Plus récemment et suite à ma participation à deux projets européens de déploiement de véhicules connectés, j'ai lancé, en collaboration avec M. Ayaida, une activité émergente autour de la sûreté et la sécurité de trafic routier impliquant des véhicules connectés.

Dans la suite de cette section, je présente quelques résultats obtenus dans le cadre de la thèse de A. Zeroual. Les travaux développés dans le cadre de la thèse M. Hemour ne peuvent pas être abordés, pour des raisons de confidentialité. Enfin, mes travaux, personnels et plus récents, sur les véhicules connectés feront l'objet d'une partie de mon projet de recherche qui sera exposé

Chapitre 2. Synthèse des activités de recherche

dans le dernier chapitre.

Classiquement, les flux de trafic routier sont représentés par des modèles macroscopiques faisant intervenir des équations aux dérivées partielles [97, 98]. Cependant, ces modèles non linéaires de dimension infinie restent difficilement exploitables pour des objectifs de contrôle ou de surveillance. Dès lors, nous nous sommes intéressés à modéliser l'évolution du trafic par un système linéaire à commutation. L'idée principale de cette approche est de considérer trois tronçons successifs et d'écrire un modèle linéaire pour chacun des états (fluide et congestionné) d'un tronçon, en fonction de l'état des tronçons en amont et en aval [RI-3]. La validation expérimentale de ce modèle ainsi que quelques résultats d'estimation et de surveillance sont exposés ci-dessous [RI-1, RI-2].

2.5.2 Résultats de validation

La Figure 2.15 présente la section qui a servi de zone-test pour la validation du modèle que l'on a proposé. Cette section d'autoroute californienne est d'une longueur de 3 Km. Elle possède quatre voies, une rampe d'accès et une rampe de sortie (Figure 2.16).

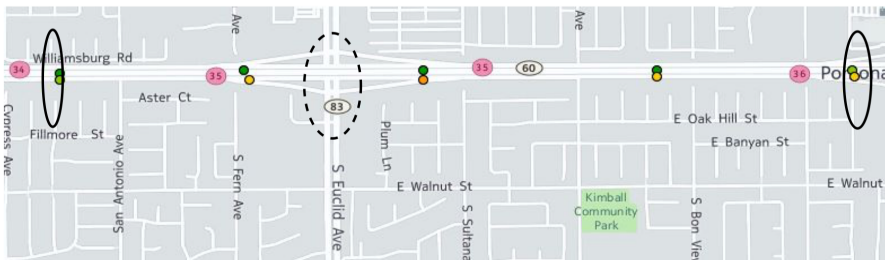


FIGURE 2.15 – Position du tronçon considéré sur la carte des autoroutes de la Californie

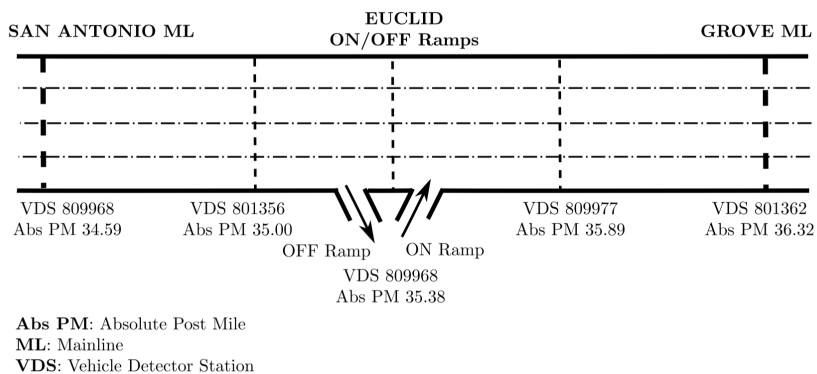
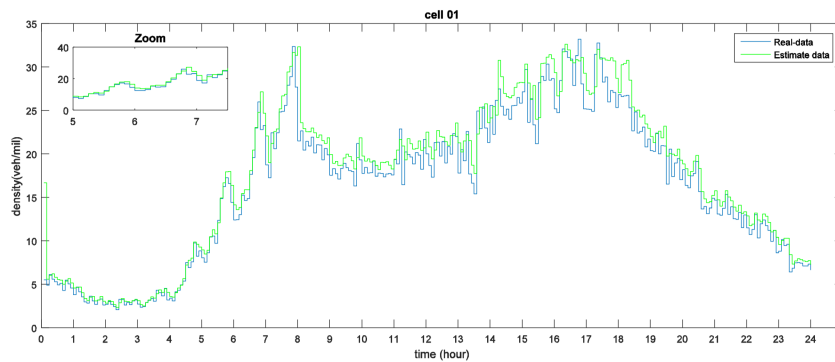


FIGURE 2.16 – Architecture de la zone de test

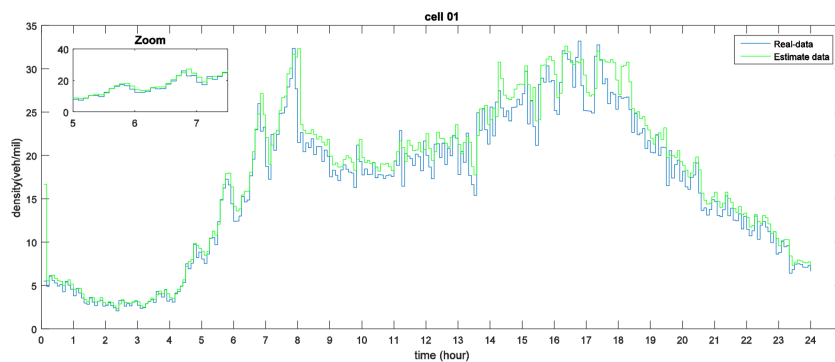
Calibrage et validation du modèle

Le calibrage est une étape primordiale à la mise en œuvre d'un modèle de trafic. Il consiste à identifier les paramètres caractéristiques du modèle à partir des données réelles. Ces dernières sont, dans notre cas, issues du système de mesure de performance (Performance Measurement System PeMS), qui recueille les informations fournies par 25000 détecteurs.

La Figure 2.17 présente un exemple de résultats que l'on a obtenus. Cette figure correspond aux données d'une journée complète. Elle indique la densité (nombre de véhicules par km) mesurée avec un pas d'échantillonnage de 5 minutes et celle fournie par le modèle. La comparaison entre les deux courbes montre que le modèle suit bien les données réelles.



(a) Cellule 2



(b) Cellule 3

FIGURE 2.17 – Validation du modèle

Détection de congestion

Suite à la modélisation du trafic, nous nous sommes intéressés à la détection des congestions. Pour ce faire, nous avons généré des résidus correspondant à la différence entre les sorties d'un observateur synthétisé pour l'état complètement fluide et les données réelles. Différents scénarios ont été testés et ont montré l'efficacité de cette approche. À titre d'exemple, les Figures 2.18 et 2.19 présentent respectivement les résultats de détection d'une congestion intermittente simulée entre les échantillons 2500 et 3000 et une congestion graduelle à partir de l'échantillon 3000.

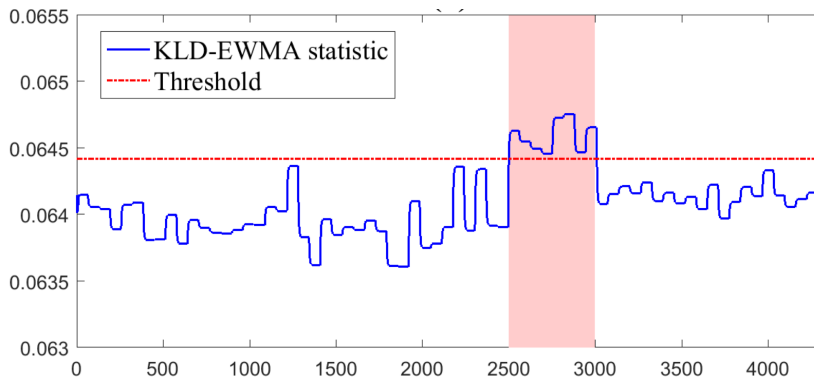


FIGURE 2.18 – Détection d'une congestion intermittente

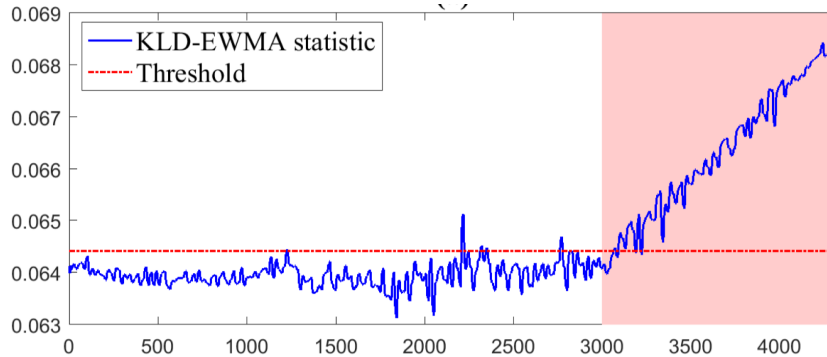


FIGURE 2.19 – Détection d'une congestion graduelle

2.5.3 TalkRoBots : quand des systèmes hétérogènes communiquent

Suite aux premiers travaux que nous avons développés dans le cadre du projet SUCRÉ, dont je suis porteur, j'ai pu constater les difficultés d'implantation d'algorithmes de coopération entre des robots hétérogènes. Les échanges que j'ai eu avec quelques acteurs du terrain et l'analyse des statistiques récentes concernant l'industrie 4.0 (Figure 2.20) ont renforcé ma conviction, quant à la nécessité de développer des outils de communication et de collaboration qui soient le plus génériques possible.

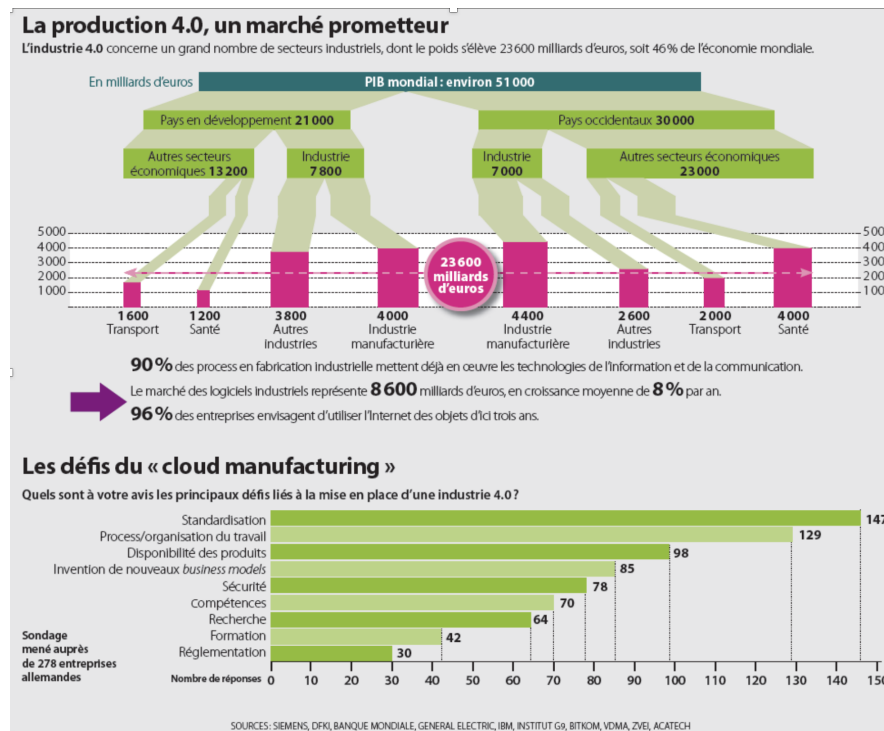


FIGURE 2.20 – Le marché de la production 4.0 (Source : Technologie 193)

C'est dans ce cadre que j'ai déposé, avec M. Ayaida et F. Valentin, un projet de recherche et de développement à la SATT Nord (Société d'Accélération du Transfert de Technologies). Ce projet nommé TalkRoBots, porte sur la communication et l'interopérabilité entre des robots hétérogènes et l'IIoT (Internet industriel des Objets). Une première enveloppe de 30 K€ a été, dans un premier temps, débloquée afin de finaliser l'analyse économique, l'étude de brevetabilité et la stratégie de valorisation. À l'issue de cette étude, le comité d'investissement nous a attribué un financement de 125 K€ pour développer un premier démonstrateur et de déposer un brevet [B-1]. Par ailleurs, avec l'appui industriel du groupe Fives Conveying et de DUGUIT Technologies, nous avons obtenu, en juillet 2018, un financement de 215 K€ pour une dernière phase, de deux ans, visant la réalisation d'un prototype industriel.

Il est à noter que, pour des contraintes liées aux conditions de brevetabilité, cette partie n'a pas encore fait l'objet d'une publication scientifique. Ainsi, j'ai fait ici le choix de donner quelques détails techniques permettant au lecteur de mieux appréhender nos contributions.

L'affectation et la réalisation des tâches coopératives par des robots hétérogènes est l'un des challenges de l'Industrie 4.0. Cependant, la communication entre robots hétérogènes n'est possible que, partiellement, via des interfaces matérielles spécifiques. Le problème d'interopérabilité et de communication directe entre robots reste posé. Il se complexifie davantage lorsqu'il s'agit de

Chapitre 2. Synthèse des activités de recherche

systèmes mettant en œuvre des robots et des objets connectés, comme des capteurs équipés d'un moyen de communication sans fil.

Dans le but de pallier à ce manque d'interopérabilité et lever le verrou de l'hétérogénéité matérielle et logicielle associés à la communication multi-robots que nous avons développé "la technologie TalkRoBots". Cette dernière correspond à une couche d'abstraction de la partie matérielle et du systèmes d'exploitation éventuellement implémenté dans les robots, via l'intégration d'une couche intergicielle modulaire opérant sous la forme d'un tunnel communiquant. Ce tunnel appelé "ConnecToBots" fédère l'ensemble des données issues des capteurs et composants intégrés aux robots, ainsi que l'ensemble des données fournis par les objets connectés, les clients mobiles, etc.

Une fois les données récupérées par le tunnel de communication ConnecToBots, la technologie concède un échange facile de ces données entre des objets et des robots hétérogènes. Ces informations permettent ainsi de bénéficier des différentes aptitudes et des données associées aux robots d'une flotte pour fédérer et optimiser les moyens de l'exploitation.

Aperçu sur l'architecture de TalkRoBots

L'architecture intergicielle de communication qui a été conçue est représentée en Figure 2.21.

L'innovation consiste ici en la proposition d'une couche logicielle (middleware) permettant d'une part de connecter les robots hétérogènes d'une flotte, et d'autre part d'interconnecter plusieurs flottes de robots en gestion autonome et collaborative. Cette couche de communication assure également l'échange d'informations issues des différents capteurs et actionneurs externes, tout en considérant les capteurs natifs.

La solution présentée autorise également une commutation automatique entre plusieurs réseaux de communication sans fil (Wifi, RFID, 3/4G, Bluetooth, ZigBee, satellite, etc.) tout en garantissant la transmission des informations via un mécanisme avancé de synchronisation en mode connecté / déconnecté pour suppléer une défaillance (ou une non couverture) d'un réseau.

La technologie TalkRoBots propose également une passerelle (gateway intégrée au middleware) entre certains systèmes robotiques (propriétaires et ouverts) et le bus de communication TalkRoBots (ConnecToBots) afin de relier les différents robots entre eux comme indiqué dans la figure 2. Ainsi, les robots peuvent collaborer facilement avec des liens ad hoc. La solution permet de relier les robots au Cloud pour les contrôler directement ou bien organiser facilement la distribution des tâches à réaliser.

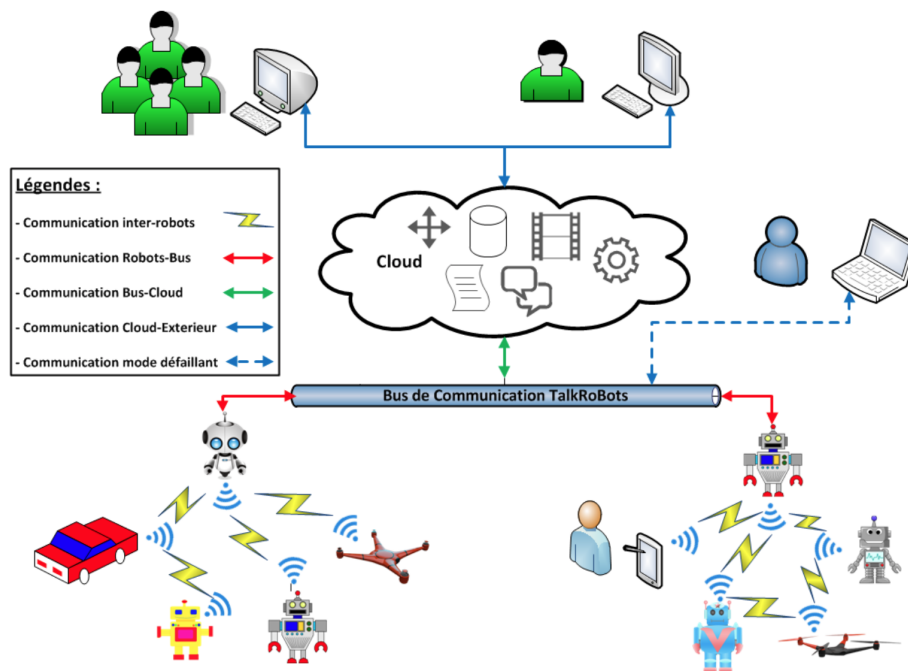


FIGURE 2.21 – Architecture TalkRoBots)

D'une façon sommaire, les différents niveaux nécessaires à l'implémentation du système proposé sont génériques et correspondent aux points suivants :

- Framework natif : Il fait partie du système d'exploitation hôte (Linux, Windows).
- Système d'exploitation robotique : Il dépend de la nature du robot. Il peut correspondre à un système ouvert ou propriétaire
- Middleware TalkRoBots (couche 1) : Elle correspond à un service développé selon un processus garantissant la reproductibilité des tâches indépendamment de l'OS robotique. Cette couche a pour objectif de récupérer des informations nécessaires à l'exécution d'une tâche et les transformer dans un format prédéfini afin de les mettre à disposition des services de la deuxième couche du middleware, via le bus de communication ConnecToBots.
- Bus de communication ConnecToBots : C'est le bus qui permet d'acheminer les données des robots ainsi que les données des capteurs entre les éléments de la flotte.
- Middleware TalkRoBots (couche 2) : C'est la couche qui utilisera les données échangées pour le partage et l'ordonnancement des tâches en fonction de la mission. Cette couche fera l'objet d'un développement ultérieur (phase 2 du projet).
- Couche applicative robotique : Elle permet la visualisation des données et de l'état d'avancement de la mission en local ou à distance ainsi que la configuration des équipements de la flotte.

Chapitre 2. Synthèse des activités de recherche

La couche 1 assure la transmission des messages en communiquant à la fois avec l'interface web et les packages TalkRoBots qui seront installés et paramétrés sur les robots. C'est également au niveau de cette couche que le middleware est couplé avec le bus de communication ConneCToBots pour permettre l'ajout et la gestion dynamique de périphériques externes (non gérés nativement par l'OS robotique). La configuration de cette couche est générique et se base sur un fichier JSON² définissant un certain nombre de paramètres dont : l'adresse IP, Port d'écoute externe/interne (Port sur lequel le middleware écoute les messages externes/interne), etc.

Par ailleurs, la communication entre la couche 1 du middleware et le robot se fait via une connexion TCP. Les briques de la couche 1 sont connectées entre elles via un routeur communiquant en UDP. Lorsqu'une information (données + destinataire) parvient au middleware, celui-ci se charge de la restructurer sous la forme d'un message compréhensible. C'est cette information formatée qui transitera sur le réseau. Quant à l'échange de messages, il respecte une structure objet prédéfinie au sein du middleware. Cette structure permet de regrouper les différentes informations et données nécessaires au transport d'informations (ou commandes) entre les robots.

Notons ici que les messages sont échangés, après sérialisation, au format JSON afin d'assurer de l'interopérabilité et de faciliter le stockage des informations à posteriori. D'un point de vue de la sécurité, une signature cryptographique, à partir d'une clé interne (au sein du code), est ajoutée lors de l'envoi du message assurant ainsi l'intégrité de la chaîne JSON.

Lorsque la connexion entre un robot et le middleware s'effectue, un message est envoyé au module routeur pour enregistrer le couple Adresse IP / Port via lesquels le robot est accessible, en l'associant au nom du robot. On crée ainsi une table de routage sous la forme « nom du robot ! AdresseIP :Port ». C'est cette table dont se servira le routeur pour rediriger correctement les messages. Ainsi, un robot n'a qu'à connaître le nom du robot auquel il veut envoyer un message. Lorsque le routeur est coupé, un message est envoyé à tous les robots enregistrés pour les interrompre, le routeur ne pouvant plus assurer la transmission des futurs messages.

2. JavaScript Object Notation

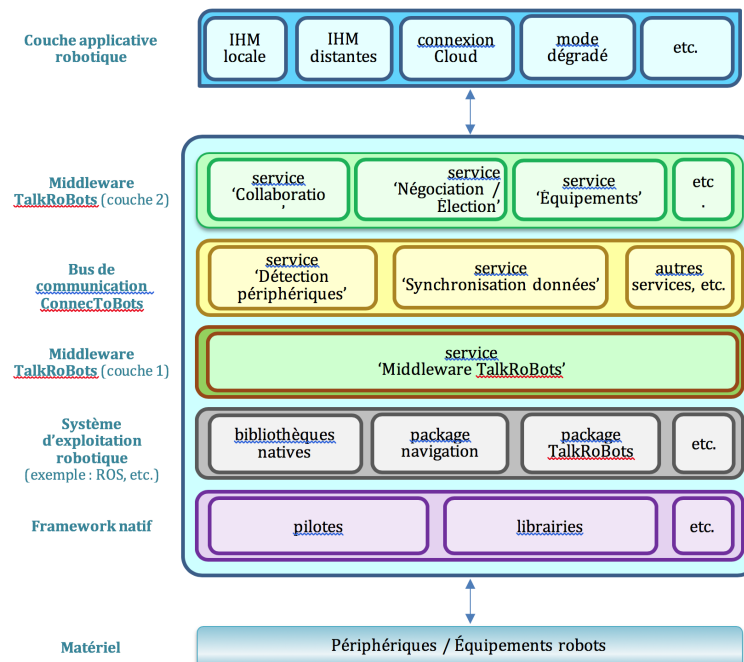


FIGURE 2.22 – Principe d'une communication inter-robots

2.6 Conclusion

L'écriture de ce chapitre coïncide avec la fin du temps de séjour dans le mode initial de ma trajectoire de recherche ! Des estimateurs ont été synthétisés, des perturbations ont été rejetés, une stabilité asymptotique a été atteinte, quelques défauts ont été détectés et identifiés, une loi de reconfiguration est trouvée. Elle a d'ores et déjà permis une commutation lisse vers un mode successeur ! Fort heureusement, l'espace d'état de ce dernier partage une large partie avec celui que j'ai déjà visité lors du séjour dans le mode initial.

3 Bilan et projet scientifique

3.1 Préambule

Ce chapitre est organisé en deux parties. La première dégage quelques perspectives de mes travaux précédents et qui sont en lien avec mon projet de recherche. La deuxième expose mes orientations, à court et moyen terme. Cette partie est complétée par quelques détails techniques et un positionnement bibliographique que je présente en annexe.

3.2 Bilan et perspectives

Au long de ce manuscrit, j'ai exposé une partie de mes activités en tant que maître de conférences à l'Université de Reims Champagne-Ardenne. La rédaction de cette HDR a été l'occasion de retracer quelques points de ma trajectoire professionnelle aussi bien en termes d'enseignement et de recherche, qu'en termes de prises de responsabilités scientifiques et administratives.

Pour ce qui est de l'enseignement, je suis responsable du secteur « Robotique » de la filière d'Ingénieur A2I et membre du conseil de perfectionnement du Master EEAI de l'URCA. Ceci me permet, d'une part, de définir les contenus des enseignements et, d'autre part, de participer à la prise de décisions relatives à la formation des étudiants sur des métiers d'avenir et en lien avec mes activités de recherche.

Par ailleurs, je me suis impliqué dans le renouvellement de l'ancienne maquette d'enseignement, essentiellement orientée, système de production et systèmes embarqués. Ceci s'est traduit par la création et la prise de la responsabilité du parcours « Ingénieries de systèmes robotisés » du Master EEAI, qui a évolué vers la filière d'Ingénieur A2I. Mon investissement en enseignement se concrétise aussi par la négociation et l'achat de matériels pédagogiques ainsi que par le montage de travaux pratiques.

Chapitre 3. Bilan et projet scientifique

Je me suis également impliqué dans la vie de l'université en tant qu'élu à l'école doctorale Sciences Technologie Santé de l'URCA et membre de deux de ses commissions (recrutement et relations internationales). Cela m'a permis de participer à la sélection de nos futurs Docteurs, d'exprimer mes points de vue sur des sujets en lien avec la formation par la recherche et d'avoir une vision plus large sur le fonctionnement des instances de l'université.

Concernant la prise de responsabilité et la vie du laboratoire, les collègues m'ont accordé leur confiance en m'élisant sur deux mandats successifs au conseil du CReSTIC. Plus récemment, j'ai été nommé responsable de l'axe transversal "Industrie 4.0" du laboratoire. L'objectif de cette nouvelle mission est de développer une activités de recherche fédératrices entre les équipes des deux départements du CReSTIC, en cohérence avec la politique scientifique de l'unité et les orientations stratégiques de l'établissement, liées au contexte local, régional et national.

Sur le plan national et international, j'assure des missions d'expertise de projets et je suis membre de l'IPC de plusieurs conférences. J'ai été notamment membre du comité d'organisation de deux conférences nationales, de deux conférences internationales et vice-président du Comité National d'Organisation de la conférence ICONS 2016.

En ce qui concerne la responsabilité de projets de recherche, j'ai entamé ma carrière par des participations actives dans des projets comme MOSYP et COSMOS. Puis, je me suis naturellement orienté vers la prise de responsabilité et le montage de projets académiques et de transfert technologique. Ainsi, j'ai réussi à lever plus que 700 K€ de fonds pour le financement de mes recherches. À cela, s'ajoutent les subventions obtenues pour le financement des thésards sur des sujets concurrentiels (deux bourses du gouvernement vietnamien, une allocation MENSER, etc.).

Le développement de collaborations nationales et internationales se traduit, dans mon cas, par la participation à des projets de recherche impliquant plusieurs laboratoires français, l'accueil d'étudiants étrangers, la responsabilité de projet de type PHC et la publication d'articles avec des universités étrangères.

En ce qui concerne la formation par la recherche, je me suis employé à m'impliquer activement dans l'encadrement des doctorants. Les thèses que j'ai co-encadrées ont toutes donné lieu à des publications et elles ont été soutenues en 40 mois, en moyenne. Aussi, j'ai toujours veillé à l'insertion de mes doctorants, avec lesquelles je garde et j'entretiens, dans la mesure du possible, des relations professionnelles et amicales. Mes anciens doctorants ont, majoritairement, demandé et obtenu leur qualification et se sont tous orientés vers l'enseignement et/ou la recherche.

Quant à l'apport de mes travaux de recherche, il réside dans le développement de méthodologies et d'algorithmes qui contribuent à l'amélioration de la sûreté et la sécurité des systèmes hybrides. Ceci inclut des méthodes visant à modéliser et à comprendre l'évolution de cette classe de

systèmes, et des algorithmes permettant de détecter et d'estimer les anomalies pouvant survenir. Quant à l'originalité de mes travaux, elle se situe, parfois, dans les résultats eux-mêmes et, d'autres, dans l'approche ou l'outil que l'on a utilisé pour étudier le problème.

Il est évident que le chapitre, concernant mes travaux de recherche, n'est pas encore complètement écrit. Des hypothèses peuvent être éventuellement levées, au détriment d'autres, quelques résultats sont encore perfectibles, etc. Les pistes à explorer sont diverses. Celles qui sont, à mon avis, réalisables, à court et moyen terme, peuvent être synthétisées ci-dessous :

- Les procédures de diagnostic à base d'observateurs que nous avons proposées, considèrent bien les problèmes de robustesse aux bruits et aux entrées inconnues. Mais, elles n'intègrent aucune contrainte sur le temps de convergence. Or, certains systèmes physiques intrinsèquement hybrides, comme les convertisseurs statiques, sont caractérisés par des temps de séjours très petits. Une adaptation tenant compte des contraintes de convergence en temps fini est nécessaire pour ce type de système. Celle-ci peut se faire en exploitant, par exemple, les nouveaux résultats sur l'estimation en temps fini des systèmes de commutation [99].
- Un autre problème, plus difficile, concerne l'observabilité des modes. En effet, nos contributions ainsi que la majorité des travaux existants supposent que le système à commutation est caractérisé par des modes observables. Or, même si cette hypothèse facilite la synthèse, elle demeure, d'une part, non nécessaire et, d'autre part, restrictive pour certaines applications. Des travaux récents comme ceux de T. Tanwani, peuvent alimenter les réflexions sur cette piste [100].
- En ce qui concerne l'analyse structurelle, les travaux que nous avons développés, peuvent être étendus dans un premier temps à la détermination des conditions d'existence de séquences de commutations garantissant l'observabilité de l'état et des entrées inconnues. De plus, lorsque de telles séquences n'existeraient pas, il conviendrait de déterminer quelle est la partie de l'état ou des entrées inconnues qui est observable. Enfin, il serait ambitieux de déterminer les conditions nécessaires et suffisantes sur le placement de capteurs permettant le recouvrement de l'observabilité.

Ces perspectives peuvent m'occuper encore pendant quelques années. Cependant, je m'emploierai à les développer, ou au moins en partie, dans le cadre de mon projet de recherche à plus long terme. Il ne s'agit nullement d'une procrastination ! Mais, plutôt d'un pragmatisme tenant compte, d'une part de mes compétences et, d'autre part, de la stratégie nationale de la recherche (SNR), des challenges de l'ANR et plus globalement des futurs appels à projets au niveau de

l'Europe. En effet, les enjeux sociétaux actuels et les avancées dans les TIC¹ sont en train de reconfigurer le paysage de la recherche ainsi que les opportunités de financement. L'automaticien, apprenti, que je suis ne peut plus ignorer l'émergence des systèmes cyber-physiques dont les systèmes multi-agents (SMA), où les "sous-systèmes" physiques sont inter-connectés par un réseau de communication. L'optimisation et le contrôle de ces systèmes répartis dans l'espace (robots, réseaux d'énergie, véhicules, etc.) nécessite de nouvelles approches garantissant un fonctionnement robuste et stable, même en cas de défaillance d'un sous-système. *Ainsi, dans la continuité de ce que j'ai déjà entrepris, j'envisage d'orienter mes efforts vers la sûreté et la sécurité des SMA.* Ceci me permettra de préserver ma recherche fondamentale et de continuer à développer des aspects applicatifs, qui se nourrissent de la pluridisciplinarité et la favorise. Mes objectifs à moyen et long terme sont :

- la synthèse de nouvelles méthodes d'estimation distribuée
- la conception de nouvelles procédures distribuées de diagnostic et de détection d'attaques
- l'évaluation et la validation des approches développées sur des systèmes multi-robots et des systèmes de transport

Loin de moi la prétention de vouloir solutionner l'ensemble des verrous liés à ces problématiques. Néanmoins, j'espère pouvoir être, à moyen terme, un catalyseur dans ce domaine. Pour ce faire, j'ai déjà lancé deux thèses sur les systèmes multi-agents, qui possèdent plusieurs propriétés communes avec les systèmes cyber-physiques. Par ailleurs, j'ai engagé une procédure réfléchie d'achat d'équipement dans le but de monter une plateforme, qui servira pour le test et la validation de nos algorithmes (ou ceux d'autres collègues) et qui pourra à moyen terme devenir notre vitrine technologique. Notons qu'il s'agit ici de matériel, que nous avons acquis grâce aux projets SUCRÉ et TalkRobots, dont je suis porteur et plus récemment le projet FFCA, dont je suis porteur de la partie "systèmes cyber-physiques et robotiques". Enfin, ces objectifs sont en parfaite concordance avec l'axe transversal "Industrie 4.0", que j'anime au sein du laboratoire.

3.3 Projet de recherche

Les principales directions de recherche des quelques années à venir sont exposées dans les trois sections ci-dessous. Elles s'appuient naturellement sur les connaissances acquises sur les différents points que j'ai abordés jusqu'à présent. Cette structuration, a été choisie pour des fins de présentation et ne correspond en aucun cas à des étapes ou des axes de recherches.

1. Technologies de l'information et de la communication

3.3.1 Diagnostic Distribué des Systèmes Multi-Agents

Un Système Multi-Agents (SMA) est un système composé d'un ensemble d'entités ou d'agents interagissant dans le but d'exécuter certaines tâches [101]. Du point de vu des systèmes hybrides, il est possible de classer les SMA en deux catégories : les SMA ayant une topologie de communication fixe et les SMA avec une topologie de communication qui change avec le temps. Le problème de diagnostic distribué des SMA avec topologie fixe a fait l'objet de plusieurs travaux durant ces dernières années. Cependant, le cas des topologies variables n'a été considéré que très récemment [102] et il reste encore ouvert.

Les travaux que nous avons entamés dans le cadre de la thèse de T. Q. Nguyen ont posé les premiers jalons d'une approche de diagnostic distribué. La direction de recherche que nous avons explorée se base sur l'idée que l'on dispose d'un SMA où certains agents possèdent plus de capacité de calcul que les autres. Ces agents doivent surveiller le système en détectant non seulement les défauts qui les affectent, mais aussi ceux affectant les voisins auxquelles ils sont connectés.

Pour étudier ce problème, nous avons défini un modèle virtuel augmenté correspondant à chacun des agents de surveillance [CI-3]. La dynamique du SMA, composé de l'agent de surveillance et ceux aux quels il est connecté, a été ensuite réécrite sous la forme d'un système à commutation impulsif. Un observateur hybride a été ainsi synthétisé pour détecter les défauts.

Ce premier travail se poursuit actuellement en s'intéressant à l'estimation des défauts. L'un des verrous qui nous mobilise, en cette période, est le découplage des défauts au niveau du modèle virtuel. Ce problème est loin d'être trivial car les estimations sont basées sur les sorties relatives et les méthodes habituelles de découplage seraient complètement inadaptés. Une dernière perspective, à court terme, serait d'étendre notre étude, qui a portée sur les défauts capteurs, à la détection et à l'estimation des défauts actionneur et d'y intégrer des algorithmes de consensus ou de formation plus complexes. Les autres perspectives, à moyen terme, de ce travail rejoignent facilement une partie de ceux que j'ai déjà mentionné dans la partie perspectives, d'où encore le lien entre mes travaux précédents et mes objectifs actuels.

Enfin, les études que nous avons commencées, peuvent amener à de nouvelles questions ou permettre de croire en la possibilité de s'atteler à la résolution de nouveaux problèmes. A titre d'exemple, nos travaux supposent que la dimension du vecteur d'état est la même pour l'ensemble des agents. Or, si l'on considère le problème de coopération entre des agents hétérogènes, représentant par exemple différents type de robots, cette hypothèse doit être levée. Ceci se traduirait par des changements dans la dimension du vecteur d'état. Un problème qui peut être abordé en réécrivant le modèle sous la forme d'un système singulier à commutation. Mais, ceci nécessitera une collaboration avec des collègues qui maîtrisent mieux les outils nécessaires à

l'étude de ce type de système.

Notons qu'une partie de ces problématiques a servi de trame de fond pour le projet ANR "DREAMAN"², que j'ai porté en 2017. Ce projet, proposé en collaboration avec le LAMIH, est orienté Industrie 4.0 et porte sur la surveillance distribuée des systèmes de fabrication flexible basés sur les AGVs³. Il n'a malheureusement pas passé les étapes de sélection malgré les retours globalement positifs des experts (deux notes "A" et une note "B")

3.3.2 Sureté et sécurité des systèmes coopératifs

Cette orientation concernant la coopération entre plusieurs groupes "clusters" d'agents, a fait l'objet d'une première étude prospective effectuée dans le cadre du travail postdoctoral de M. C. Bragagnolo et fait actuellement l'objet de la thèse de T. Pham.

En effet, il est bien connu que la topologie de communication entre les agents joue un rôle crucial pour atteindre un consensus de groupe. Ainsi, l'un des premiers objectifs de recherche est d'identifier les conditions nécessaires et/ou suffisantes pour atteindre un consensus. Par ailleurs, du point de vue du contrôle, il est souvent question d'analyser la valeur du consensus et de synthétiser des contrôleurs permettant d'assurer le consensus. Aujourd'hui, bien que le problème de consensus d'un groupe d'agents soit relativement mature (au moins pour le cas des systèmes linéaires), l'étude de la coopération dans des systèmes mettant en jeu plusieurs groupes n'est qu'à ses débuts.

Nos travaux considèrent un ensemble d'agents partitionné en plusieurs clusters, où seuls les leaders peuvent interagir et réinitialiser leurs états à des instants particuliers. Ce problème peut correspondre à plusieurs cas pratiques, comme par exemple, la coordination de groupes d'AGV. Ainsi, en s'inspirant d'une formulation de ce type de problème dans le cadre des systèmes à commutations impulsives, nous envisageons d'aborder deux volets complémentaires. Le premier concerne l'étude du consensus et le deuxième porte sur la détection des attaques affectant le réseau de communication.

Nos premiers travaux ont porté sur la caractérisation de la valeur de consensus vers laquelle ce type de SMA doit converger. Notons ici qu'au mieux de nos connaissances, la caractérisation de cette valeur n'a été abordée que pour des SMA dont les agents possèdent une dynamique de type $\dot{x} = x$ et que cette étape est primordiale à toute approche de synthèse. Un deuxième travail en cours de finalisation porte sur la synthèse de contrôleurs garantissant, quand c'est possible, un consensus. Une fois cette étape terminée, nous aborderons le problème de détection d'attaques. Ce travail se fera en complément et dans la continuité de l'approche de détection, que l'on a développé avec M. C. Bragagnolo et dont un aperçu technique, en phase de publication, est donné

2. Distributed Monitoring of AGVs-based flexible manufacturing Systems

3. Autonomous Guided Vehicles

en annexe A.

A moyen terme, deux extensions de ces premiers travaux sont envisageables. En effet, l'approche que l'on a proposé fait appel à un banc d'observateurs pour la surveillance de chaque lien de communication. Une alternative serait d'étudier la faisabilité et la complexité de la synthèse d'un seul banc d'observateurs au niveau de chaque agent. Ceci peut éventuellement se faire en optant, par exemple, pour un modèle virtuel augmenté. Une autre limite concerne la convergence asymptotique des observateurs. En effet, étant donné qu'un attaquant a toujours un objectif malveillant, il serait plus adéquat d'envisager une convergence en temps fini afin de limiter les éventuels dégâts .

3.3.3 Application à la sûreté des systèmes de transport intelligents coopératifs

Les véhicules connectés et autonomes ont un grand potentiel pour améliorer la sûreté, la sécurité et l'efficacité du trafic routier. Entre temps, le déploiement de ces technologies émergentes nécessite de nouvelles méthodologies d'étude et d'analyse. Ceci intègre des méthodes d'estimation des variables de trafic, de prédiction des congestions ainsi que des algorithmes de détection d'incidents et d'attaques. En effet, comme pour tout système cyber-physique, ces véhicules risquent d'être l'objet d'attaques dont les conséquences peuvent aller jusqu'à la perte de vies humaines.

L'état de l'art sur cette problématique indique l'existence de plusieurs contributions inspirées des approches de sécurité des systèmes informatiques. Les approches de détection à base de modèle sont quasi inexistantes. Or, le trafic routier est un phénomène que l'on arrive à modéliser via plusieurs approches dont l'approche macroscopique.

C'est pour essayer de combler ce vide que l'on a effectué, en 2017, une première étude prospective sur les apports des méthodes de surveillance à base de modèle à la détection d'attaques dans les réseaux véhiculaires. Parmi toutes les attaques que l'on a identifiées, nous nous sommes focalisés sur les attaques de type Sybil. Il s'agit d'une attaque, où un véhicule malveillant arrive à créer des identités factices multiples afin de les utiliser à différentes fins : perturber le bon fonctionnement des protocoles de routage, manipuler le centre de gestion du trafic, influencer le résultat d'un vote, etc. Bien que notre approche a montré des performances de détection encourageantes, elle souffre encore de quelques limitations que l'on envisage d'améliorer à court et moyen terme. En effet, l'un des inconvénients de notre proposition réside dans le fait qu'elle n'utilise que la partie statique des modèles macroscopiques du trafic. La première extension serait d'utiliser le modèle complet et particulièrement le modèle à commutation afin d'estimer l'état du trafic et notamment la densité. La difficulté concernera la synthèse d'observateurs distribués au niveau des véhicules et les algorithmes de consensus entre ces derniers . Bien évidemment, il ne suffit pas de détecter une attaque mais, il faut localiser l'attaquant afin de l'isoler. Ceci s'effectuera par un consensus

sur l'estimation des positions. Arrivera après, une extension à d'autres types d'attaques.

Notons que les directions de recherche identifiées dans cette partie ont fait l'objet d'un projet PHC Utique que l'on a proposé cette année avec des collègues de SUP'COM⁴ en Tunisie. Ce projet est classé en liste d'attente pour un financement éventuel en 2019.

3.4 Conclusion

Ce paragraphe vient clore ce mémoire, dans lequel a été présenté mon parcours professionnel, une partie de mes activités en lien avec la recherche et un projet qui se nourrit aussi bien de mes réussites que de mes échecs.

L'écriture de ce projet n'est que le début d'un "chantier", où tout reste à faire. Il me semble, que les problématiques dégagées représentent un ensemble cohérent et que des collaborations intéressantes sont envisageables aussi bien avec des doctorants que des équipes de recherche en automatique et en informatique. Certaines de ces problématiques poseront de nouvelles questions, d'autres seraient peut-être (ou sont déjà) résolues par des collègues. Toutefois, je pense que la sûreté et la sécurité des systèmes resteront au centre de mes préoccupations à moyen et à long terme.

4. École supérieure des communications de Tunis

A Vers la sûreté et la sécurité des Systèmes Multi-Agents

A.1 Introduction

We live in a world where more and more systems are connected to networks due to several possible reasons, such as division of tasks, disperse the computational load over several machines, geographical inaccessibility or long distances between sensors and control/plant. However, these connections lead to several possible security issues as the signal between nodes in the networks can be intercepted or modified by a malicious third party. We refer to these systems as Cyber-Physical Systems (CPS) [103] and to be more precise, one can define CPS as systems that integrates physical processes, computational resources and communication capabilities. Cyber-physical systems have only recently been studied, although cases of attacks have already been reported. Worth mentions are : the Maroochy Water breach, StuxNet virus attack, SQL Slammer worm, captured RQ-170 Sentinel US drone. While techniques to defend against attacks in the IT area are already common practice (encryption, for example) the control community has only recently started looking for solutions to these problems. While encryption makes for a good layer of defense in the information transmission of CPS it can be broken, e.g [104]. Most of the common techniques used in the control area assumes that information received is perfect and hasn't been modified., which might not be true anymore. It becomes necessary to study ways to identify and circumvent this possible malicious attacks. Several algorithms have been proposed in the area which are mainly concerned about the detection and isolation of attacks, see [105, 106].

In the context of cyber-physical systems we are concerned about the specific case of multi-agent systems. The MAS domain is flourishing, because many current engineering problems require multiple systems with local sensing and actions, which have to collaborate in order to accomplish a global goal. One example is in the area of sensor networks, where nodes form a cluster and a cluster leader is selected. This leader communicates with other clusters to minimize energy consumption [107, 108]. Issues related to communication between different devices in the

Annexe A. Vers la sûreté et la sécurité des Systèmes Multi-Agents

network with minimal network use, while ensuring a desired level of performance, are solved by using time and event triggered controllers.

As any other type of cyber-physical systems multi-agent systems are highly susceptible to attacks. Since in most cases the communication of a set of agents (e.g. mobile robots) happens via wireless man-in-the-middle type of attacks are quite possible. In these cases a malicious attacker inject wrong information into the network, driving the final consensus within a set objective of the attacker (e.g. set a new position for rendezvous problems, desynchronize clocks). In reality, due to the distributed structure of the consensus algorithm, it's enough to influence a single agent to bring the whole network to an undesired state. Some results have been presented in the area, mostly focus into detection and isolation of attacks in a centralized manner [109], decentralized [110] or distributed manner [111, 112]. However, all the results consider uniquely discrete or continuous consensus, and no attention to hybrid systems is given.

In this draft we propose an attack detection algorithm and counter-attack for multi-agent systems, more specifically to the consensus algorithm with linear-impulsive agents. To achieve this goal, we propose to construct for each agent a bank of unknown input observers that will monitor the outgoing connections with each one of its neighbors. Each observer within the bank in agent i (e.g. connection from agent i to agent j) is independent of an attack occurring in that communication link, therefore agent i is capable of not only detecting but also identifying which edge of the graph is under attack.

This draft is organized as follows : in Section A.2 we present an statement of the problem to be solved, providing also an introduction to the linear-impulsive consensus algorithm that we utilize in this draft. In Section A.3 we present the two proposed types of observers : the first one applies a distributed algorithm where only the values of its neighbors are needed to estimate the values of the network. The second one takes information from the leaders during the reset phase, losing the distributed property but improving false positives in the isolation of faults. We provide LMI-sufficient conditions to prove that the observers are asymptotically stable. In Section A.4 we present the algorithm that decides if a communication channel has been compromised or not, as well as the implementation of the algorithm. Finally, Section A.5 presents some simulations for both types of observers, demonstrating the tradeoffs between a purely distributed observer and a decentralized one.

Notation. The following standard notation will be used throughout the draft. The sets of nonnegative integers, real and nonnegative real numbers are denoted by \mathbb{N} , \mathbb{R} and \mathbb{R}_+ , respectively. For a vector x we denote by $\|x\|$ its Euclidian norm. The transpose (pseudo-inverse) of a matrix A is denoted by A^\top (A^\dagger). Given a symmetric matrix $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, notation $A > 0$ ($A \geq 0$) means that A is positive (semi-)definite. By I_k we denote the $k \times k$ identity matrix. $\mathbb{1}_k$ and $\mathbf{0}_k$ are the column vectors of size k having all the components equal 1 and 0, respectively.

We also use $x(t_k^-) = \lim_{t \rightarrow t_k, t \leq t_k} x(t)$.

A.2 Problem formulation

In this section we formulate the problem of an attack in a network of multi-agent systems. We also present the topology of the network, a reset based topology. We start by the overall problem statement.

Problem statement : *Consider a network of agents, modeled by simple single integrator dynamics. Due to communication restrictions the network is not overall connected, instead it is separated into several clusters, or smaller networks. The connections inside each cluster happen continuously or very rapidly. Moreover, one robot of each cluster is allowed to communicate outside its cluster at discrete time instants, which we call leader. Consider also that despite encryption methods applied to the communications an attack may still happen. An attack may happen only in a continuous part of the system, and only one at a time. The goal is to design a way to detect, isolate and counter-attack a malicious attacker.*

Despite the overall outline of the problem, some additional information is needed. Therefore, we present a set of assumptions that will help better restrain the problem :

Assumption A.1. *Under the previous problem statement, assume that an attack occurs in the network. The attack happens only between non-leaders and only between two agents. Moreover, only one attack can happen at any given time.*

Assumption A.2. *Under the previous problem statement, we assume the network to be undirected. Neighboring agents may have different weights (i.e agent j has a weight to the value of agent i differently than agent i considers agent j).*

For the sake of clarity we give a simple example that illustrates this type of problem. In Figure A.1 we consider two clusters, red and blue, of agents which intend to reach a consensus. The arrows show the intended trajectory that the agents would normally reach. In Figure A.2 shows the system during an attack. The arrows now show a different trajectory than the previous one, due to attack.

A.2.1 Network topology

Following the problem statement previously presented, we consider a network of n agents described by the undirected graph $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ where the vertex set \mathcal{V} represents the set of agents and the edge set $\mathcal{E} \subset \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ represents the interactions. In the sequel, we consider that the agent set

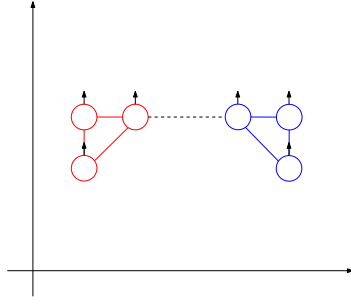


FIGURE A.1 – Normal consensus in a reset consensus network.

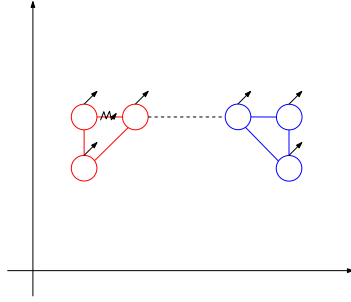


FIGURE A.2 – Change of behavior after an attack in the red subnetwork.

\mathcal{V} is partitioned in m strongly connected clusters/communities $\mathcal{C}_1, \dots, \mathcal{C}_m$ and no link between agents belonging to different communities exists. Each community possesses one particular agent called leader and denoted in the following by $l_i \in \mathcal{C}_i, \forall i \in \{1, \dots, m\}$. The set of leaders will be referred to as $\mathcal{L} = \{l_1, \dots, l_m\}$. At specific time instants $t_k, k \geq 1$, called reset times, the leaders interact between them following a predefined interaction map $\mathcal{E}_l \subset \mathcal{L} \times \mathcal{L}$. We also suppose that $\mathcal{G}_l = (\mathcal{L}, \mathcal{E}_l)$ is strongly connected. The rest of the agents will be called followers and denoted by f_j . For clarity we consider that the leader is the first element of its community :

$$\mathcal{C}_i = \{l_i, f_{m_{i-1}+2}, \dots, f_{m_i}\}, \forall i \in \{1, \dots, m\} \quad (\text{A.1})$$

where $m_0 = 0, m_m = n$ and the cardinality of \mathcal{C}_i is given by

$$|\mathcal{C}_i| \triangleq n_i = m_i - m_{i-1}, \forall i \geq 1.$$

Example A.3. To illustrate the notation (A.1) we present a simple network of 6 agents partitioned in 2 clusters having 3 elements. Then $\mathcal{C}_1 = \{l_1, f_2, f_3\}$ and $\mathcal{C}_2 = \{l_2, f_5, f_6\}$.

Each agent will have a scalar state denoted also by l_i for the leader l_i and f_j for the follower f_j . We also introduce the vectors $x = (l_1, f_2, \dots, f_{m_1}, \dots, l_m, \dots, f_{m_m} = f_n)^\top \in \mathbb{R}^n$ and $x_l = (l_1, l_2, \dots, l_m)^\top \in \mathbb{R}^m$ collecting all the states of the agents and all the leaders' states, respectively.

We now introduce the linear reset system describing the overall network dynamics :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = -Lx(t) + Bu(t) + E_i^j f(t), & \forall t \in \mathbb{R}_+ \setminus \mathcal{T} \\ x_l(t_k^+) = P_l x_l(t_k) & \forall t_k \in \mathcal{T} \\ y_i = C_i x, & x(0) = x_0 \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

where $\mathcal{T} = \{t_k \in \mathbb{R}_+ \mid t_k < t_{k+1}, \forall k \in \mathbb{N}, t_k \text{ reset time}\}$, $L \in \mathbb{R}^{n \times n}$ is a generalized Laplacian matrix associated to the graph \mathcal{G} and $P_l \in \mathbb{R}^{m \times m}$ is a row stochastic (Perron) matrix associated to the graph $\mathcal{G}_l = (\mathcal{L}, \mathcal{E}_l)$. Moreover, $f(t) \in \mathbb{R}$ indicates an attack in an edge of graph \mathcal{G} and is equal to 0 if there is no attack and $f \neq 0$ if there is an attack. The matrix $E_i^j \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ is a matrix of zeros except for one term $E_i^j(i, 1) = -L_{j,i}$ with $(j, i) \in \mathcal{E}$, $i \neq j$. This means that only a single attack happens at a given moment. To be more precise, the entries of L and P_l satisfy the following relations :

$$\begin{cases} L_{(i,j)} = 0, \text{ if } (i, j) \notin \mathcal{E} \\ L_{(i,j)} < 0, \text{ if } (i, j) \in \mathcal{E}, i \neq j \\ L_{(i,i)} = -\sum_{j \neq i} L_{i,j}, \forall i = 1, \dots, n \end{cases}, \quad (\text{A.3})$$

$$\begin{cases} P_{l(i,j)} = 0, \text{ if } (i, j) \notin \mathcal{E}_l \\ P_{l(i,j)} > 0, \text{ if } (i, j) \in \mathcal{E}_l, i \neq j \\ \sum_{j=1}^m P_{l(i,j)} = 1, \forall i = 1, \dots, m \end{cases}. \quad (\text{A.4})$$

The values $L_{(i,j)}$ and $P_{l(i,j)}$ represent the weight of the state of the agent j in the updating process of the state of agent i when using the continuous and discrete dynamics, respectively.

In particular, L has the following block diagonal structure

$$L = \begin{pmatrix} L_1 & & \\ & \ddots & \\ & & L_m \end{pmatrix}, \quad L_i \in \mathbb{R}^{n_i} \quad (\text{A.5})$$

with $L_i \mathbb{1}_{n_i} = \mathbf{0}_{n_i}$ and $P_l \mathbb{1}_m = \mathbb{1}_m$. Due to strong connectivity of \mathcal{C}_i , $i = 1, \dots, m$ and \mathcal{G}_l , 0 is simple eigenvalue of each L_i and 1 is simple eigenvalue of P_l . We also introduce an extended stochastic matrix P_{ex} as follows :

$$P_{ex} = T^T \begin{bmatrix} P_l & 0 \\ 0 & I_{n-m} \end{bmatrix} T \quad (\text{A.6})$$

where T is the permutation matrix responsible for reordering the states of the agents. It is

noteworthy that $L\mathbb{1}_n = \mathbf{0}_n$ and $P_{ex}\mathbb{1}_n = \mathbb{1}_n$. Thus, the dynamics become :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = -Lx(t) + Bu(t) + Ef(t), & \forall t \in \mathbb{R}_+ \setminus \mathcal{T} \\ x(t_k^+) = P_{ex}x(t_k) & \forall t_k \in \mathcal{T} \\ y_i = C_i, & x(0) = x_0 \end{cases}. \quad (\text{A.7})$$

As providing proofs for the stability of this particular system is not part of the scope of this draft, we will simply assume the stability of this system. However, we point out for the interested reader the work in [113], which deals with the stability analysis of the linear-impulsive consensus algorithm previously presented. Moreover, despite the fact that the reset times in [113] are quasi-periodic, we consider in this draft periodic resets, i.e. $\mathcal{T} = \{t_k \in \mathbb{R}_+ \mid t_{k+1} - t_k = \delta\}$.

A.3 Observer-based attack detection

In the next section we will deal with the problem of attack detection in a multi-agent network. This is done by designing one observer for each edge connecting agent i to a neighboring agent j , which monitors this output communication channel between these agents. These observers are resilient to an attack happening in their respective edges and sensitive to attacks happening in other edges. With this setup we are able to isolate and even estimate an attack. For the sake of simplicity and also to avoid confusion with the observer's gain L_i^j , we will refer to the laplacian matrix L as $-A$, therefore, $A = -L$.

Before we introduce the dynamics of the observer, we need to first determine how to estimate the attack. If agent i wants to estimate an attack on the edge $\mathcal{E}(i, j)$, we can utilize the dynamics from A.7 such that :

$$\dot{y}_i(t) - C_i Ax(t) - C_i Bu(t) = C_i E_i^j f(t). \quad (\text{A.8})$$

Moreover, if we assume that $\text{rank}(C_i E_i^j) = \text{rank}(E_i^j) = k$, then there exists a matrix $M_i = (C_i E_i^j)^\dagger$ which is the pseudoinverse of $C_i E_i^j$. Finally, with estimates \hat{x} for the states of each agent and the derivative of the output of agent i , \dot{y}_i we can find an estimation of the attack the agent is suffering. Finally, we have :

$$\hat{f}(t) = M_i^j (\dot{y}_i(t) - C_i A \hat{x}(t) - C_i Bu(t)). \quad (\text{A.9})$$

With the attack estimate we can create a bank of observers where each one them is responsible for checking an edge for an attack. Two possible observers are designed and analyzed. The control input $u(t)$ exists solely as means to counter-attack the malicious attack, that means $u(t) = 0$ while

an attack is not detected and isolated and $B = E_i^j$, $u = \hat{f}(t)$ when an attack has been discovered.

A.3.1 Impulsive observer

The first proposed observer does not attenuate the impulses that happen during the time set $\mathcal{T} = \{t_k \in \mathbb{R}_+ \mid t_k < t_{k+1}\}$. Simply, it's designed so that error variable ϵ evolves in the same manner as the entire connected system during a reset, meaning $\epsilon(t_k^+) = P_{ex}\epsilon(t_k)$. This means during moments \mathcal{T} there will be impulses on the error dynamics. The advantage of this approach is the need of only information of the neighbors of an agent, making it a truly distributed method.

$$\begin{cases} \dot{z}_i^j(t) &= A_i^j z_i^j(t) + B_i^j u(t) + Y_i^j y_i^j(t), \quad \forall t \in \mathbb{R}_+ \setminus \mathcal{T} \\ z_i^j(t_k^+) &= P_{ex} z_i^j(t_k) - E_i^j M_i^j y(t_k^+) \\ &\quad + P_{ex} E_i^j M_i^j y(t_k) \quad \forall t_k \in \mathcal{T} \\ \hat{x}_i^j &= z_i^j(t) + E_i^j M_i^j y(t), \end{cases} \quad (\text{A.10})$$

where

$$\begin{aligned} A_i^j &= T_i^j A - L_i^j C_i, & B_i^j &= T_i^j B, \\ Y_i^j &= (T_i^j A - L_i^j C_i^j) E_i^j M_i^j + L_i^j, & T_i^j &= I_{n \times n} - E_i^j M_i^j C_i. \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

An Unknown Input Observer (UIO) decoupled from an attack at an edge (i, j) is defined as follows [21].

Definition A.4. Consider the dynamical system A.7 with the observer A.10. The observer is an UIO decouples from an attacked edge (i, j) if $\lim_{t \rightarrow +\infty} \|x(t) - \hat{x}_i^j(t)\| = 0$ for any attack signal $f(t)$ in the edge (i, j) .

With the observer defined as such, we can write the dynamics for the error $e_i^j(t) = x(t) - \hat{x}_i^j(t)$ as such :

$$\begin{cases} \dot{e}_i^j(t) &= (A - L_i^j C_i - E_i^j M_i^j C_i A) e, \quad \forall t \in \mathbb{R}_+ \setminus \mathcal{T} \\ e_i^j(t_k^+) &= P_{ex} e_i^j(t_k) \quad \forall t_k \in \mathcal{T} \end{cases} \quad (\text{A.12})$$

As we can see, the error dynamics do not depend on the attack signal $f(t)$. It becomes a problem of finding a suitable matrix L_i^j such that $(A - L_i^j C_i - E_i^j M_i^j C_i A)$ is stable. Moreover, we can prove that the observer A.10 To find this set of matrices L_i , a set of LMIs are solved :

Theorem A.5. Consider the system (A.2). If there exist matrices $S_{ij} = S_{ij}^\top > 0$ and H_{ij} such that

the LMIs

$$A^\top S_{ij} + S_{ij}A - C_i^\top H_{ij} - H_{ij}^\top C_i \quad (\text{A.13})$$

$$-(E_i^j M_i^j C_i A)^\top S_{ij} - S_{ij} E_i^j M_i^j C_i A < 0, \quad (\text{A.14})$$

$$\begin{bmatrix} S_{ij} & Pex^\top S_{ij} \\ S_{ij} Pex & S_{ij} \end{bmatrix} \geq 0. \quad (\text{A.15})$$

are satisfied with $L_i^j = S_{ij}^{-1} H_{ij}^\top$, the stability of the error function $e_i^j(t) = x(t) - \hat{x}_i^j$ is characterized by the Lyapunov function $V(t) = V(e_i^j(t)) = e_i^j(t)^\top S_{ij} e_i^j(t)$ satisfying $V_i^j(t_k^+) \leq V_i^j(t_k)$.

A.3.2 Reset canceling observer

While similar to the other type of observer, in this case we design the reset of the observers in such a way that $x(t_k^+) - \hat{x}(t_k^+) = x(t_k) - \hat{x}(t_k)$. Therefore, the error dynamics will be smooth during the transition $e(t_k) \rightarrow e(t_k^+)$. The advantage is that during resets the agents need additional information of agents that are not in their neighborhood (more specifically, the leaders of each subnetwork). The dynamics of these new observers are as follows :

$$\begin{cases} \dot{z}_i^j(t) = A_i^j z_i^j(t) + B_i^j u(t) + Y_i^j y_i^j(t), & \forall t \in \mathbb{R}_+ \setminus \mathcal{T} \\ z_i^j(t_k^+) = z_i^j(t_k) + T_i^j (Pex - I_{n \times n}) x(t_k) & \forall t_k \in \mathcal{T} \\ \hat{x}_i^j = z_i^j(t) + E_i^j M_i^j y(t), \end{cases} \quad (\text{A.16})$$

The values of A_i^j, B_i^j, Y_i^j and T_i^j are calculated the same way as the previous observer and therefore will be omitted. The same can be said about the error dynamics, with the exception of the reset case. Since this observer is designed so that $x(t_k^+) - \hat{x}(t_k^+) = x(t_k) - \hat{x}(t_k)$, then $e(t_k^+) = e(t_k)$. Once again, we assume the control variable $u(t)$ to be $u(t) = 0$. It becomes a problem of finding a suitable matrix L_i such that $(A - L_i^j C_i - E_i^j M_i^j C_i A)$ is stable. To find this set of matrices L_i^j , the following LMI is solved :

Theorem A.6. Consider the system (A.2). If there exist matrices $S_{ij} = S_{ij}^\top > 0$ and H_{ij} such that the LMI

$$A^\top S_{ij} + S_{ij}A - H_{ij} j^\top C_i - (E_i^j M_i^j C_i A)^\top S_{ij} C_i^\top H_{ij} \quad (\text{A.17})$$

$$-S_{ij} E_i^j M_i^j C_i A < 0. \quad (\text{A.18})$$

is satisfied with $L_i^j = S_{ij}^{-1} H_{ij}^\top$, the stability of the error function $e_i^j(t) = x(t) - \hat{x}_i^j$ is characterized by the Lyapunov function $V(t) = V(e(t)) = e(t)^\top S_{ij} e(t)$ satisfying $V(t_k^+) = V(t_k)$.

Remark A.7. We bring attention to the fact that despite equation $T_i^j(P_{ex} - I_{n \times n})x(t_k)$ showing the complete vector $x(t)$ in truth only the values of the leaders are needed during the reset times. To prove this, we bring attention to the Equation (A.6). Since P_{ex} is in fact a block diagonal matrix of P_l and I_{n-m} (rearranged by permutation matrix T), then all that remains from $P_{ex} - I_{n \times n}$ is the effect of the matrix P_l .

A.4 Implementation of the algorithm

In this next section, we present the algorithm responsible for the decision making of the correct edge that is suffering an attack and also its implementation. As each agent has an observer for each neighboring agent, even if one of them is correcting detecting an attack it is still essential to be able to decide which edge is suffering the attack. As each observer is resistant to an attack happening on their respective edge, we can make this decision by checking the residuals $\|r_i^j(t)\| = \|y_i(t) - \hat{y}_i^j(t)\|$. If an attack occurs on agent i from agent k then $\|r_i^k(t)\| < \phi_i$ while the residuals of neighboring agents of i will be greater than threshold ϕ_i , $\|r_i^j(t)\| \geq \phi_i, \forall j \neq k$. We can formalize the algorithm as such :

```

for  $j \in \mathcal{N}_i$  do
    Calculate residuals  $r_i^j(t)$ 
end for
if  $\|r_i^k(t)\| < \phi_i$  and  $\|r_i^j(t)\| \geq \phi_i, \forall j \in \mathcal{N}_i \neq k$  then
    Agent  $k$  is suffering an attack from agent  $i$ 
    Estimate the attack  $\hat{f}(t)$ 
    Counter attack by adding a signal  $u(t) = -\hat{f}(t)$  to the affected output edge.
else if  $\|r_i^j(t)\| \geq \phi_i, \forall j \in \mathcal{N}_i$  then
    An attack is occurring somewhere else in the subnetwork
else if  $\|r_i^j(t)\| < \phi_i, \forall j \in \mathcal{N}_i$  then
    No attack is occurring in this subnetwork
end if

```

Remark A.8. We solve the problem with the recursive nature of attack estimation by holding the value of $u(t)$ for a period of time $\delta_{min} \ll \delta$. In practice, this means that the algorithm will be run in a periodic manner. Therefore, a better estimation of the attack is related to a smaller period δ_{min} .

A.5 Illustrative examples

In the following we give some simulations. In the first case, we present a undirected graph where we implement the first type of bank of observers, stated in A.10. The residuals of these

observers and the attack estimation are also considered. The second case utilizes the same dynamics proposed for the first case, but with the reset canceling observer A.16. We also present the residuals and the attack estimation for this second case.

A.5.1 Example 1 : Impulsive observer

In the first example we have a network with 10 agents divided by 2 subnetworks ($n_1 = 4, n_2 = 6$). Consider the dynamics (A.2) with :

$$A = \begin{bmatrix} -6 & 1 & 2 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -4 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 1 & 0 & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -10 & 5 & 3 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & -13 & 0 & 0 & 0 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & -11 & 2 & 5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 5 & 0 & -7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 1 & 0 & 0 & -9 \end{bmatrix}, \quad (\text{A.19})$$

$$P_l = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 \\ 0.2 & 0.8 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.20})$$

with initial conditions $x(0) = (2, 5, 3, 5, 1, 2, 4, 2, 5, 3)$. While there is no attack the system behaves as an autonomous system, meaning that $u(t) = 0$ while $f(t) = 0$. Figure A.3 represents this case and consensus will be reached at the value of $x^* = 3.205$. We can see that giving nominal conditions of operation consensus will be reached. As stated previously throughout the draft, we consider a periodical reset for this system and during our simulations we use $\delta = 7.5$ as our reset for the leaders and $\delta_{min} = 0.1$ as the period for the attack detection/counter attack algorithm. We then proceed to simulate the system with an attack occurring in the time frame of $20 < t < 30$ with a constant value $f(t) = 3$. Figure A.4 shows the state of the agents when while suffering this kind of attack. As we can see, the system in Figure A.4 diverges greatly from consensus without a malicious signal, reaching a final consensus value of $x^* = 9.175$, a variation of approximately 180%.

In Figure A.5 the states of the system with counter attack enabled are presented. There still

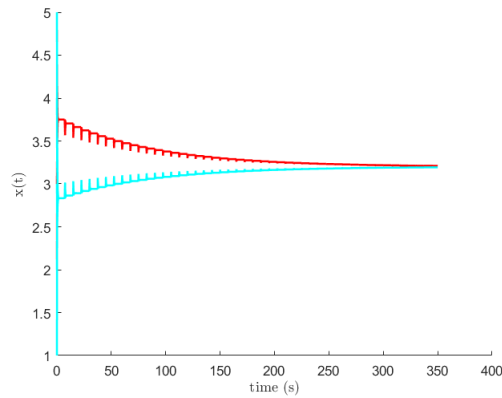


FIGURE A.3 – The state trajectories of the system while not suffering an attack.

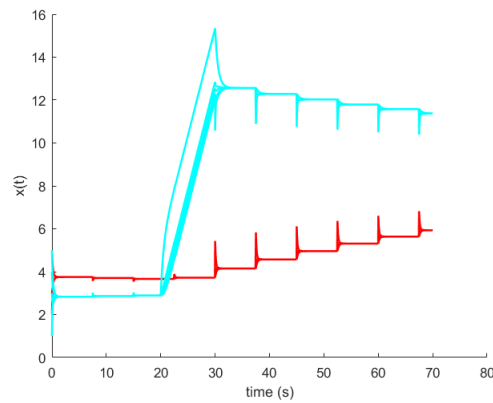


FIGURE A.4 – The state trajectories of the system suffering an attack (no counter attack).

some variation from the consensus of the first simulation in Figure A.3. In this case the consensus reached is $x^* = 3.271$, much closer to the pure autonomous system. The detection and isolation of the attack can be seen in Figure A.6. Agent 7 checks the residuals of his bank of observers and we can clearly see that the attack is occurring in the edge (7,8). As the designed observer (A.10) does not offer a reset canceling property, effects of the reset matrix P_{ex} can be seen in the residuals, which may result into false positives or false negatives in some cases.

Finally, plotted in Figure A.7 the attack estimation for edge (7,8). Some effects of the resets can be seen.

A.5.2 Example 2 : Reset canceling observer

In our Example 2, we apply the bank of observers (A.16) to the same dynamics from A.19 and A.20. In fact, all parameters remain the same except for the type of observers used. Figure

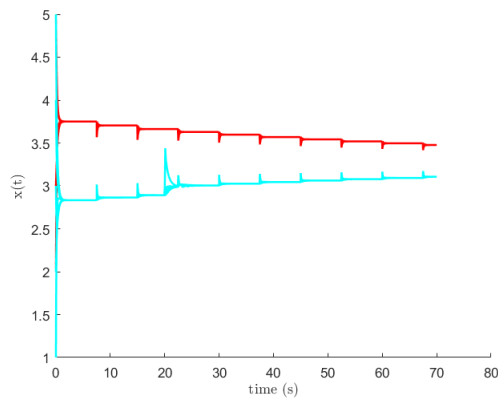


FIGURE A.5 – The state trajectories of the system suffering an attack (counter attack enabled).

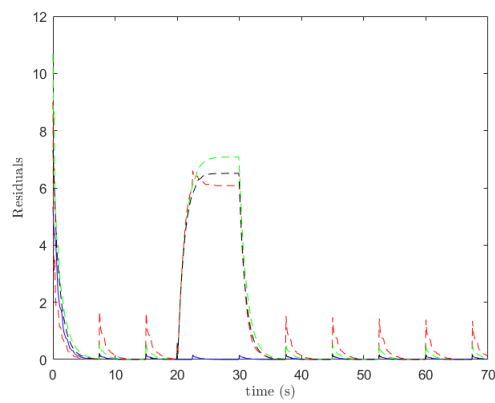


FIGURE A.6 – The residuals of the outgoing connections of agent 7 while suffering an attack.

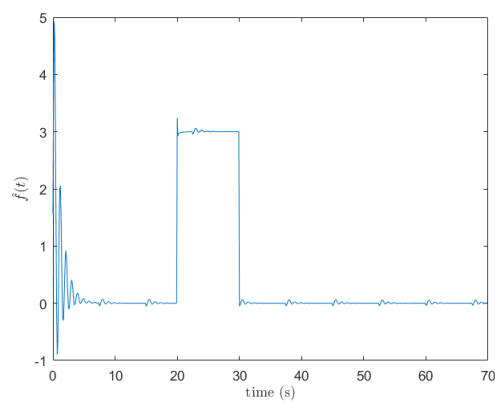


FIGURE A.7 – The attack estimation of an attack.

A.8 provide the states of the system under attack while using observer A.16, the states behave somewhat similar to the ones in Figure A.5. However, consensus is reached slightly closer to the

autonomous system at $x^* = 3.261$. Figure A.9 shows the residuals for this bank of observers. The effect of the resets in negligible in this case. It shows the tradeoff between the two observers. Despite needing the information of the leaders, observer A.16 provides smoother detection and isolation of an attack. Finally, Figure A.10 shows the attack estimation for edge (7, 8).

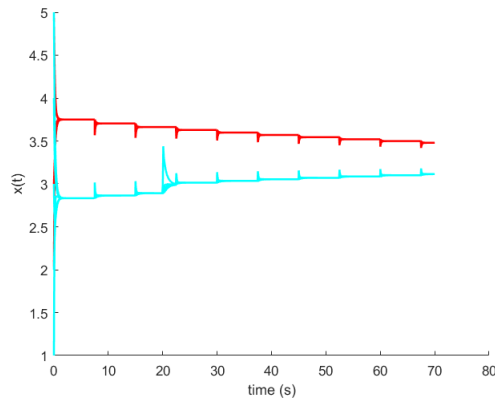


FIGURE A.8 – The state trajectories of the system suffering an attack (counter attack enabled).

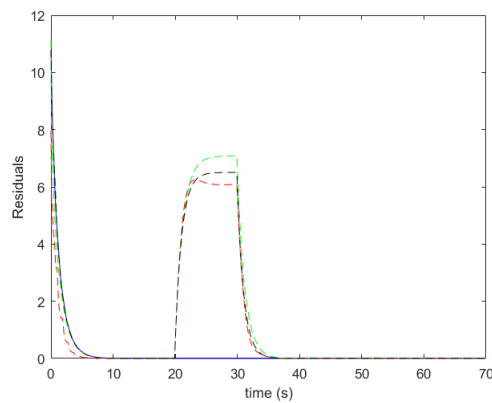


FIGURE A.9 – The residuals of the outgoing connections of agent 7 while suffering an attack.

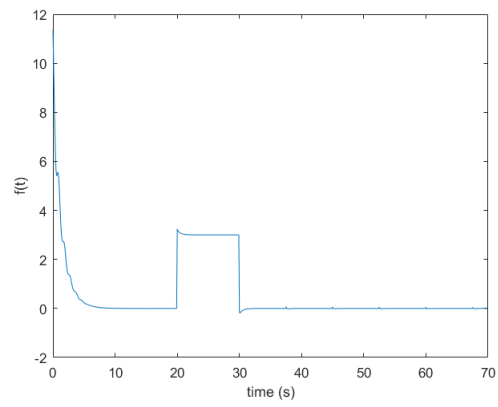


FIGURE A.10 – Attack estimation for edge (7,8).

B Sélection de publications

Liste des publications annexées

La sélection de tirés à part, ci-dessous, correspond à un article pour chacune des problématiques mentionnées dans le résumé de mes activités de recherche.

- A. Zeroual, **N. Messai**, S. Kechida, F. Hamdi, A Piecewise switched linear approach for traffic flow modeling, International Journal of Automation and Computing, Vol. 14, pp. 729-741, 2017
- S. Martinez, **N. Messai**, T. Boukhobza, N. Manamanni, F. Hamelein, Graphic approach for the determination of the existence of sequences guaranteeing observability of switched linear systems, Automatica, Vol.50, pp 584-590, 2014
- S. Ould El Mehdi, R. Bekrar, **N. Messai**, F. Leclercq, D. Lefebvre, B. Riera, Design and identification of Stochastic and Deterministic Stochastic Petri Nets, IEEE SMC Part A, Vol. 42-4, pp. 931-946, 2012
- D. Belkhiat, **N. Messai**, N. Manamanni, Design of a Robust Fault Detection Based-Observer for Linear Switched Systems with external disturbances, Nonlinear Analysis : Hybrid Systems, Vol. 5-2, pp. 206-219, 2011
- **N. Messai**, J. Zaytoon, B. Riera, Identification of a class of hybrid dynamic systems with feed-forward neural networks : about the validity of the global model, Nonlinear Analysis : Hybrid Systems, Vol. 2-3, pp. 773-785, 2008

Bibliographie

- [1] P. J. Antsaklis, M. D. Lemmon, and J. A. Stiver, “Hybrid system modelling and event identification,” tech. rep., Technical report of the ISIS Group at the University of Notre Dame ISIS-93-002, Notre Dame, IN, USA, 1993.
- [2] P. J. Ramadge and W. M. Wonham, “Supervisory Control of a Class of Discrete Event Processes,” *SIAM Journal on Control and Optimization*, vol. 25, pp. 206–230, jan 1987.
- [3] R. David and H. Alla, “Petri nets for modeling of dynamic systems. A survey,” *Automatica*, vol. 30, no. 2, pp. 175–202, 1994.
- [4] R. S. D. Harel, A. Pnueli, J. Schmidt, “On the formal semantics of statecharts,” in *Proceedings of Symposium on Logic in Computer Science*, pp. 55–64, jun 1987.
- [5] J. Flaus, “Modeling and analysis of hybrid dynamical systems : an introduction,” *Journal européen des systèmes automatisés*, vol. 32, no. 7-8, pp. 797–830, 1996.
- [6] M. Branicky, “Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 43, no. 4, pp. 475–482, 1998.
- [7] J. Zaytoon, *Systèmes dynamiques hybrides*. Hermes Science publications, 2001.
- [8] H. Guéguen and M. A. Lefebvre, “A comparison of mixed specification formalisms,” *Journal Europeen des Systemes Automatisés*, vol. 35, no. 4, pp. 381–393, 2001.
- [9] E. De Santis, M. D. Di Benedetto, and G. Pola, “On observability and detectability of continuous-time linear switching systems,” in *42nd IEEE Conf. on Decision and Control*, (Maui, Hawaii, USA), pp. 5777–5782, 2003.
- [10] J. Lygeros, K. H. Johansson, S. N. Simié, J. Zhang, and S. S. Sastry, “Dynamical properties of hybrid automata,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 48, no. 1, pp. 2–17, 2003.
- [11] D. Vibert, C. Valentin-Roubinet, and E. Niel, “A modelling method to take into account fluctuations of continuous variables in a class of hybrid systems,” in *European Control Conference*, (Brussels, Belgium), pp. 484–453, 1997.

- [12] R. Champagnat, *Supervision des systemes discontinus : definition d'un modele hybride et pilotage en temps-reel*. PhD thesis, Université de Toulouse 3, 1998.
- [13] I. Demongodin and N. T. Koussoulas, "Differential Petri net models for industrial automation and supervisory control," *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C Applications and Reviews*, vol. 36, no. 4, pp. 543–553, 2006.
- [14] F. Hamdi, N. Manamanni, N. Messai, and K. Benmahammed, "Hybrid observer design for linear switched system via Differential Petri Nets," *Nonlinear Analysis : Hybrid Systems*, vol. 3, no. 3, pp. 310–322, 2009.
- [15] F. Hamdi, N. Messai, and N. Manamanni, "Observer based state feedback control design for switched linear systems : A differential petri net approach," *2010 Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol)*, no. 2, pp. 167–172, 2010.
- [16] D. Liberzon, "Hybrid feedback stabilization of systems with quantized signals," *Automatica*, vol. 39, pp. 1543–1554, 2003.
- [17] P. J. Antsaklis and X. D. Koutsoukos, "Hybrid Dynamical Systems : Review and Recent Progress," in *Software-Enabled Control : Information Technology for Dynamical Systems* (T. Samad and G. Balas, eds.), Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [18] R. Shorten, F. Wirth, O. Mason, K. Wulff, and C. King, "Stability Criteria for Switched and Hybrid Systems," *SIAM Review*, vol. 49, no. 4, pp. 545–592, 2007.
- [19] J. Lunze and F. Lamnabhi-Lagarrigue, *Handbook of Hybrid Systems Control Theory, Tools, Applications*. Cambridge University Press, 2009.
- [20] K. Zhang, B. Jiang, P. Shi, and V. Cocquempot, *Observer-Based Fault Estimation Techniques*. Springer, 2017.
- [21] S. X. Ding, *Model-Based Fault Diagnosis Techniques*. Advances in Industrial Control, London : Springer London, 2013.
- [22] S. X. Ding, *Model-based Fault Diagnosis Techniques*. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [23] X. Qi, J. Qi, D. Theilliol, Y. Zhang, H. J., and D. S. C. Hua, "Review on fault diagnosis and fault tolerant control methods for single-rotor aerial vehicles," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 73, no. 1-4, pp. 535–555, 2014.
- [24] J. Gertler, *Fault detection and diagnosis in engineering systems*. Taylor & Francis Group, 1998.
- [25] R. Patton and J. Chen, "Observer-based fault detection and isolation : Robustness and applications," *Control Engineering Practice*, vol. 5, pp. 671–682, may 1997.
- [26] M. Basseville and I. V. Nikiforov, "Detection of Abrupt Changes : Mich ' ele Basseville," *Change*, vol. 2, no. 4, pp. 729–730, 1993.
- [27] R. Isermann, *Fault-diagnosis systems : an introduction from fault detection to fault tolerance*. Springer, 2006.

- [28] M. Blanke and J. Schroder, *Diagnosis and fault-tolerant control*. Springer, 2006.
- [29] P. M. Frank, "Fault Diagnosis in Dynamic Systems via State Estimation - a Survey," in *System Fault Diagnostics, Reliability and Related Knowledge-Based Approaches*, pp. 35–98, Springer Netherlands, 1987.
- [30] P. M. Frank, "Analytical and qualitative model-based fault diagnosis—a survey and some new results," *European Journal of control*, vol. 2, no. 1, pp. 6–28, 1996.
- [31] R. J. Patton and J. Chen, "A review of parity space approaches to fault diagnosis," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 17, no. 2, pp. 277–285, 1994.
- [32] S. Zad, R. Kwong, and W. Wonham, "Fault diagnosis in discrete-event systems : Framework and model reduction," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 48, no. 7, pp. 1199–1212, 2003.
- [33] M. Sampath, R. Sengupta, S. Lafortune, K. Sinnamohideen, and D. Teneketzis, "Diagnosability of discrete-event systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 40, no. 9, pp. 1555–1575, 1995.
- [34] M. Sampath, R. Sengupta, and S. Lafortune, "Failure diagnosis using discrete-event models," *IEEE transactions on control systems technology*, vol. 4, no. 2, pp. 105–124, 1996.
- [35] S. Hashtrudi Zad, R. Kwong, and W. Wonham, "Fault diagnosis in discrete-event systems : framework and model reduction," in *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.98CH36171)*, vol. 4, pp. 3769–3774, 1998.
- [36] V. Cocquempot, T. El Mezyani, and M. Staroswiecki, "Fault detection and isolation for hybrid systems using structured parity residuals," in *5th Asian Control Conference*, pp. 1204–12012, 2004.
- [37] H. Yang, X. Liu, and L. Zhang, "Exponential Stability of a Class of Switched Fuzzy Delay Systems," in *International Conference on Intelligent Control and Information Processing*, pp. 479–484, 2010.
- [38] S. Narasimhan and G. Biswas, "Model-based diagnosis of hybrid systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 2007.
- [39] N. Messai, P. Thomas, D. Lefebvre, and B. Riera, "Fault detection for HDS by means of neural networks : application to two tanks hydraulic system," in *6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, SAFEPROCESS'06*, pp. 1039 – 1044, 2006.
- [40] K. Iftikhar, A. Q. Khan, and M. Abid, "Robust Fault Detection Filter Design for Discrete Switched Linear Systems," in *International Conference on Frontiers of Information Technology*, no. 1, (Islamabad, India), pp. 116–121, 2012.

- [41] D. Du, B. Jiang, and P. Shi, "Fault detection for discrete-time switched systems with intermittent measurements," *International Journal of Control*, vol. 85, no. 1, pp. 78–87, 2012.
- [42] J. Van Gorp, M. Defoort, M. Djemai, and K. C. Veluvolu, "Fault detection based on higher-order sliding mode observer for a class of switched linear systems," *IET Control Theory and Applications*, vol. 9, no. 15, pp. 2249–2256, 2015.
- [43] F. Kratz and D. Aubry, "Finite memory observer for state estimation of hybrid systems," in *Proceedings of the 5th IFAC symposium on Fault Detection, Supervision and safety of Technical Processes*, (Washington DC, USA), pp. 687–691, 2003.
- [44] A. L. Juloski, W. P. M. H. Heemels, Y. Boers, and F. Verschure, "Two Approaches to State Estimation for a Class of Piecewise Affine Systems," in *42nd IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 143–148, 2003.
- [45] A. Juloski, *Observer design and identification methods for hybrid systems : theory and experiments*. PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2004.
- [46] H. Saadaoui, *Contribution à la synthèse d'observateurs non linéaires pour des classes de systèmes dynamiques hybrides*. PhD thesis, 2007.
- [47] A. Pisano, M. R. Rapaić, and E. Usai, "Discontinuous dynamical systems for fault detection. A unified approach including fractional and integer order dynamics," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 95, pp. 111–125, 2012.
- [48] S. Pettersson, "Switched state jump observers for switched systems," *Proceedings of the IFAC World Congress*, vol. 38, no. 1, pp. 127–132, 2005.
- [49] S. Pettersson, "Designing switched observers for switched systems using multiple lyapunov fonctions and dwell- time switching," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 39, no. 5, pp. 18–23, 2006.
- [50] V. Cocquempot, M. Staroswiecki, and T. E. Mezyani, "Switching time estimation and fault detection for hybrid systems using structured parity residuals," in *5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of technical Processes*, (Washington DC, USA), pp. 681–686, 2003.
- [51] A. Balluchi, L. Benvenuti, M. Benedetto, and A. L. Sangiovanni Vincentelli, "Design of Observers for Hybrid Systems," *Hybrid Systems : Computation and Control*, vol. 2289, pp. 76–89, 2002.
- [52] M. D. Di Benedetto, S. Di Gennaro, and A. D'Innocenzo, "Critical observability and hybrid observers for error detection in air traffic management," *Proceedings of the 20th IEEE International Symposium on Intelligent Control, ISIC '05 and the 13th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED '05*, vol. 2005, no. 1, pp. 1309–1314, 2005.

- [53] J. Xu, A. P. Loh, and K. Y. Lum, "Observer-based fault detection for piecewise linear systems : Continuous-time cases," in *International Conference on Control Applications*, (Singapore), pp. 379–384, 2007.
- [54] J. Barbot, H. Saadaoui, M. Djemai, and N. Manamanni, "Nonlinear observer for autonomous switching systems with jumps," *Nonlinear Analysis : Hybrid Systems*, vol. 1, no. 4, pp. 537–547, 2007.
- [55] A. Alessandri and P. Coletta, "Switching observers for continuous-time and discrete-time linear systems," in *Proceedings of the American Control Conference*, vol. 3, pp. 2516–2521, 2001.
- [56] A. Juloski, W. Heemels, and S. Weiland, "Observer design for a class of piece-wise affine systems," *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 3, pp. 2606–2611, 2002.
- [57] A. Birouche, *Contribution sur la synthèse d 'observateurs pour les systèmes dynamiques hybrides*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2006.
- [58] H. Saadaoui, N. Manamanni, M. Djemai, J. Barbot, and T. Floquet, "Exact differentiation and sliding mode observers for switched Lagrangian systems," *Nonlinear Analysis : Theory, Methods and Applications*, vol. 65, pp. 1050–1069, sep 2006.
- [59] F. J. Bejarano and A. Pisano, "Switched Observers for Switched Linear Systems With Unknown Inputs," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 56, no. 3, pp. 681–686, 2011.
- [60] M. Defoort, J. Van Gorp, M. Djemai, and K. Veluvolu, "Hybrid observer for switched linear systems with unknown inputs," in *7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, no. 1, pp. 594–599, 2012.
- [61] A. Juloski, W. Heemels, and Y. Boers, "Two approaches to state estimation for a class of piecewise affine systems," *42nd IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 143–148, 2003.
- [62] J. Van Gorp, M. Defoort, K. C. Veluvolu, and M. Djemai, "Hybrid sliding mode observer for switched linear systems with unknown inputs," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 351, no. 7, pp. 3987–4008, 2014.
- [63] F. Arichi, J. V. Gorp, M. Djemai, M. Defoort, and B. Cherki, "Hybrid state estimation for a class of switched system using Petri Nets," pp. 2534–2539, 2014.
- [64] F. J. Bejarano and L. Fridman, "Exact Observer for Switching Linear Systems via Super Twisting Algorithm," *IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems*, vol. 42, no. 17, pp. 370–375, 2009.
- [65] F. J. Bejarano and L. Fridman, "State exact reconstruction for switched linear systems via a super-twisting algorithm," *International Journal of Systems Science*, vol. 42, no. 5, pp. 717–724, 2011.

Bibliographie

- [66] D. Fragkoulis, *Détection et localisation des défauts provenant des capteurs et des actionneurs : application sur un système non linéaire*. PhD thesis, 2008.
- [67] S. Ding, *Model-based Fault Diagnosis Techniques*. Springer London, 2008.
- [68] D. Du, B. Jiang, and P. Shi, “Fault diagnosis for switched systems with time delay,” in *IEEE International conference on control and automation*, pp. 2162–2165, 2010.
- [69] D. Du and Y. Yang, “Fault detection and estimation for discrete-time switched systems,” in *Chinese Control Conference*, (Hangzhou, China), pp. 6382–6385, 2015.
- [70] K. Busawon and K. P., “On the design of integral and proportional integral observers,” in *Proceedings of the American Control Conference*, 2000.
- [71] B. Marx, D. Koenig, and D. Georges, “Robust fault diagnosis for linear descriptor systems using proportional integral observers,” in *42th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 661–670, 2003.
- [72] B. Shafai, C. Pi, and S. Nork, “Simultaneous disturbance attenuation and fault detection using proportional integral observers,” in *American Control Conference*, pp. 1647–1649, 2002.
- [73] A. A. Farhat, *Détection, localisation et estimation de défauts : Application Véhicule*. PhD thesis, Université Grenoble Alpes, 2016.
- [74] M. Fliess, M. Mboup, and H. Sira-Ramirez, “Analyse et représentation de signaux transitoires : application à la compression, au débruitage et à la détection de ruptures,” in *CRETSI*, 2005.
- [75] M. Fliess, C. Join, M. Mboup, and H. Sira-Ramirez, “Compression différentielle de transitoires bruités,” *Comptes Rendus Mathématique*, vol. 339, pp. 821–826, dec 2004.
- [76] M. Fliess, C. Join, and W. Perruquetti, “Real-time estimation of the switching signal for perturbed switched linear systems,” *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, vol. 3, pp. 409–414, 2009.
- [77] M. Fliess, C. Join, and W. Perruquetti, “Real-time estimation for switched linear systems,” in *IEEE Conference on Decision and Control*, (Cancun, Mexico), pp. 941–946, IEEE, 2008.
- [78] M. Mboup, C. Join, and M. Fliess, “Numerical differentiation with annihilators in noisy environment,” *Numerical Algorithms*, vol. 50, no. 4, pp. 439–467, 2009.
- [79] M. Mboup, C. Join, and M. Fliess, “A revised look at numerical differentiation with an application to nonlinear feedback control,” in *Mediterranean Conference on Control and Automation*, (Athens, Greece), IEEE, 2007.
- [80] M. Mboup, “Parameter estimation via differential algebra and operational calculus,” p. 40, 2007.

- [81] M. Mboup and S. Riachy, "A frequency domain interpretation of the algebraic differentiators," *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, vol. 19, pp. 9147–9151, 2014.
- [82] Y. Tian, T. Floquet, L. Belkoura, and W. Perruquetti, "Switching time estimation for linear switched systems : an algebraic approach," in *Conference on Decision and Control*, (Shanghai, China), pp. 3909–3913, IEEE, 2009.
- [83] A. Hakem, K. M. Pekpe, and V. Cocquempot, "Parameter free method for switching time estimation and current mode recognition," in *Conference on Control and Fault Tolerant Systems*, (Nice-France), pp. 879–884, 2010.
- [84] A. Hakem, K. M. Pekpe, and V. Cocquempot, "On mode discernibility and switching detectability for linear switching systems using a data based projection method," in *Chinese Control and Decision conference*, (Mianyang, China), pp. 81–86, IEEE, 2011.
- [85] A. Hakem, V. Cocquempot, and K. M. Pekpe, "Switching time estimation and active mode recognition using a data projection method," *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, vol. 26, no. 4, pp. 827–840, 2016.
- [86] F. Hamdi, N. Manamanni, N. Messai, and K. Benmahammed, "Hybrid observer design for switched linear systems using Differential Petri Net," *2008 16th Mediterranean Conference on Control and Automation*, pp. 95–100, jun 2008.
- [87] Y. Tian, T. Floquet, L. Belkoura, and W. Perruquetti, "Algebraic switching time identification for a class of linear hybrid systems," *IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 233–241, 2009.
- [88] Y. Tian, T. Floquet, L. Belkoura, and W. Perruquetti, "Algebraic switching time identification for a class of linear hybrid systems," *Nonlinear Analysis : Hybrid Systems*, vol. 5, pp. 233–241, 2011.
- [89] D. Mincarelli, T. Floquet, and L. Belkoura, "Active mode and switching time estimation for switched linear systems," in *Conference on Decision and Control and European Control Conference*, (Orlando, FL, USA), pp. 1854–1859, IEEE, 2011.
- [90] T. G. Park and K. S. Lee, "Process fault isolation for linear systems with unknown inputs," *IEE Proceedings Control Theory and Applications*, vol. 151, pp. 720–726, nov 2004.
- [91] A. Levant, "Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control," *International Journal of Control*, vol. 58, no. 6, pp. 1247–1263, 1993.
- [92] A. Levant, "Robust exact differentiation via sliding mode technique," *Automatica*, vol. 34, no. 3, pp. 379–384, 1998.
- [93] A. Levant, "Higher-order sliding modes, differentiation and output feedback control," *International journal of Control*, vol. 76, pp. 924–941, 2003.

Bibliographie

- [94] M. Fliess, M. Mboup, and A. Sedoglavic, “Estimation des dérivées d’un signal multidimensionnel avec applications aux images et aux vidéos,” in *CRETISI*, no. 1, pp. 136–139, 2006.
- [95] J. Villagra, B. D’andréa-Novel, M. Fliess, and H. Mounier, “Synthèse algébrique d’estimateurs de vitesses longitudinale et latérale d’une automobile,” vol. 5, no. 3, pp. 12–17, 2008.
- [96] D. Liu, *Error analysis of a class of derivative estimators for noisy signals and applications*. PhD thesis, Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, 2011.
- [97] M. Lighthill and G. Whitham, “On kinematic waves ii : A theory of traffic flow on roads,,” in *Proceedings of the Royal Society*, pp. 371–345, 1955.
- [98] H. Payne, “Models of freeway traffic and control, simulation,” in *Council Proceedings, no.1*, vol. 1, pp. 51–56, 1971.
- [99] J. Yang, C. Wu, L. Cui, and Y. Chen, “Finite time state estimation and fault detection for linear switched systems with unknown inputs,” in *IEEE 7th Data Driven Control and Learning Systems Conference*, (Enshi, Hubei Province, China), pp. 1079–1084, 2018.
- [100] A. Tanwani, H. Shim, and D. Liberzon, “Observability for Switched Linear Systems : Characterization and Observer Design,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 58, pp. 891–904, apr 2013.
- [101] A. Belkadi, L. Z., L. Ciarletta, Y. Zhang, and D. Theilliol, “Flocking control of a fleet of unmanned aerial vehicles,” *Control Theory and Technology*, vol. 16-2, no. 82-92, 2018.
- [102] K. Zhang, B. Jiang, and C. V., “Distributed fault estimation observer design for multi-agent systems with switching topologies,” *IET Control Theory & Applications*, vol. 11-16, pp. 2801–2807, 2017.
- [103] E. A. Lee, “Cyber-physical systems-are computing foundations adequate,” in *Position Paper for NSF Workshop On Cyber-Physical Systems : Research Motivation, Techniques and Roadmap*, vol. 2, 2006.
- [104] G. Francia, D. Thornton, and T. Brookshire, “Cyberattacks on SCADA Systems,” in *Proceedings of the 16th Colloquium for Information Systems Security Education*, pp. 9–14, June 2012.
- [105] A. Hoehn and P. Zhang, “Detection of Replay Attacks in Cyber-Physical Systems,” pp. 0–5, 2016.
- [106] V. Reppa, M. M. Polycarpou, and C. Panayiotou, “Distributed Sensor Fault Diagnosis for a Network of Interconnected Cyber-Physical Systems,” *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, vol. 2, no. 1, pp. 11–23, 2015.
- [107] Y. G. Sun, L. Wang, G. Xie, and M. Yu, “Improved overshoot estimation in pole placements and its application in observer-based stabilization for switched systems,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 51, no. 12, pp. 1962–1966, 2006.

- [108] M. N. Halgamuge, S. M. Guru, and A. Jennings, “Energy efficient cluster formation in wireless sensor networks,” *Telecommunications, 2003. ICT 2003. 10th International Conference on*, vol. 2, pp. 1571 – 1576 vol.2, 2003.
- [109] F. Pasqualetti, *Secure Control Systems : A Control-Theoretic Approach to Cyber-Physical Security* by. PhD thesis, 2012.
- [110] F. Pasqualetti, F. Doerfler, and F. Bullo, “Attack Detection and Identification in Cyber-Physical Systems,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 58, no. 11, pp. 2715–2729, 2013.
- [111] A. Teixeira, *Toward Cyber-Secure and Resilient Networked Control Systems*. PhD thesis, 2014.
- [112] F. Pasqualetti and D. Florian, “A Divide-and-Conquer Approach to Distributed Attack Identification,” *Systems & Control Letters*, pp. 5801–5807, 2014.
- [113] M. Bragagnolo, I.-C. Morarescu, J. Daafouz, and P. Riedinger, “Reset strategy for consensus in networks of clusters,” *Automatica*, vol. 65, pp. 53–62, 2016.